

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

## **Tese de Doutorado**

# **Localização de Descargas Parciais Baseada em um Método Radiométrico - Prova do Princípio**

Linha de Pesquisa: Instrumentação Eletrônica

Doutorando:

**José Maurício Ramos de Souza Neto**

Orientadores:

**Prof. José Sérgio da Rocha Neto, DSc - UFCG**

**Prof. Ian Andrew Glover, *PhD University of Huddersfield***

Campina Grande - PB, Março 2014

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

Doutorando: José Maurício Ramos de Souza Neto

Abril, 2014

*Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em ciências no Domínio de Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Instrumentação eletrônica

Orientador:

José Sérgio da Rocha Neto

Co-orientador:

Ian Andrew Glover

27 de maio de 2014, Paraíba, Brasil



S7291 Souza Neto, José Maurício Ramos de.  
Localização de descargas parciais baseada em um método radiométrico : prova do princípio / José Maurício Ramos de Souza Neto. - Campina Grande, 2014.  
158 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.  
"Orientação: Prof. Dr. José Sérgio da Rocha Neto, Prof. Dr. Ian Andrew Glover".  
Referências.

1. Descarga Parcial. 2. Radiômetro. 3. Envoltória. 4. Razão de Energias. 5. Tese - Engenharia Elétrica. I. Rocha Neto, José Sérgio da. II. Glover, Ian Andrew. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 621.317(043)

**"LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS BASEADA EM UM MÉTODO  
RADIOMÉTRICO - PROVA DO PRINCÍPIO"**

**JOSÉ MAURÍCIO RAMOS DE SOUZA NETO**

**TESE APROVADA EM 25/04/2014**



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

**IAN ANDREW GLOVER, Ph.D., UFCG**  
Orientador(a)



**AMAURI OLIVEIRA, D.Sc, UFBA**  
Examinador(a)



**EDVAL JOSÉ PINHEIRO SANTOS, Dr, UFPE**  
Examinador(a)

**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)



**ANGELO PERKUSICH, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

## *Agradecimentos*

- À Deus que é Esperança, Piedade e Misericórdia, a Verdadeira Força, que nos faz e nos dá tudo que temos e somos;
- A minha mãe Terezinha Ramos de Souza, grande timoneira que sempre me guia pelas águas tranquilas do amor proporcionando-me carinho, otimismo, perseverança e honestidade, a quem sem dúvida alguma, devo tudo que tenho e sou;
- Aos meus grandes amigos conquistados no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle e a tantos outros, pelo apoio, incentivo e sobretudo, por estarem sempre presentes diante da menor solicitação;
- *To the Mexican gang: “Thanks for helping me to enjoy the time abroad, for the support and all the kindness that I have received”.*
- *To my Pakistani friends: “Aap sub sirf dost nahin belkey bhai ho merey. Meri zindagi main itney pyarey lamhey laney ke lie aapka buhut mamnoon hun. Aap sub hamesha merey dil ma rahogey. Shahzad bhai ka khas shukar guzar hun, hamara pyara Lala”.*
- Aos meus orientadores José Sérgio da Rocha Neto e Ian Andrew Glover pela paciência que sempre desprenderam ao me encaminhar nos estudos;
- A Universidade Federal de Campina Grande, a Universidade de *Strathclyde* e a Universidade de *Huddersfield* por terem me dado esta oportunidade e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, por financiar esta atividade de pesquisa em ambas as universidades, no Brasil e na Escócia, através do programa de doutorado sanduíche.

*A minha mãe e tia, Terezinha Ramos de Souza e Severina Ramos de Souza, pelas angústias e preocupações que passavam por minha causa, por terem dedicado parte de suas vidas a mim, pelo amor, carinho e estímulo que me ofereceram e pelo exemplo de vida, dedico-lhes esta conquista como gratidão, por sempre estarem presentes nos momentos mais difíceis, colaboradoras e incentivadoras, minhas grandes fontes de alegria.*

## *Resumo*

A tese aqui relatada é o resultado de uma pesquisa de doutorado relacionada com a prova do princípio de um novo tipo de sistema radiométrico aplicado a detecção e estimação de localização de fontes de descargas parciais. Medição de Descarga Parcial (DP) é uma técnica de monitoramento do isolamento de alta tensão estabelecida e usada para facilitar a detecção de falhas incipientes em equipamentos de alta tensão. Com base na grande importância do sistema de energia, é constante a pesquisa sobre a natureza e as características das fontes de DP. Um sistema radiométrico de monitoramento de descargas parciais de baixo custo (comparado ao item monitorado) é descrito para aplicação de monitoramento em tempo real do estado de conservação, gestão de ativos e otimização de operações no futuro *Smart Grid*. O sistema de monitoramento de DP proposto baseia-se numa nova abordagem para a localização de fontes de DP que utiliza proporções de energia removendo a necessidade de sincronização entre os sensores, melhorando assim sua escalabilidade. A exigência de alta taxa de amostragem é também evitada pelo uso de um detector de envoltória. Para a avaliação proposta de sinais de DP, várias medições foram realizadas utilizando uma antena *diskcone* e um sistema comercial baseado no padrão IEC 60270. Estas medições, aqui relatadas, sugerem com sucesso que as fontes de descargas parciais podem ser detectadas e localizadas por meio de medições radiométricas no espaço livre de apenas potência do sinal. As medições foram feitas em dois locais com protocolos de medição semelhantes por três grupos de pesquisa colaboradores. Um conjunto de medição é mais animador do que o outro, mas uma possível explicação para a heterogeneidade dos resultados é apresentado. Sugere-se que um sistema que monitora apenas potência podem formar a base de uma rede de sensores sem fio de baixo custo para o monitoramento de descargas parciais em subestação de energia elétrica.

## *Abstract*

The thesis reported here is the result of a PhD research related to the proof of principle of a new type of radiometric system applied to detection and location estimation of partial discharges sources. Partial Discharge (PD) measurement is an established high voltage insulation monitoring technique used to facilitate the detection of incipient faults in high voltage apparatus. Based on the great importance of the power system, is constant the research about the nature and characteristics of PD sources. A low-cost (compared to the monitored item), free-standing, radiometric, partial discharge monitoring system is described for application to real-time condition monitoring, asset management and operations optimization in the future smart grid. The proposed PD monitoring system is based on a novel approach to PD location which uses power ratios to obviate the need for synchronization between sensors thereby improving scalability. The high sampling rate requirement is also avoided by the use of an envelope detector. For the proposed evaluation of PD signals, several measurements were performed using a diskcone antenna and a commercial system based on the IEC 60270 standard. These measurements reported here suggests successfully that partial discharge sources might be detected and located using power-only free-space radiometric measurements. The measurements were made in two locations with similar measurement protocols by three collaborating research groups. One measurement set is more encouraging than the other but a likely explanation for the disparate nature of the results is offered. It is suggested that a system based on amplitude only measurements might form the basis of a low-cost wireless sensor network for monitoring partial discharge in electricity substation.

# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução, Motivação e Objetivos</b>            | <b>16</b> |
| 1.1      | Introdução . . . . .                                | 16        |
| 1.2      | Motivação . . . . .                                 | 17        |
| 1.3      | Objetivo Geral . . . . .                            | 18        |
| 1.3.1    | Objetivos específicos . . . . .                     | 18        |
| 1.4      | Estrutura da Tese . . . . .                         | 19        |
| <b>2</b> | <b>Revisão de Literatura</b>                        | <b>21</b> |
| 2.1      | Detecção Radiométrica de Descarga Parcial . . . . . | 28        |
| 2.2      | Potencial de Diagnóstico . . . . .                  | 31        |
| 2.3      | Conclusões . . . . .                                | 32        |
| <b>3</b> | <b>Teoria sobre DP e Sistemas Radiométricos</b>     | <b>34</b> |
| 3.1      | Definição de Descargas Parciais . . . . .           | 34        |
| 3.2      | Tipos de Descargas Parciais . . . . .               | 35        |
| 3.2.1    | Descargas Internas . . . . .                        | 35        |
| 3.2.2    | Descargas Superficiais . . . . .                    | 36        |
| 3.2.3    | Corona . . . . .                                    | 37        |
| 3.3      | Características das Descargas Parciais . . . . .    | 37        |
| 3.3.1    | Espectral . . . . .                                 | 38        |
| 3.3.2    | Temporal . . . . .                                  | 39        |
| 3.3.3    | Intensidade . . . . .                               | 41        |
| 3.3.3.1  | Carga Aparente . . . . .                            | 42        |
| 3.3.3.2  | Contagem de Pulso por Ciclo . . . . .               | 42        |
| 3.3.3.3  | Diagramas Q-phi . . . . .                           | 42        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.4    | Variação da Intensidade com a Rigidez do Isolamento e a Geometria do Defeito . . . . .         | 43        |
| 3.4      | Evolução da Intensidade das Descargas Parciais . . . . .                                       | 44        |
| 3.5      | Descargas Parciais como uma Ferramenta para Monitoramento da Condição do <i>Grid</i> . . . . . | 46        |
| 3.5.1    | Estrutura do <i>Smart Grid</i> . . . . .   | 47        |
| 3.6      | Revisão sobre Detecção/Medição/Técnicas de Localização de Descargas Parciais . . . . .         | 48        |
| 3.6.1    | Detecção por Luz Visível e Ultravioleta . . . . .  | 48        |
| 3.6.2    | Detecção Acústica . . . . .  | 49        |
| 3.6.3    | HFCT . . . . .   | 51        |
| 3.6.4    | TEV . . . . .  | 52        |
| 3.6.5    | UHF Invasivo . . . . .   | 53        |
| 3.6.6    | UHF não Invasivo . . . . .   | 54        |
| 3.7      | Vantagens e Desafios de um Sistema Radiométrico . . . . .                                      | 56        |
| 3.7.1    | Abordagem Existente para Localização Baseada em TDOA . . . . .                                 | 56        |
| 3.7.2    | Abordagem Proposta para Localização Baseada Apenas em Amplitude do Sinal . . . . .             | 58        |
| 3.8      | Conclusões . . . . .   | 59        |
| <b>4</b> | <b>Modelagem do Sistema de Medição</b>   | <b>61</b> |
| 4.1      | Modelos de Fontes de DP . . . . .  | 61        |
| 4.1.1    | Modelo da Capacitância . . . . .   | 61        |
| 4.1.2    | Modelo de Pedersen . . . . .   | 62        |
| 4.1.3    | Modelo de Repetição . . . . .  | 63        |
| 4.2      | Células de DP para Geração e Coleta de Dados . . . . .   | 64        |
| 4.3      | Potência de RF versus Intensidade das DP – Proposta de uma Relação Estatística . . . . .       | 72        |
| 4.3.1    | Metodologia Experimental . . . . .   | 73        |
| 4.3.2    | Resultados Obtidos . . . . .   | 76        |
| 4.4      | Modelo de Canal . . . . .  | 79        |
| 4.4.1    | Propagação no Espaço Livre e Plano de Terra . . . . .  | 79        |
| 4.4.2    | Interferência Coerente e Ruído Branco . . . . .  | 81        |
| 4.5      | O Sistema de Detecção não Sincronizado . . . . .   | 82        |
| 4.5.1    | O Problema da Relação Sinal/Ruído . . . . .  | 82        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.5.1.1  | Resolução Temporal e Restrições Tecnológicas . . . . .  | 83         |
| 4.5.2    | Detector de Envoltória como um Mecanismo para Troca de Custos . . . . .                         | 83         |
| 4.5.3    | Proposta de uma Arquitetura para o Receptor . . . . .   | 84         |
| 4.6      | Modelo de Simulação . . . . .   | 85         |
| 4.6.1    | Exemplo dos Resultados da Simulação . . . . .   | 90         |
| 4.6.2    | Otimização dos Parâmetros do Receptor . . . . .   | 92         |
| 4.7      | Características do Sistema de Detecção . . . . .  | 93         |
| 4.8      | Conclusões . . . . .  | 93         |
| <b>5</b> | <b>Sistema para Monitoramento e Localização de DP</b>   | <b>95</b>  |
| 5.1      | Antena . . . . .  | 95         |
| 5.2      | Detector de Envoltória . . . . .  | 102        |
| 5.2.1    | Amostragem . . . . .  | 104        |
| 5.3      | Sistemas de Localização . . . . .   | 105        |
| 5.4      | Algoritmos de Localização Baseados em RSS . . . . .   | 107        |
| 5.4.1    | Estimação de Distância Usando RSS . . . . .   | 107        |
| 5.4.2    | Localização Baseada em <i>Finger-print</i> . . . . .  | 110        |
| 5.4.3    | Uso da Razão das Potências como Alternativa para Estimação de Distância e Localização . . . . . | 114        |
| 5.5      | Conclusões . . . . .  | 118        |
| <b>6</b> | <b>Resultados Obtidos</b>   | <b>120</b> |
| 6.1      | Procedimento Laboratorial para Validação . . . . .  | 120        |
| 6.2      | Resultado dos Estudos de Caso . . . . .   | 124        |
| <b>7</b> | <b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>   | <b>132</b> |
| 7.1      | Trabalhos Futuros . . . . .   | 134        |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>   | <b>135</b> |
|          | <b>A Publicações</b>  | <b>148</b> |
|          | <b>B Validação das Medições</b>   | <b>152</b> |

# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Exemplo de curvas do espectro de frequência para diferentes dielétricos.  | 25 |
| 3.1  | Representação de uma descarga parcial do tipo interna. . . . .  | 36 |
| 3.2  | Representação de uma descarga parcial do tipo de superfície. . . . .  | 36 |
| 3.3  | Representação de uma descarga parcial do tipo corona. . . . .   | 37 |
| 3.4  | Espectro de potência analisado pelo equipamento da Doble Lemke [19].  | 39 |
| 3.5  | Formas de onda da tensão de saída de um circuito RLC (a) e RC (b) considerando um pulso ideal quadrado de entrada com duração nula. . .   | 40 |
| 3.6  | Pulsos radiométricos: (a) com onda refletida devido a cargas não casadas e (b) refletido nas estruturas do ambiente. . . . .  | 41 |
| 3.7  | Exemplo de curvas de espectros de frequência para dielétricos com diferentes rigidezes. . . . .   | 44 |
| 3.8  | Curvas de tendência observadas no monitoramento <i>online</i> da atividade de DP durante um dia [67]. . . . .   | 45 |
| 3.9  | Curva representativa da mudança na intensidade de DP em um cabo de alta tensão. . . . .   | 46 |
| 3.10 | Diagrama esquemático de uma emissão acústica [71]. . . . .  | 50 |
| 3.11 | Sensores Piezoelétricos para detecção acústica de defeitos em estruturas [101]. . . . .   | 50 |
| 3.12 | Três tipo de acopladores UHF para monitoramento de DP em transformadores. (a) Um acoplador interno, (b) Um externo do tipo com janela dielétrica, (c) Um do tipo sonda para válvula de óleo [47]. . . . . | 54 |
| 3.13 | Sistema de detecção radiométrico implementado na subestação de Melksham.  | 55 |
| 3.14 | Visão conceitual de um sistema de localização de DP baseado no TDOA.  | 58 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.1  | Diagrama esquemático para o modelamento de DP, baseado no modelo das capacitâncias. (a) implementação simples do modelo das capacitâncias, (b) versão modificada com a inserção da capacitância de carga. . . . .                                | 62 |
| 4.2  | Exemplo ilustrativo de um conjunto de eletrodos usados para simulação de Descargas Parciais. . . . .   | 64 |
| 4.3  | Modelo em três dimensões da estrutura geradora de DP. . . . .  | 66 |
| 4.4  | Vista aproximada do modelo da estrutura importada para o <i>Comsol Multiphysics</i> . . . . .  | 67 |
| 4.5  | Gradiente de intensidade de campo elétrica distribuído no interior da estrutura simulada. . . . .  | 68 |
| 4.6  | Curvas de intensidade de campo elétrico sobre a reta de monitoramento que passa pela falha de isolamento. . . . .  | 69 |
| 4.7  | Fotografia da estrutura desenvolvida para geração de DP internas. . . . .  | 70 |
| 4.8  | Fotografia da célula geradora de DP com partícula de alumínio livre em óleo de transformador (Célula UK1). . . . .   | 71 |
| 4.9  | Fotografia da célula geradora de PD com configuração Ponta-plano em $SF_6$ (Célula UK2). . . . .   | 71 |
| 4.10 | Fotografia da célula geradora de PD com partícula de alumínio livre em $SF_6$ (Célula UK3). . . . .  | 72 |
| 4.11 | Fotografia da célula geradora de PD com eletrodo do tipo ponta flutuante (Célula UK4). . . . .   | 72 |
| 4.12 | Arranjo de medição usando a antena <i>diskcone</i> . . . . .   | 74 |
| 4.13 | Curva do Sinal de RF produzida por um eletrodo do tipo ponta flutuante (curva superior). Curva da energia do sinal de RF acumulada com o tempo (curva inferior). A energia total acumulada corresponde a energia no ponto em $2 \mu s$ . . . . . | 75 |
| 4.14 | Tela com o padrão de intensidade das DP geradas no experimento 9, usando a célula UK4 e obtida com uso do sistema comercial LDS-6. . . . .   | 77 |
| 4.15 | Curva da variação média da energia acumulada com a distância. . . . .  | 79 |
| 4.16 | Diagrama de blocos do sistema simulado, onde $q$ é a carga do pulso e $R$ é a distância entre fonte e sensor. . . . .  | 85 |
| 4.17 | Esquema de medição usado. . . . .  | 86 |
| 4.18 | Pulso de DP com componente devido a uma antena não casada propriamente com o sistema de medição. . . . .   | 86 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.19 | Interferência do ambiente medida: Curva preta sólida medida na ausência de um telefone móvel, curva azul tracejada na presença deste. . . . .                       | 88  |
| 4.20 | Soma de senoides representando as portadoras de sinais de comunicação sem fio e dispositivos similares. . . . .   | 89  |
| 4.21 | Diagrama de blocos da estrutura do detector de envoltória. . . . .  | 90  |
| 4.22 | Relação sinal/ruído de pico para uma variação de distância de 50 m. . .   | 90  |
| 4.23 | Simulação dos pulsos medidos em diferentes distâncias (a) 1 m, (b) 10m, (c) 25m e (d) 50m. . . . .  | 91  |
| 4.24 | Sinal de DP (curva tracejada verde) e sinal do detector de envoltória (curva sólida azul) para diferentes alcances: (a) 1 m, (b) 10 m, (c) 25 m e (d) 50 m. . . . . | 92  |
| 5.1  | Diagrama esquemático do sistema montado. . . . .  | 96  |
| 5.2  | Diagrama de uma antena <i>diskcone</i> . . . . .  | 97  |
| 5.3  | Modelo simplificado de uma antena <i>diskcone</i> e antena construída para teste. . . . .   | 98  |
| 5.4  | Representação esquemática para obtenção dos parâmetros-S. . . . .   | 98  |
| 5.5  | Parâmetros $S_{12}$ e $S_{21}$ . . . . .  | 99  |
| 5.6  | Parâmetros $S_{11}$ e $S_{22}$ . . . . .  | 99  |
| 5.7  | Parâmetros $S_{11}$ para um ângulo de abertura de $30^\circ$ no cone da antena. . . . .   | 100 |
| 5.8  | otimizada. . . . .  | 101 |
| 5.9  | Foto do protótipo de antena construído. . . . .   | 101 |
| 5.10 | (a) Parâmetro $S_{11}$ e (b) Impedância característica para uma antena <i>diskcone</i> real. . . . .  | 102 |
| 5.11 | Exemplo de resposta do ADL5511. . . . .   | 103 |
| 5.12 | Curva de decaimento do sinal no ambiente com escala normal. . . . .   | 108 |
| 5.13 | Curva de decaimento do sinal no ambiente com escala logarítmica. . . .  | 109 |
| 5.14 | Contornos de correlação constante entre a assinatura da fonte de DP e a assinatura para fonte emulada numa configuração de 25 nós. . . . .                          | 112 |
| 5.15 | Contornos de correlação constante entre a assinatura da fonte de DP e a assinatura para fonte emulada numa configuração de 100 nós. . . . .                         | 113 |
| 5.16 | Estimação de localização usando triangulação (a) Caso ideal e (b) Com escala de estimação de erro. . . . .  | 116 |
| 5.17 | Sistema de estimação de localização simplificado. . . . .   | 117 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 6.1  | Fotos ilustrativas do laboratório de alta tensão correspondente ao estudo de caso 1 na Universidade de <i>Strathclyde</i> . . . . .   | 121 |
| 6.2  | Diagrama de posicionamento da antena no local do experimento, correspondente ao estudo de caso 1. . . . .   | 122 |
| 6.3  | Fotos ilustrativas do laboratório de alta tensão correspondente ao estudo de caso 2 na Universidade de <i>Huddersfield</i> . . . . .  | 123 |
| 6.4  | Diagrama de posicionamento da antena no local do experimento, correspondente ao estudo de caso 2. . . . .   | 124 |
| 6.5  | Curvas do comportamento dos pulsos para as diferentes posições monitoradas. Experimento realizado na UoS. . . . .   | 126 |
| 6.6  | Curvas do comportamento dos pulsos para as diferentes posições monitoradas. Experimento realizado na UoH. . . . .   | 127 |
| 6.7  | Diagramas representativos da estimação de localização baseada na medição de potência realizada na UoS. (a) Sem o detector de envoltória, (b) com o detector de envoltória. Eixos em metros. . . . . | 129 |
| 6.8  | Diagramas representativos da estimação de localização baseada na medição de potência realizada na UoS. (a) Sem o detector de envoltória, (b) com o detector de envoltória. Eixos em metros. . . . . | 130 |
| B.1  | Experimento 1, usando a célula BR1. . . . .   | 153 |
| B.2  | Experimento 2, usando a célula BR1. . . . .   | 153 |
| B.3  | Experimento 3, usando a célula UK1. . . . .   | 154 |
| B.4  | Experimento 4, usando a célula UK2. . . . .   | 154 |
| B.5  | Experimento 5, usando a célula UK2. . . . .   | 155 |
| B.6  | Experimento 6, usando a célula UK3. . . . .   | 155 |
| B.7  | Experimento 7, usando a célula BR1. . . . .   | 156 |
| B.8  | Experimento 8, usando a célula UK4. . . . .   | 156 |
| B.9  | Experimento 10, usando a célula UK4. . . . .  | 157 |
| B.10 | Experimento 11, usando a célula UK4. . . . .  | 157 |
| B.11 | Experimento 12 to 18, usando a célula UK4. . . . .  | 158 |

# Lista de Tabelas

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Resumo com os dados dos experimentos realizados. . . . .                                  | 76  |
| 4.2 | Dados referentes a energia acumulada para cada intensidade de DP. . .                     | 78  |
| 4.3 | Dados referentes a variação da energia acumulada com a distância. . . .                   | 78  |
| 4.4 | Frequência e potência das portadoras usadas na simulação. . . . .                         | 88  |
| 5.1 | Tabela com os dados principais para o dimensionamento das antenas<br>projetadas. . . . .  | 100 |
| 5.2 | Tabela de comparação de energias para diferentes taxas de amostragem.                     | 105 |
| 5.3 | Expoente de perdas no caminho para diferentes ambientes. . . . .                          | 110 |
| 6.1 | Dados da energia acumulada para os experimentos de estimação de lo-<br>calização. . . . . | 125 |
| 6.2 | Coefficientes de correlação para os pulsos obtidos na UoS. . . . .                        | 131 |
| 6.3 | Coefficientes de correlação para os pulsos obtidos na UoH. . . . .                        | 131 |

# Lista de Abreviaturas

|      |                                    |        |
|------|------------------------------------|--------|
| AC   | Alternating Current                | p. 37  |
| AD   | Analog to Digital                  | p. 83  |
| ADC  | Analog to Digital Converter        | p. 102 |
| AM   | Aparelho de Medição                | p. 40  |
| AoA  | Angle of Arrival                   | p. 106 |
| APL  | Application                        | p. 107 |
| AWGN | Additive White Gaussian Noise      | p. 89  |
| CAD  | Computer Aided Design              | p. 65  |
| DA   | Dispositivo de Acoplamento         | p. 40  |
| DC   | Direct Current                     | p. 51  |
| DP   | Descarga Parcial                   | p. 16  |
| DUT  | Device Under Test                  | p. 73  |
| EIRP | Effective Isotropic Radiated Power | p. 80  |
| FSPL | Free Space Path Loss               | p. 80  |
| GIS  | Gas Insulated Substations          | p. 16  |
| GPRS | General Packet Radio Service       | p. 47  |
| GPS  | Global Positioning Systems         | p. 105 |

|      |   |        |
|------|---|--------|
| HFCT | High Frequency Current Transformer                  | p. 51  |
| HV   | High Voltage  | p. 56  |
| IEC  | International Eletrical Cimmission                  | p. 34  |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronic Engineers    | p. 107 |
| IM   | Impedância de Medição                               | p. 40  |
| ITU  | International Telecommunication Union               | p. 82  |
| LAT  | Laboratório de Alta Tensão                          | p. 87  |
| LIEC | Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle | p. 69  |
| LNA  | Low Noise Amplifier                                 | p. 84  |
| LOS  | Line Of Sight                                       | p. 57  |
| LPS  | Local Positioning Systems                           | p. 105 |
| LQI  | Link Quality Indicator                              | p. 107 |
| MAC  | Media Access Control                                | p. 107 |
| NIST | National Institute of Standardsand Technology       | p. 47  |
| NWK  | Network   | p. 107 |
| PDA  | Partial Discharge Analyser                          | p. 39  |
| PLC  | Power Line Communication                            | p. 47  |
| PTFE | Politetrafluoretileno                               | p. 53  |
| RFI  | Radio Frequency Interference                        | p. 56  |
| RSS  | Received Signal Strenght                            | p. 106 |
| RSSI | Received Signal Strenght Indicator                  | p. 107 |
| SAC  | Sistema de Análise de Controle                      | p. 47  |
| SD   | Sistema de Distribuição                             | p. 47  |

|      |   |        |
|------|---|--------|
| SGCC | State Grid Corporation of China   | p. 47  |
| SMA  | Sistema de Medição Autônomo   | p. 46  |
| SNR  | Signal to Noise Ratio   | p. 83  |
| ST   | Sistema de Transmissão  | p. 47  |
| TC   | Transformador de Corrente   | p. 51  |
| TC42 | Technical Committees 42 - High-voltage and high-current test techniques | p. 34  |
| TDOA | Time Difference Of Arrival  | p. 57  |
| TEV  | Transient Earth Voltage   | p. 52  |
| ToA  | Time of Arrival   | p. 106 |
| UFCG | Universidade Federal de Campina Grande                                  | p. 19  |
| UHF  | Ultra High Frequency  | p. 16  |
| UK   | United Kingdom  | p. 55  |
| UoH  | University of Huddersfield  | p. 19  |
| UoS  | University of Strathclyde   | p. 19  |
| UV   | Ultravioleta  | p. 48  |
| UWB  | Ultra-Wideband  | p. 106 |

# Capítulo 1

## Introdução, Motivação e Objetivos

### 1.1 Introdução

As técnicas para detecção de faltas de isolação em subestações comuns ou isoladas por gás (GIS - *Gas Insulated Substations*) [35] estão bem estabelecidas e o uso de sinais UHF (*UHF - Ultra High Frequency*) para localização e diagnóstico de faltas em transformadores já foram discutidos anteriormente [70]. A primeira subestação isolada a gás a ser equipada para monitoramento usando UHF (em 1986) foi a estação de energia nuclear de Torness na Escócia. Desde então, o monitoramento usando UHF para subestações isoladas a gás tem se tornado um meio economicamente viável e uma forma de monitoramento *online* para medição de Descarga Parcial (DP) em todo o mundo [53, 36]. Shihab e Wong [92] investigaram a assinatura de frequência de radio em defeitos de isolamento em linhas de transmissão. O resultado dessa investigação sugere que a estrutura tempo-frequência de um sinal de DP contem informações sobre a natureza desse fenômeno. Se esta informação pode ser extraída, confiavelmente e associada com um item específico da planta, e propriamente interpretada, então uma rotina para monitoramento e análise de DP representaria um passo positivo na mudança do gerenciamento de plantas de subestações elétricas. Este tipo de monitoramento oferece não apenas benefício imediato de identificação de equipamentos com severa degradação de isolamento (evitando potencialmente falhas catastróficas na planta), mas também as vantagens econômicas de reduzir a retirada prevista de equipamentos para a manutenção e a utilização confiante dos equipamentos envelhecidos sempre que tal se justifique pela integridade do isolamento e do estado operacional do equipamento.

A análise de séries temporais e interpretação de sinais de DP como uma ferramenta

de diagnóstico para gestão de instalações permite identificar os defeitos de isolamento e diagnosticar a sua gravidade (de inconsequente a falha catastrófica iminente) em tempo real. A busca exclusiva da investigação em análise de séries temporais de sinais de DP traz riscos, porém, uma vez que ainda não está claro se a ligação entre as características do sinal específico e o tipo de falha e/ou gravidade é suficientemente estável para permitir a prática, robusta e, mais importante, algoritmos de processamento de sinal de confiança a serem desenvolvidos com sucesso.

## 1.2 Motivação

A única propriedade do sinal de DP que foi indiscutivelmente demonstrada ser um preditor útil de degradação do isolamento é a energia de descarga total (em outras palavras a intensidade de DP) [32]. As características básicas relevantes à atividade de Descarga Parcial podem ser resumidas da seguinte forma:

1. a natureza da Descarga Parcial possui baixa intensidade quando em condições normais de operação de um equipamento;
2. os pulsos gerados são de curta duração (da ordem de  $ns$ ,  $\leq 100ns$ );
3. se distribuem nos gradientes de subida do sinal de tensão, ou seja, tem maior incidência no primeiro e terceiro quadrantes da onda;
4. os pulsos de DP são de posicionamento aleatório dentro desses quadrantes;
5. sua amplitude varia de acordo com o tipo de pulso gerado (descargas parciais internas possuem pulsos de amplitude relacionada ao tamanho da falha interna do dielétrico);
6. possuem polaridade, o que funciona como indicativo da localização da descarga em relação aos eletrodos;
7. a localização com sucesso de fontes de DP é ainda, nem rotineira nem totalmente confiável;
8. as características de um sinal de DP com habilidade provada em predizer falhas catastróficas em isolamento são a intensidade da DP e a repetibilidade dessas dentro do ciclo de tensão aplicada;

9. o diagnóstico em series de tempo para DP, baseado em análise da estrutura do sinal, não garante resultados de benefício prático a curto prazo [32].

Diante dos fatos apresentados, entende-se que, o processo de coleta de dados por meio de um sistema radiométrico é uma alternativa aos já utilizados métodos cabeados, dado que o processo de coleta ainda é custosa em termos de tempo envolvido na preparação dos equipamentos, dos gastos associados a instalação, da susceptibilidade a falhas de montagem, e além de tudo, envolve riscos durante a operação dos equipamentos, desde que estes funcionam submetidos a alta tensão. Além disso, entende-se que o processo de localização de uma fonte de descargas parciais ainda necessita de soluções simples, de baixo custo, quando comparado com o item da planta monitorado, e com um nível de exatidão que torne o sistema confiável.

### 1.3 Objetivo Geral

Diante dos fatos apresentados, têm-se como objetivos:

1. a prova do princípio de funcionamento de um sistema não sincronizado de radiômetros para detecção de descargas parciais, como solução distribuída externa e sem contato aos equipamentos monitorados;
2. o uso de uma solução alternativa àquela encontrada na literatura, baseada em energia do sinal, ao invés da diferença do tempo de chegada, como forma de estimação de distância entre fonte e receptor, informação necessária para rotinas de localização baseadas em técnicas de multilateração.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

Para teste de uma rede não sincronizada de detecção de descargas parciais é necessário uma fonte geradora que garanta uma uniformidade na intensidade das DP, característica essa que difere das condições normais de ocorrência do fenômeno. Além disso, o processo de estimação de localização baseada em diferença do tempo de chegada exige uma taxa de amostragem compatível com a banda de frequência monitorada (considerando um sistema de monitoramento radiométrico com sensores de UHF, temos que a taxa de

amostragem mínima é de pelo menos 6 GS/s). Diante do exposto tem-se como objetivos específicos:

1. a construção e/ou identificação de uma célula geradora de DP reais com a menor variação do padrão de intensidade ao longo do tempo dos experimentos realizados;
2. desenvolvimento de uma solução alternativa para aquisição de dados com uma taxa de amostragem compatível com sistemas microcontrolados (taxa  $\leq 100$ Ms/s).

## 1.4 Estrutura da Tese

O presente trabalho é dividido em 7 capítulos. Neste, introduz-se o problema e a motivação para se provar o princípio de um sistema de detecção de descargas parciais utilizando-se um método radiométrico.

No segundo capítulo faz-se uma revisão da literatura no contexto da detecção radiométrica de descargas parciais, além do potencial diagnóstico associado à medição dessas descargas.

Seguindo-se, no capítulo 3 aborda-se a teoria relacionada às descargas parciais (DP), tais como, tipos, principais características e formas de detecção desse fenômeno, com ênfase no método radiométrico, foco desse trabalho.

No capítulo 4 são apresentados os aspectos para a implementação de um sistema radiométrico para detecção de descargas parciais, incluindo desde modelos de simulação, até fontes reais de geração de pulsos, usados no processo de simulação dessas descargas. Nesse capítulo é apresentado um processo experimental para obtenção de pulsos e seus resultados, além de uma simulação do sistema proposto para prova do princípio de detecção radiométrica.

No capítulo 5, são apresentadas as características do protótipo do sistema proposto, incluindo as ferramentas de *hardware* e *software* usadas. Um método de estimação de localização baseado na proposta de uma razão de potências dos pulsos de DP como alternativa para estimação de distância é apresentado.

No sexto capítulo, são apresentados os resultados obtidos com ênfase em dois estudos de caso, para dois cenários distintos, a partir da cooperação entre universidades do Brasil (UFMG - Universidade Federal de Campina Grande), da Escócia (*UoS - University of Strathclyde*) e da Inglaterra (*UoH - University of Huddersfield*), tais estudos de caso apresentam o uso do sistema de estimação de localização de um equipamento com pro-

blemas relacionados a DP em diferentes cenários, com complexidades que influenciam consideravelmente na sua exatidão.

No capítulo 7, último desse trabalho, são apresentadas as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Revisão de Literatura

A detecção radiométrica de descargas parciais tem uma longa história e se baseia no simples fato de que cargas elétricas quando se movem com ou sem velocidade constante produzem uma radiação eletromagnética e este sinal se espalha a partir da posição da carga em todas as direções. Há 30 anos, métodos de UHF para detectar descargas parciais foram os pioneiros em subestações isoladas a gás (GIS).

Em 1988, B.F. Hampton e R.J. Meats publicaram o artigo “*Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations*” [36] no qual uma série de experimentos foi realizada para que se pudesse entender o comportamento de descargas parciais dentro de câmaras em GIS. O experimento deles foi conduzido baseado no fato de que “Tipicamente frequências a partir de 600 MHz à 900 MHz são varridas sabendo que os sinais de DP ocorrem dentro dessa faixa. Uma resolução de 1 MHz na varredura dessa faixa, garante que todos os picos ressonantes sejam detectados, e a faixa de 600 MHz à 900 MHz é monitorada a cada 20 minutos”.

Três anos após, 1991, D. C. U. Yuen e S. H. Chan publicaram o artigo “*UHF Partial Discharge Monitoring of 400 kV GIS at Castle Peak Substation*” [107], e assumiram que outra banda de frequência pode ser importante no processo de monitoramento “Se uma descarga parcial está presente então tensões com frequências na faixa de 300 MHz à 1500 MHz serão geradas nos acopladores de UHF e, por amplificação de sinal adequada, podem ser observadas num analisador de espectro.” O espectro observado por eles, claramente indica a assinatura de descargas parciais e a largura de banda de sinais na faixa de 300 MHz à 1500 MHz embora a maior concentração de energia permanecem abaixo dos 750 MHz. Uma conclusão similar foi obtida por J. S. Pearson, B. F. Hampton e A. G. Sellars em seu artigo “*A continuous UHF monitor for gas-*

*insulated substations*” [75] no mesmo ano. De acordo com a pesquisa deles “Na maioria dos casos o espectro das descargas parciais é encontrada entre 500 MHz à 1300 MHz, e frequentemente picos entre 700 MHz à 1100 MHz”.

Em 1994, um grupo de pesquisadores de Nagoya, Japão, considerou que a diferença entre espectros de frequência pode ser devido a características do material isolante [44]. O experimento deles foi realizado usando uma antena para uma banda de frequência mais baixa do que a banda mencionada nos artigos anteriores: “Para a análise espectral, uma antena bicônica atuando em uma frequência entre 30 MHz à 300 MHz foi utilizada verticalmente ao solo com a polarização da onda eletromagnética considerada”.

Em 1996, M. Judd propôs um modelo para sinais de UHF por excitação de descargas parciais [50] no qual assumisse que “A componente eletrônica deste pulso pode conter energia espectral significativa para frequências superiores a 1,5 GHz e a perturbação eletromagnética resultante propaga dentro da rede de guias de onda coaxiais formados pelas GIS”.

Dois anos após, em 1998, o mesmo grupo de Nagoya, Japão, estendeu seu trabalho e publicou o artigo intitulado “*Electromagnetic noise spectrum cause by partial discharge in air at high voltage substations*” [43] mas agora foi apresentada uma banda de frequência que, de acordo com seus estudos, concentra a maior parte da energia: “O ganho do espectro eletromagnético tão grande quanto 20 dB aparece apenas na faixa de frequência de 50 MHz à 70 MHz.” Ainda no mesmo ano, R. Kurrer e K. Feser [32], considerando o caminho de propagação ao qual o sinal é submetido: “Para o monitoramento *on-line* de GIS, o método UHF de banda larga (entre 500 MHz à 2 GHz) pode ser aplicado, mas a sensibilidade relatada será reduzida pelo amortecimento das ondas eletromagnéticas que viajam na GIS. As ondas, que se propagam em GIS são atenuadas por causa da dissipação de energia na estrutura metálica. As investigações teóricas resultam em um coeficiente de atenuação muito baixo, de cerca de 2 dB/km. Por outro lado, valores em torno de 1-2 dB/m são relatados para GIS com espaçadores.” Outro trabalho, “*UHF Partial discharge monitoring and expert system diagnosis*” [32], foi descrito por T. Huecker e J. Gorablenkow, no qual uma comparação é feita entre o sinal originado por descargas parciais e o ruído de fundo: “Sua energia é muito pequena. No entanto, devido ao seu tempo de subida rápida em  $SF_6$  ( $SF_6$  - hexafluoreto de enxofre), eles emitem um sinal com espectro numa banda de frequência muito amplo, estendendo-se de DC para a faixa de GHz. Abaixo de uma frequência de corte de  $f_c = 400$  MHz, a propagação do sinal de DP é geralmente por onda guiada pelos condutores (modo TEM), e o amortecimento do sinal é relativamente baixo. Portanto sinais com a

sua origem fora da GIS interferem seriamente com a medição. Além disso, as linhas de transmissão conectadas atuam como antenas para sinais de interferência, tais como o ruído de rádio frequência.” M. Doi, H. Muto, H. Fujii e M. Kamei [20] enfatizaram que a maior parte da energia é concentrada abaixo de 300 MHz e isto é definido devido às características de propagação: “Há uma diferença óbvia entre os espectros de frequência para o condutor interno e para a parede interior do transformador. Para o primeiro caso, os componentes do espectro de frequências abaixo dos 300 MHz são claramente observados. Por outro lado, para o último caso, que é dificilmente observado. Este resultado pode permitir distinguir a posição da fonte de descarga ao longo da direção radial (o lado do condutor interno ou o lado do tanque), observando a intensidade da potência do ruído no espectro de frequências abaixo de 300 MHz”.

Em 1999, M. Judd apresentou seus conceitos iniciais de um sistema de monitoramento baseado em acopladores UHF em seu artigo “*Transformer Monitoring Using The UHF Technique*” [51] suas conclusões envolvem um comportamento particular de descargas parciais em líquidos: “Um experimento simples demonstrou que as descargas em óleo são capazes de irradiar sinais com energia significativa em frequências de até pelo menos 1,5 GHz. No entanto, descargas elétricas em líquidos são fenômenos complexos e este achado pode depender se a descarga é de intensidade suficiente para evaporar o óleo”. Ainda em 1999, A. J. M. Pernen, W. R. Rutgers, T. J. M. van Rijn. e Y. H. Fu usaram um detector de descarga parcial de baixa largura de banda sintonizado em diferentes bandas de frequência e desenvolveram um estudo sobre quais bandas de frequência possuem a maior parte da energia concentrada.

No trabalho “*On-line partial discharge monitoring of HV components*” [77] eles concluíram que melhores resultados podem ser encontrados na banda de frequência entre 10 MHz à 30 MHz: “O detector, com uma largura de banda de 300 kHz, é sintonizado para uma frequência onde DP são fortes e a interferência de fundo é baixa. Por experiência adquirida os melhores resultados são obtidos com a sintonização da frequência entre 10 MHz à 30 MHz. O sinal de fundo é normalmente de frequência alta até 200 MHz e, por vezes, como neste caso, de até 500 MHz. No entanto acima de 500 MHz, há sempre uma banda na qual o sinal de fundo está abaixo do nível de ruído do detector de DP. O espectro de frequência de DP em óleo e  $SF_6$ , chega a frequências acima de 1 GHz. Enquanto as descargas corona de fundo em linhas de alta tensão têm componentes de frequência muito mais baixos (até 200 MHz)”.

Em 2000, M. Judd enfatizou o uso de um pré-amplificador para monitorar a atividade de descargas parciais em seu trabalho “*Power Transformer Monitoring Using*

*UHF Sensors: Installation and Testing* [49]: “Quando um pré-amplificador é usado, mais sinais de comunicação se tornam aparentes. Embora estes possam obscurecer os sinais de descarga muito pequenos que ocorrem somente em frequências específicas, há regiões de baixa atividade na banda UHF, especialmente acima de 1000 MHz”.

Uma banda de frequência similar foi explorada em 2002 por K. Raja, F. Devaux, e S. Lelaidier em seus trabalhos [83] e [56] como é possível de se observar em “No presente estudo, a largura de banda de detecção foi de 200 MHz à 1500 MHz e o tempo de varredura de 3 s” e “A principal vantagem de detecção de DP com UHF e a mínima interferência de ruído especialmente devido às altas frequências aplicadas para detectar descargas, tipicamente entre 200 MHz à 2000 MHz”, respectivamente.

I. Português, P. J. Moore e I. A. Glover, em 2003, desenvolveram o trabalho “*Frequency domain characterisation of partial discharges via a non-invasive measurement system*” [79], considerando uma abordagem similar ao do grupo japonês e 1994, baseado na diferença do espectro de frequência de acordo com o tipo de material isolante, neste caso ar e óleo: “Como esperado para o caso do ar, toda a energia está concentrada abaixo de 100 MHz”.

Para Raja Kuppuswamy, uma extensão de seu trabalho em 2002 [55] no qual o espectro de frequência usado por Português, Moore e Glover foi levemente aumentado para 600 MHz e uma comparação entre descarga parcial em pC e dB foi realizada: “A frequência de ocorrência de DP em UHF foi espalhada (em sua maioria abaixo de 600 MHz) e a magnitude era altamente instável, talvez refletindo a natureza do defeito. A magnitude do pico de DP para métodos clássicos variou de 15 pC a várias centenas de pC. Padrões de DP obtidos em UHF durante os testes de DP em transformador seguem a tendência clássica de amplitude de assinaturas de DP, geralmente sinais de DP em UHF são ausentes ou fracos em frequências superiores a 0,9 GHz.” Ainda em 2003, I. Português P. J. Moore e I. A. Glover publicaram outro trabalho baseado na influência do multipercurso para localização de fontes de DP [80], antenas foram usadas externamente ao equipamento monitorado, introduzindo uma abordagem baseada numa rede de sensores sem fio para detectar DP. Para obter um pulso eletromagnético de DP um sistema de aquisição de dados mais robusto é necessário: “As antenas foram conectadas a um osciloscópio de 1 GHz de largura de banda capaz de amostrar sinais a 2,5 GS/s nos 4 canais”.

Em 2005, P. J. Moore, I. Português e I. A. Glover continuaram seu trabalho de detecção de DP pelo método radiométrico [69], onde é possível observar os princípios de um sistema de localização baseado em diferença do tempo de chegada de ondas

eletromagnéticas geradas pela atividade de DP: “Devido à natureza estocástica da DP, é difícil de modelar a forma exata da forma de onda de corrente inicial. Assumindo que esta é exponencial, no entanto, o espectro resultante pode ser observado na Figura 2.1. O efeito dos dielétricos mais fortes e mais fracos pode ser observado nesta figura, com o dielétrico mais forte a ser melhor representado em frequências mais altas, esta conclusão é apoiada por evidência experimental, observa-se que a maior parte da energia irradiada por uma DP ocorre abaixo de 1 GHz”.

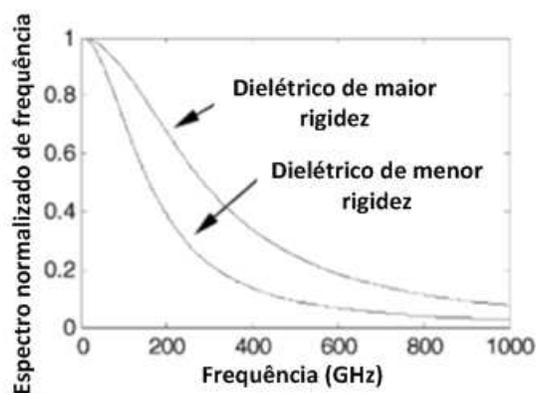


Figura 2.1: Exemplo de curvas do espectro de frequência para diferentes dielétricos.

Um método UHF de banda estreita foi proposto por Yanzhou Sun, Hua Yin, Qi-aogen Zhang, Fashan Yu, Hui Wang e Yuchang Qiu em seu artigo “*Partial Discharge Detection for GIS Using Narrow Band Ultra-High-Frequency (UHF) Method*” [98], onde é enfatizado a necessidade de um pré amplificador para obter sinais de DP de níveis baixos e as características dos tipos de medição em UHF: “Dois tipos diferentes de medição de DP podem ser denominados medições UHF. Existem os chamados de banda larga e as técnicas de banda estreita. No método de banda larga, o sinal de DP é detectado no domínio do tempo, sobre uma ampla gama de frequências, tipicamente 300 MHz à 1500 MHz. No método de banda estreita, a largura de banda de medição típica é apenas alguns MHz. O espectro de UHF foi medido na faixa de frequência de 9 kHz à 1,8 GHz, utilizando um analisador de espectro comercial chamado Tektronix 2712 e um pré-amplificador UHF de 20 dB”.

M. Judd na primeira parte de seu trabalho “*Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation*” [53] foca na característica do sensor de UHF usado na interpretação do sinal: “O pulso de escala nano, em tempo, possui energia espectral muito maior na escala de UHF (300 MHz à

3000 MHz). Sensores UHF devem ter uma resposta de banda larga, porque o conteúdo de frequência do sinal de DP pode variar consideravelmente dependendo da sua localização e do caminho percorrido pelo sinal. Até agora, os requerimentos de sensores para especificações em GIS tem sido usados com sucesso em transformadores. Isso estipula ambos, uma média e uma mínima sensibilidade sobre uma escala de 500 MHz à 1500 MHz”.

M. Judd também trabalhou com o conceito de detecção radiométrica [47] em 2007, embora sua abordagem seja bastante similar à tomada por P. J. Moore, I. Português e I. A. Glover em 2005 [69]. Seu artigo resume o porquê de sistemas de detecção radiométricos são tão importantes: "O tempo de subida de alguns pulsos de DP foram medidos como sendo inferior a 50 ps, o que aponta para uma largura de banda de sinal na faixa de 8 GHz. Medições para três tipos diferentes de DP mostraram um sinal irradiado com conteúdo espectral significativo acima do limite superior de 3 GHz da banda UHF. Uma vez que a sensibilidade de detecção para a DP é uma questão de relação sinal-ruído, em vez de amplitude de sinal, é possível que numa aplicação especial a utilização de frequências mais elevadas tem vantagens práticas. Uma destas é o fato de que as frequências mais elevadas podem penetrar mais facilmente por meio de aberturas no revestimento metálico. Além disso, as dimensões dos sensores podem ser reduzidas, se estes operam a frequências mais elevadas”.

Um novo conceito de antena a ser utilizado como elemento sensor foi proposto por Tang Ju, Xu Zhongrong, Zhang Xiaoxing, Sun Caixin em seu artigo "*GIS partial discharge quantitative measurements using UHF microstrip antenna sensors*" [46], mas ao contrário da maioria das antenas para banda UHF este novo projeto está focado em uma banda de frequência curta: "Os componentes de frequência do sinal UHF de descarga parcial estão focados numa faixa de 200 MHz à 300 MHz, que podem pertencer a descargas corona de baixa intensidade em GIS”.

Em 2008, Qingguo Chen e equipe fizeram experimentos em ar e em óleo e descobriram que os sinais têm maior intensidade em óleo. Os autores também indicaram em seu artigo, "*Development of an UHF detection system for partial discharge measurement in transformer insulation*" [86], que a banda de frequência é de até 2 GHz: "Descargas corona operam em duas faixas de frequência, uma variedade está na faixa de 150 MHz à 350 MHz e a outra em torno de 900 MHz. Da mesma forma, as descargas de superfície mostram dois picos de frequência em torno de 240 MHz e 895 MHz. Descargas em óleo mostram uma faixa de frequência dominante de 200 MHz à 300 MHz, e com muito baixa magnitude na faixa de 300 MHz à 700 MHz. No entanto, as magnitudes de diferentes

frequências são muito elevados. Descargas internas indicam um amplo espectro de 120 MHz à 900 MHz, com ocasionalmente picos em torno de 1622 MHz. Descargas de partículas flutuantes mostram uma grande espectro desde 600 MHz à 1600 MHz. Em geral, observa-se que os sinais mais fortes no domínio do tempo possuem uma ampla faixa de frequência com magnitudes significativamente mais elevadas".

Sa Xiao, Philip J. Moore, Martin D. Judd e Iliana Português [103] publicaram em 2009 um trabalho onde focam na modelagem do pulso que representa a corrente gerada pela atividade PD, estes pulsos são comparados a impulsos reais em diferentes tipos de isolamento: "Isto permite uma classificação conveniente de dielétricos: em conformidade com os resultados de modelagem, se as hipóteses de parâmetros de pulso de corrente estão corretas, seria de esperar que, no âmbito da medição de frequência experimental faixa de 0 à 1 GHz, os espectros de dielétricos  $SF_6$  se espalhem em toda a faixa de medição, enquanto que outros dielétricos como o ar, mostram um espectro de frequência nitidamente reduzido".

A Tese de Doutorado "*Partial discharge in power distribution electrical systems – pulse propagation models and detection optimization*" [99] apresentada em 2010 por Marco Tozzi na universidade de Bolonha é um bom exemplo da união entre os métodos cabeados e radiométricos para detectar DP. Nesta tese cita-se a norma IEC que define como um detector DP precisa trabalhar: "IEC 60270 fornece indicações sobre a escolha de detectores de grande e estreita largura de banda que devem ser usados para realizar medições DP. Dentro dessas larguras de banda, separação e localização de fontes de DP não podem ser alcançados em geral, porque a maior parte do espectro de frequência dos impulsos de DP é filtrado. Outra classe de detectores, chamado UWB (UWB - *Ultra-Wide Bandwidth*), pode ser preferido para capturar mais informações sobre pulsos DP, captando também o seu conteúdo de alta frequência. Estes detectores podem ter a menor frequência de corte na mesma região dos em conformidade com a norma IEC (ou seja, 100 kHz) e a frequência superior numa região de frequência mais alta (por exemplo, entre 50 MHz à 100 MHz).

Assim, se o comprimento do cabo e a distância entre cada acessório são conhecidos, juntamente com a atenuação característica do cabo, o nível e o conteúdo de ruído de frequência, é possível destacar a faixa de frequência em que sinal-ruído (SNR) é o mais alto e, portanto, para realizar a detecção ótima". Ainda em 2010, Kamendren Govender, Luwendran Moodley e Alan Nesbitt, da *Doble Engineering* produziram um relatório, "*Partial discharge detection using RFI measurements*" [33] para o PDS100, o qual é um detector de DP com base em medições de RF. "Pesquisa e medidas práticas

foram realizadas em atividade DP em equipamentos de alta tensão isolados a óleo demonstrando que as descargas produzem pulsos de corrente com tempos de subida inferior a  $1\text{ ns}$  e, portanto, capazes de emitir sinais de banda larga na faixa de VHF (30 MHz à 300 MHz) e UHF (300 MHz à 3 GHz). Outras investigações em subestações de isolamento ao ar livre mostram que os sinais de DP ocupam bandas que podem variar em frequências de até 300 MHz. O instrumento utilizado (Doble PDS 100), tem dois modos de operação: modo de detecção por análise de espectro e modo por series de tempo. Dentro do modo como analisador de espectro, há três técnicas de detecção separadas: detecção de pico, a detecção de média e separadamente detecção de pico e média. No modo de analisador de espectro ou frequência uma varredura das frequências é realizada detectando sinais de RFI, de modo a se observar atividade de DP. A faixa de interesse está entre 50 MHz à 1000 MHz. É conhecido que a atividade de DP está nesta faixa de frequência".

## 2.1 Detecção Radiométrica de Descarga Parcial

O termo "detecção radiométrica de descarga parcial" é relativamente novo em comparação com a detecção de descargas parciais clássica. A maioria desses métodos baseados em antenas são datados do fim da década de 80, apesar de, em 1968, E.M. Dembinsk et. al [18], ter descrito um método de calibração e comparação para ambas as medições, clássicas e radiométricas. De acordo com a sua pesquisa "Medições comparativas mostraram que o medidor de interferências radioelétricas convencional é de cerca de uma ordem de magnitude menos sensível do que um detector de descarga de circuito sintonizado. Métodos para melhorar a sensibilidade do primeiro são descritos". Ainda de acordo com Dembinsk, a viabilidade, de um sistema de detecção radiométrico de DP é de confiança, uma vez que, "Um circuito de medição de rádio - interferência convencional pode detectar descargas de 1 pC. Mas descargas menores abaixo de, pelo menos 0,2 pC podem ser medidas, ajustando o valor da impedância de detecção de modo que a sensibilidade do circuito se aproxime de um detector de descarga de circuito sintonizado". O seu trabalho é um exemplo de detecção radiométrica de DP antes dos anos 90 quando esta abordagem tornou-se mais utilizado e pesquisada.

Em 1991, Yuen e Chan [107], publicaram suas pesquisas sobre o uso de acopladores UHF para detectar DP em uma subestação real. A importância deste trabalho está relacionado com o período relacionado a pesquisa de DP: "Duas pesquisas de descarga

parcial usando acopladores UHF externos foram concluídos na subestação de 400 kV em *Castle Peak*. Os resultados de ambas as pesquisas têm demonstrado um alto grau de correlação e indicam que não houve mudança significativa na atividade de descarga parcial durante o período de seis meses". Este é apenas um exemplo, no entanto, como é possível observar pela citação, o monitoramento DP não está baseado em um sistema *on-line*, ele é realizado em períodos regulares de tempo espaçados por semanas ou mesmo meses.

Também em 1991, Pearson, Hampton e Sellars [75], da Universidade de *Strathclyde*, propuseram um sistema contínuo para detectar DP, baseado no monitoramento UHF. De acordo com eles: "Avaliando a condição de uma GIS medindo os sinais de UHF nela gerados pelas descargas parciais proporcionam um aviso do desenvolvimento de defeitos, e permite que avarias sejam evitadas, tanto durante os testes de comissionamento quanto em serviço. Essa informação também pode ser interpretada por um sistema especialista e uma análise da situação através de um *link* de dados enviado via modem a um PC no escritório do engenheiro, para que ele possa continuamente supervisionar uma série de subestações remotas". Esta característica é importante quando a abordagem de redes inteligentes é considerada para a rede de energia.

Kurrer e Feser [32], em 1998, usando como referência Pearson e Hampton [75, 36], desenvolveram seu trabalho. Eles apontam a influência do ruído de fundo nas medições de DP e explicam o sistema mais simples de monitorar DP através de espectros de frequência: "As ondas eletromagnéticas, causadas por DP são captadas por um sensor dentro da GIS. Um analisador de espectro é utilizado para medir o conteúdo do sinal captado em frequência. Antes da implementação do sistema uma medição do espectro do ruído de fundo é realizada e armazenada como um espectro de referência".

Uma característica comum à maioria dos sistemas de monitoramento de DP é o fato de que monitora-se um equipamento em particular, um exemplo dessa característica pode ser visto em [51], publicado em 1999. Neste trabalho M. Judd, da Universidade de *Strathclyde*, mostra um acoplador UHF para monitoramento de um transformador de potência. Este é apenas um dos vários artigos publicados por Judd, e aponta para a principal vantagem para implementação um sistema *on-line*: "Ao usar um monitor de UHF para registrar continuamente dados, esperamos estabelecer se quaisquer descargas são evidentes antes da falha do transformador".

Em 2000, Judd continuou seu trabalho com base no monitoramento de DP com UHF [49], a relevância deste trabalho está relacionada com a abordagem baseada em múltiplos sensores para detecção de DP em apenas um equipamento. Este é o início de

um sistema de monitoramento de DP baseada em rede: "Acopladores UHF externos foram instalados em um autotransformador de 1000 MVA como parte de um projeto destinado a desenvolver novas técnicas de monitoramento do transformador. Os acopladores forneceram dados brutos valiosos de um transformador operando sob condições normais de serviço".

Ainda em 2000, Schichler, Gorablenkow e Diessner [90], publicaram outro trabalho baseado em um sistema de acompanhamento de DP no local, em que uma das diferenças entre os métodos cabeados e os métodos radiométricos para detecção de DP são consideradas: "A detecção UHF de DP não fornece uma correlação direta com os valores padronizados em pC de acordo com a norma IEC 60270 CIGRE, portanto, desenvolveu um procedimento de verificação de que é possível detectar partículas saltando com 5 pC em subestações GIS".

Um estudo mais detalhado sobre as características de tempo de sinais de DP foi feito em 2003 por Ian Glover e equipe [80]. Neste estudo, o efeito do multipercurso na transmissão de pulsos é considerado. Este efeito mostra que uma abordagem baseada no pico do sinal gravado pode não ser o melhor para a estimativa da intensidade de DP: "A detecção de ondas de DP através de medições radiométricas é um método conveniente, não-invasivo de monitoramento de condição de plantas *on-line*. No entanto, devido às medidas que estão sendo feitas em uma mídia de transmissão, compartilhada com outras transmissões intencionais e não intencionais, as formas de onda de DP são inevitavelmente distorcidas. Por estas razões, postula-se que a caracterização em domínio do tempo de formas de onda de radiação DP não será tão bem-sucedida quanto a formas de onda medidas por meios eletricamente convencionais". Demonstra também a capacidade inerente do sistema radiométrico, que é a capacidade de localização da fonte de DP, que pode basear-se na diferença de tempo ou a energia do sinal.

Em 2005, outra característica dos sistemas de detecção de DP baseados em métodos radiométricos foi apontada por Yanzhou Sun em seu trabalho [98], a diferença entre as técnicas de banda larga e estreita para detectar DP. Ele também usou como referência os artigos publicados pela equipe da Universidade de *Strathclyde*.

Uma investigação sobre a avaliação da integridade de isolamento usando medição de descarga parcial radiométrica foi feita em 2009 por M. Judd [102]. Neste trabalho foram utilizadas diferentes fontes de DP para observar os aspectos de defeitos de isolamento diferentes sobre a atividade de DP. Uma análise com base no tempo, frequência e dados estatísticos, foi realizada para concluir que: "Semelhanças na frequência de ressonância são em particular para componentes de maior frequência, independentemente do tipo

de isolamento gasoso, líquido ou sólido".

O termo RSSF (RSSF - Rede de Sensores Sem Fio) para monitoramento de DP foi inicialmente apresentado em 2009 por um grupo da Universidade de *Glasgow* liderado por B. G. Stewart em associação com parceiros da Universidade de Roma e da *Caledonian College of Engineering*, em Omã [34]. Uma simulação baseada em nós, para monitoramento de um transformador de potência, foi desenvolvida para avaliar a confiabilidade do pacote de dados de DP medido e transmitido através de uma rede *ZigBee*. A simulação leva em consideração a taxa de dados de DP, considerando a resolução analógica para digital usada para amostrar o sinal de DP. Esta foi uma das primeiras tentativas de se usar uma RSSF distribuída para monitoramento de DP.

Outra tentativa, com base na localização da fonte de DP foi feita por Xin He em 2011 [41]. Em seu trabalho uma RSSF real foi desenvolvida para detectar DP em um transformador de potência utilizando medições ultrassônicas. Apesar dos resultados obtidos por [96], o trabalho desenvolvido por Xin He usou um protocolo mais simples diferente do *ZigBee* para transmitir os dados através da rede.

Uma RSSF para detectar DP como proposto por Xin He usa a abordagem baseada no monitoramento de um único equipamento. Esta abordagem difere da proposta nesta tese. Difere como todos os outros pesquisados nessa revisão em dois pontos básicos: a sincronização dos nós da rede, visto que a rotina de localização utilizada é baseada em diferença do tempo de chegada; e mais importante, difere em relação à área de cobertura do sistema, que no caso do sistema proposto, visa seu uso no monitoramento de toda uma subestação.

## 2.2 Potencial de Diagnóstico

Nos últimos anos, a atenção passou de uma abordagem de manutenção corretiva para uma abordagem de manutenção preditiva. Essa abordagem nos permite identificar, por meio de medições repetidas ao longo do tempo, as condições das máquinas, antecipando uma eventual avaria, reduzindo assim o risco de desligamentos de plantas. Entender porque e quando uma disfunção está prestes a ocorrer, permite planejar uma intervenção programada com inconveniência mínima para o cliente [8].

Tomando como exemplo um transformador de potência com uma vida útil de cerca de 20 - 35 anos (aumentando para 50 anos na prática, com a manutenção adequada), transformadores de potência grandes em tensões de transmissão são amplamente considerados como itens confiáveis de energia elétrica. O papel crucial realizado por trans-

formadores na manutenção de uma entrega segura e contínua de energia elétrica para os consumidores exige a sua operação segura e confiável. Embora significativamente mais confiável em comparação com muitos outros componentes de rede, é o impacto potencial de uma avaria do transformador que impulsiona a necessidade de monitoramento de condição efetiva desses ativos de rede comercialmente e tecnicamente valiosos. Falhas de transformadores podem resultar em perda de suprimentos para grandes populações de clientes, enquanto a ameaça de explosões e incêndios, causando danos irreparáveis à fábrica adjacente e ferimentos ao pessoal representam um risco à segurança e ao meio ambiente, com implicações legais e regulamentares potencialmente graves.

Portanto, enquanto os transformadores podem ter uma reputação geralmente de confiança no funcionamento da rede, o bem-estar desses ativos críticos de rede se mantém na vanguarda das responsabilidades e obrigações de gestão de ativos das concessionárias. Tecnologias de monitoramento de condição armazenam os dados de plantas operacionais para caracterizar seus "sinais vitais", permitindo uma posterior avaliação *on/off-line* da condição de planta e seu desempenho. Inúmeras tecnologias *on-line* e *off-line* de monitoramento de condições operacionais estão disponíveis para a detecção de falhas incipientes em transformadores de energia elétrica [96]. No sistema de isolamento de uma máquina elétrica de média tensão um certo nível de descargas parciais é inevitável. É impossível produzir uma máquina elétrica que não gera descargas parciais. Alguns fenômenos, no entanto, podem ser sintomáticos de defeitos de fabricação e, durante o ciclo de vida da máquina, podem provocar fenômenos novos como um resultado da deterioração do sistema de isolamento. O risco depende do tipo e posição das descargas parciais na máquina elétrica em que ocorrem, em conjunto com a natureza dos materiais isolantes utilizados [8]. Atividade de Descarga Parcial é um sintoma proeminente do envelhecimento e degradação de serviços de isolamento de transformadores [96].

Análise de Descargas Parciais (PDA - *Partial Discharge Analyser*) é uma abordagem de diagnóstico pró-ativa que utiliza medições de descargas parciais para avaliar a integridade do equipamento. Um teste PDA durante a operação da máquina é útil para identificar fenômenos potencialmente catastróficas de deterioração [8].

## 2.3 Conclusões

Muitas são as contribuições dos trabalhos observados na literatura, técnicas de detecção de descargas parciais foram desenvolvidas e utilizadas extensivamente. O espectro de

frequência no qual pode-se observar a influência da atividade de DP foi abordado por vários autores e pode variar numa faixa que estende-se até GHz. Tal espectro, mesmo considerando um experimento em particular (mesma falha, condições aplicadas, nível de tensão, etc), varia de acordo com o método de detecção usado, sendo estes métodos cabeados, ou que requerem contato com o equipamento e métodos radiométricos. Ambos possuem vantagens e desvantagens.

No caso dos métodos radiométricos, as abordagens usadas para localização ainda se restringem à técnica de diferença do tempo de chegada da onda eletromagnética num arranjo de antenas. Essa técnica já provou sua eficiência na localização de fontes de DP, entretanto seu uso depende de sistemas de aquisição de dados com uma alta taxa de amostragem, necessária para obtenção dos pulsos, advindos das antenas do arranjo. Além dessa restrição associada ao sistema de aquisição de dados, a implementação de um sistema sem fio, ainda é uma abordagem de aplicação reduzida, dada a complexidade associada aos nós sensores, que devem responder aos requisitos de alta taxa de amostragem e o uso de um sistema de sincronização da rede. Como observado pelo trabalho de Xin He [41], essa restrição não inviabiliza o uso de tal sistema, porém aumenta em termos de complexidade e conseqüentemente custos.

A abordagem descrita nesta tese se diferencia em relação às demais no contexto associado à rotina de localização com uso de um sistema não sincronizado e baseado apenas na energia do sinal monitorado. Além da visão de um sistema de monitoramento completo de uma subestação, abordagem essa não explorada na literatura por meio de um sistema distribuído.

# Capítulo 3

## Teoria sobre DP e Sistemas Radiométricos

### 3.1 Definição de Descargas Parciais

Na norma IEC60270 [40] define-se descargas parciais como sendo: “**descargas elétricas que rompem parcialmente a isolação entre condutores as quais podem ocorrer ou não próximo a eles**”.

**Nota 1:** descargas parciais são em geral consequência de uma concentração de estresse local no isolamento ou na superfície de isolação. Geralmente, tais descargas aparecem na forma de pulsos com duração muito menor que  $1 \mu s$ . Mais formas contínuas podem, entretanto, ocorrer, tais como a também chamada descarga sem pulso em dielétricos gasosos.

**Nota 2:** “corona” é uma forma de descarga parcial que ocorre em meios gasosos em torno de condutores que estão afastados de isolamentos gasosos ou líquidos. “Corona” não deve ser usada como termo geral para todas as formas de DP.

**Nota 3:** DP são frequentemente acompanhadas de emissão de som, luz, calor, e reações químicas [40].

O conceito associado a uma descarga parcial, já foi foco de discussão em 1965, quando Feinberg, R., publicou uma retificação ao termo: "... Há uma confusão no conceito de "Descarga Parcial". A citação referida a partir de um projeto interino da recomendação IEC (IEC - *International Eletrical Commission*) sob consideração pelo TC42 (TC42 - *Technical Committees 42 - High-voltage and high-current test techniques*) descreve claramente o termo para as várias formas de condução de corrente que podem

ter lugar ao lado de condutores ou dentro das falhas dos isolantes. Em contraste, as definições propostas de parâmetros quantitativos de descarga parcial relacionarem o termo "Descarga Parcial" para a redução da carga elétrica armazenada causada por um ou outro dos fenômenos enumerados na recomendação IEC antes de TC42. Estamos lidando com uma situação em que alguma forma de condução de corrente é a causa, e perda de carga elétrica o efeito. É um erro fundamental empregar o mesmo termo "Descarga Parcial" para denotar tanto causa e efeito. Neste contexto, a recomendação IEC está em falta e deve ser modificado para evitar confusão" [24].

## 3.2 Tipos de Descargas Parciais

As descargas parciais podem ser classificadas de três formas de acordo com a sua origem: descargas internas, descargas superficiais e descargas corona [64]. Descargas internas ocorrem em inclusões ou cavidades dentro de um dielétrico; descargas superficiais ocorrem na superfície de dielétricos; descargas corona ocorrem em pontos de distribuição do campo elétrico não homogêneos, ou seja, em pontas ou bordas afiadas de eletrodos [108].

### 3.2.1 Descargas Internas

Descargas internas ocorrem em inclusões de baixa rigidez dielétrica, geralmente falhas preenchidas com gás, presentes em materiais dielétricos sólidos utilizados em sistemas de isolamento de alta tensão. A formação de falhas na estrutura de materiais poliméricos pode ser devida a causas distintas, dependendo da natureza do material e do processo de fabricação. No caso de materiais termoplásticos como, por exemplo, o polietileno, a falha pode ocorrer durante o processo de injeção do polímero devido à infiltração do ar atmosférico. Para polímeros termofixos, tais como as resinas epóxi, a formação dos vazios pode ocorrer durante o processo de cura do material, podendo ser devido à infiltração do ar atmosférico ou a formação de gases residuais provenientes de reações químicas. Além dos fatores relativos ao processo de fabricação, os diversos tipos de perturbações a que a isolação é submetida ao longo de sua vida também podem causar o aparecimento de falhas. Descargas internas podem ocorrer numa região do material dielétrico onde o vazio está totalmente circundado pelo dielétrico ou na interface entre o dielétrico e um dos eletrodos. Um tipo particular de descargas internas são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas. A arborescência elétrica é um fenômeno de

pré ruptura que ocorre no interior da isolação de equipamentos elétricos, tais como cabos de potência isolados, tendo sua origem devido à ocorrência contínua de descargas parciais internas em vazios ou a partir de uma falha no eletrodo, como ilustrado na Figura 3.1.

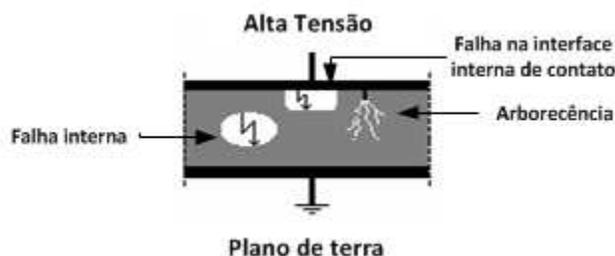


Figura 3.1: Representação de uma descarga parcial do tipo interna.

### 3.2.2 Descargas Superficiais

Descargas superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície, como pode-se observar na Figura 3.2. Quando a componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede certo valor crítico o processo de descarga superficial é iniciado. Descargas superficiais ocasionam alterações na superfície do dielétrico, iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Este fenômeno, conhecido como trilhamento, pode levar à ruptura completa da isolação [64]. Este tipo de descarga normalmente ocorre em cabos protegidos e terminações de cabos isolados, em saias de isoladores e no sistema de alívio de barras de geradores.

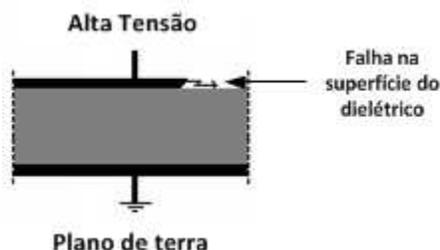


Figura 3.2: Representação de uma descarga parcial do tipo de superfície.

### 3.2.3 Corona

Descargas corona ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos. Estes pontos concentradores de estresse, ou seja, partes com pequenos raios de curvatura, formam regiões nas vizinhanças do condutor com campo elétrico elevado, o qual ultrapassa o valor de ruptura do gás que circunda a região, dando origem a ocorrência de descargas parciais, como pode-se observar na Figura 3.3. Descargas corona no ar geram ozônio, o qual pode causar o fissuramento da isolação polimérica. Óxidos de nitrogênio combinados com vapor de água podem corroer metais e formar depósitos condutores na isolação promovendo o trilhamento do material [64].

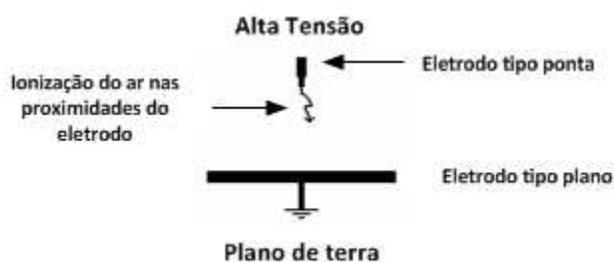


Figura 3.3: Representação de uma descarga parcial do tipo corona.

## 3.3 Características das Descargas Parciais

A tensão de origem de descarga,  $V_i$ , é a menor tensão a qual deve ser aplicada para iniciar uma DP dentro, ou sobre um dielétrico, e a tensão de extinção  $V_e$  é a tensão a qual essa descarga é cessada. Para testes industriais,  $V_i$  é usualmente especificada como a menor tensão na qual descargas repetidas excedendo uma magnitude especificada são observadas, quando lentamente aumenta-se a tensão AC (AC - *Alternating Current*) aplicada, e  $V_e$  é a tensão na qual a magnitude da descarga cai abaixo de um valor especificado.

As tensões  $V_i$  e  $V_e$  dependem da geometria e espaçamento entre condutores e o tipo e a homogeneidade do isolamento; a forma, localização e dimensões de inclusões gasosas e a pressão e o tipo do gás incluído; a presença e o tipo de contaminação na superfície do isolamento e as condições ambientais; na forma de onda, taxa de subida e tempo de aplicação da tensão; bem como se o objeto foi exposto previamente a variações térmicas, condicionamento elétrico, ou envelhecimento [64].

### 3.3.1 Espectral

De acordo com [36, 48, 53, 64], o espectro das DP pode variar muito de acordo com o método de aquisição dos dados, no caso de sistemas clássicos de aquisição o espectro pode variar chegando a um máximo de 300 MHz [56, 55], variando também de acordo com o tipo de isolamento usado: a óleo, gás ou sólido. Em métodos de detecção radiométricos esse espectro pode estender-se a escala de GHz, porém com intensidades relativamente baixas, tempo de subida de alguns pulsos de DP podem ser medidos com menos de 50 ps, os quais apontam para um sinal com banda de frequência de na região de 8 GHz. Medições para três diferentes tipos de DP já foram relatadas e mostraram sinais irradiados com conteúdo significativo abaixo e acima de 3 GHz, limite da banda de UHF [46]. Sabendo que a sensibilidade na detecção de DP é considerada um problema de razão em relação ao ruído em vez de uma questão de amplitude, em aplicações especiais essas componentes de alta frequência podem ter vantagens práticas. Uma destas vantagens deve-se ao fato de que sinais de alta frequência podem penetrar mais facilmente através de menores aberturas em revestimentos metálicos [30]. Esta é uma característica bem aceita por fabricantes, inclusive. O grupo Doble Lemke localizado na Alemanha e na Suíça é líder em teste, diagnóstico e monitoramento de equipamentos de alta tensão e tem suas raízes na LEMKE DIAGNOSTICS GmbH fundada em 1990 pelo Dr. Eberhard Lemke, que ainda é um consultor para Doble Lemke. Tal empresa produz um sistema de detecção radiométrico, que funciona na prática como um analisador de espectro portátil, onde o operador visualiza o espectro de potência ambiente por meio do uso de uma antena. Deve-se previamente armazenar uma amostra do espectro de potência ambiente distante do local ao qual se deseja monitorar, de modo que se possa ter um espectro de referência, sem a presença de influências de ruídos gerados por DP (Figura 3.4). Dessa forma fica ao usuário a responsabilidade de avaliar a diferença entre o sinal de referência e o sinal amostrado no local do monitoramento, em geral uma subestação, e a partir daí concluir se há ou não a presença de DP. Esse sistema tem como banda de frequência monitorada, uma faixa de frequência entre 50 MHz e 1 GHz [19].

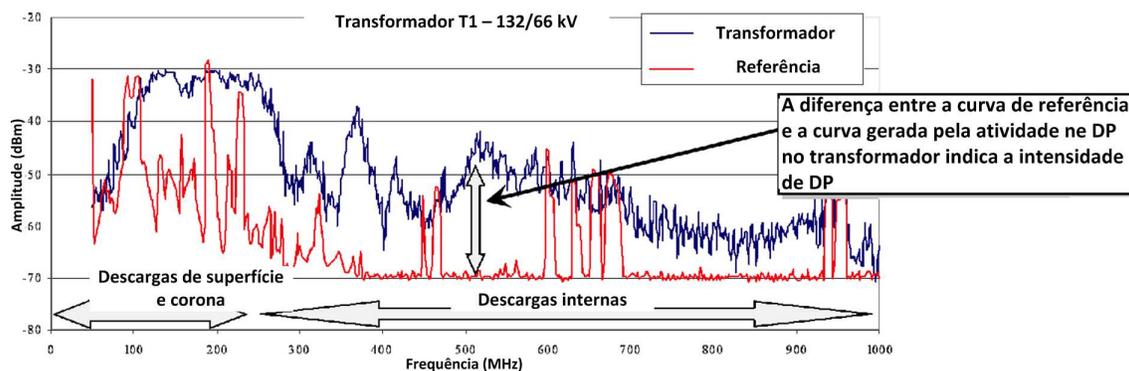


Figura 3.4: Espectro de potência analisado pelo equipamento da Doble Lemke [19].

### 3.3.2 Temporal

Uma DP consiste no fluxo de elétrons e íons, que se deslocam (geralmente) através de uma pequena distância. Uma vez que a velocidade dos elétrons de um gás é muito maior do que a de íons, a medição da corrente de DP irá revelar um relativamente grande, pulso de curta duração (causado pelos elétrons) seguido de um pulso de duração muito mais longa, com magnitude inferior e de mesma polaridade (causada pelos íons) [6]. Análises teóricas recentes de DPs, que assumem uma descarga num pequeno vazio ou arborescência, indicam que a parte eletrônica de uma DP dura menos de 1 ns, enquanto que a porção iônica tem uma duração de cerca de 100 ns [6].

A medição da característica temporal das descargas parciais deu-se início quando o analisador de descarga parcial (PDA - *Partial Discharge Analyser*) para hidrogeradores foi desenvolvido, nessa fase, a única instrumentação disponível para medir as características da forma de onda eram osciloscópios de armazenamento analógico de 100 MHz (Tektronix 466). Esses osciloscópios, embora respondendo a pulsos com tempo de subida de 4 ns, só podiam medir a resposta em um canal de cada vez e tinham *trigger* de varredura bastante primitivos. Assim, muitas vezes era impossível medir a parte inicial da forma de onda, e o sinal a partir de um único acoplador de PDA de cada vez podia ser medido. O resultado foi que apenas uma compreensão geral da natureza das formas de onda das descargas parciais e do ruído era possível com esses osciloscópios [9].

Além do tempo de resposta do sistema de medição a confiabilidade dos resultados da medição é fortemente dependente da calibração do sistema de medição de DP. O objeto

de teste, produzindo DP, é ligado em série com o dispositivo de acoplamento (DA - Dispositivo de Acoplamento). Descargas parciais, que injetam carga entre os terminais do objeto de teste, causam um pulso de corrente através do dispositivo de acoplamento. Este pulso de corrente é convertido em um pulso de tensão através do DA e transmitido para o aparelho de medição (AM - Aparelho de Medição) no cabo. A forma de onda do pulso de tensão é função da impedância de entrada do sistema de medição. Sistema de medição da impedância de entrada é de acordo com as impedâncias do DA, AM e a impedância de medição (IM - Impedância de Medição). Esta impedância pode ser considerada como um circuito equivalente RC ou RLC. O componente R representa a carga resistiva. O pulso de corrente flui através dele e é convertido para um pulso de tensão. C representa a soma da capacitância de entrada e a capacitância de dispersão, e L é a indutância total do sistema de medição. Se o pulso de corrente, considerado como um pulso de Dirac (sem tempo de duração) for aplicado aos circuitos RC ou RLC, o formato de tensão adquirida será como na Figura 3.5.

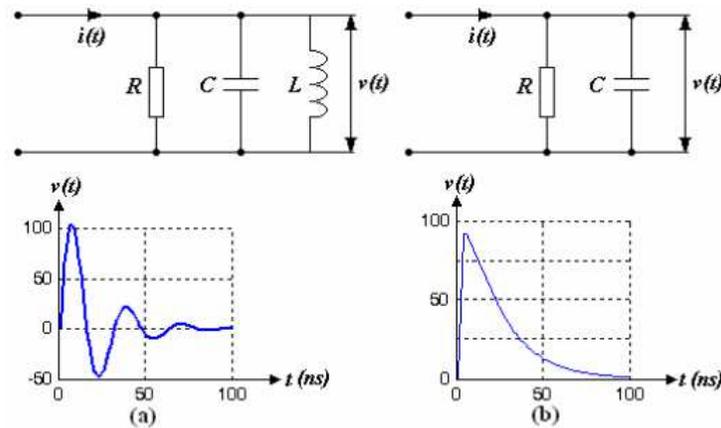
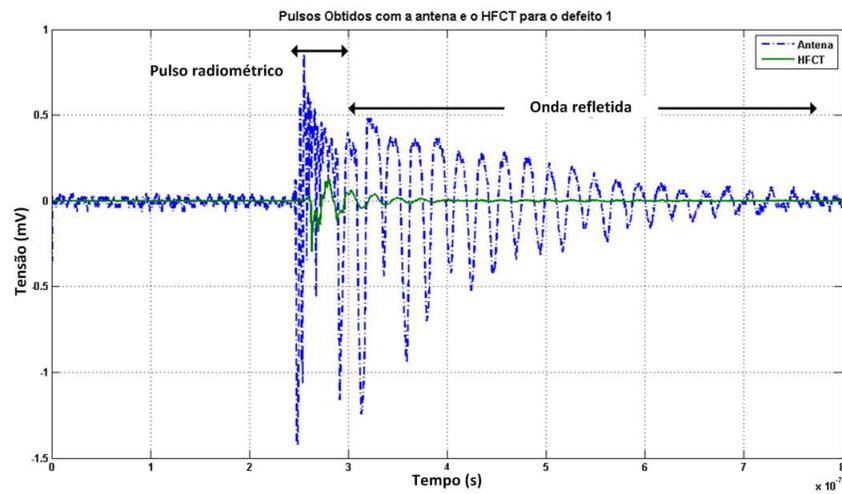
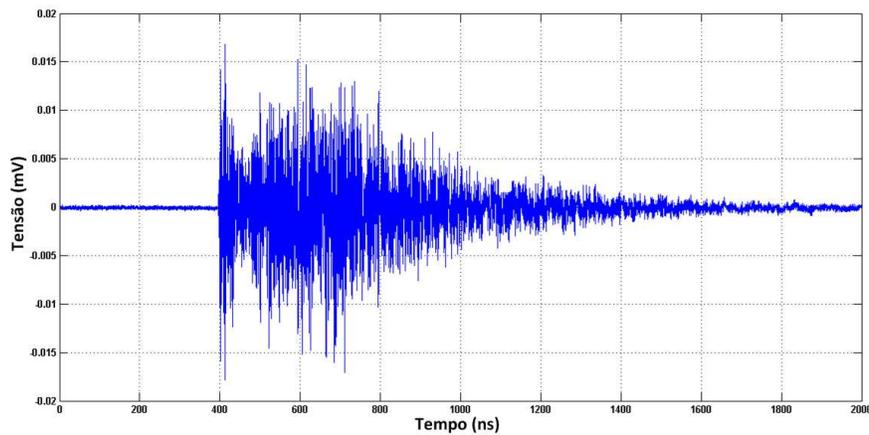


Figura 3.5: Formas de onda da tensão de saída de um circuito RLC (a) e RC (b) considerando um pulso ideal quadrado de entrada com duração nula.

A característica de tempo do pulso também muda, quando considera-se um sistema radiométrico para monitoramento. A forma de pulso tem componentes específicos devido a reflexões do sinal eletromagnético no ambiente e reflexões no cabo que liga a antena ao circuito de medição. Um exemplo claro desta característica onde é possível observar dois pulsos, pode ser visto na Figura 3.6 (a), que corresponde a uma medição feita com uma antena não-casada ligada a um osciloscópio, este desequilíbrio de cargas acrescenta uma onda refletida que viaja através do cabo que liga a antena ao osciloscópio. Na Figura 3.6 (b) observa-se apenas as reflexões devido às características



(a)



(b)

Figura 3.6: Pulsos radiométricos: (a) com onda refletida devido a cargas não casadas e (b) refletido nas estruturas do ambiente.

do ambiente, o que significa que a maioria dos picos observados refletem a diferença de tempo entre o componente de sinal a partir da linha de visada e os componentes do sinal de reflexão no solo e em todas as estruturas presentes na área de medição.

### 3.3.3 Intensidade

A maneira usual de quantificar magnitude de uma descarga parcial é em picocoulombs. A intensidade da descarga parcial é normalmente apresentada em função do tempo. A magnitude de qualquer quantidade de pulsos de DP pode variar estocastica-

mente em ciclos sucessivos e também apresentam um aumento geral ou diminuição com o tempo de aplicação de tensão. A magnitude específica da DP, o procedimento de teste e também o circuito de teste e a instrumentação devem, portanto, ser adequadamente definidos pelas comissões técnicas apropriadas (por exemplo, IEC) [40].

### 3.3.3.1 Carga Aparente

Na norma IEC 60270 define-se carga aparente como [40]: “a carga aparente  $q$  de um pulso de DP é a carga a qual, se injetada dentro de um curto espaço de tempo entre os terminais do objeto de teste em um circuito de teste específico, fornece a mesma leitura no instrumento de medição de um pulso propriamente dito. A carga aparente é usualmente expressa em picocoulombs (pC). NOTA: a carga localmente envolvida no lugar da descarga não pode ser medida diretamente e difere da carga aparente”.

### 3.3.3.2 Contagem de Pulso por Ciclo

Na norma IEC 60270, a taxa de repetição de DP é definida como o número de pulsos de DP por unidade de tempo, sendo, normalmente, relacionado à atividade de descargas parciais a cada ciclo de tensão elétrica, usa-se o termo taxa de ocorrência de DP. Esta quantidade é definida como um número de pulsos medidos acumulados sobre o objeto de teste num certo tempo ( $T_{eff}$ ), que após normalização gera um número por ciclo [28].

### 3.3.3.3 Diagramas Q-phi

Uma análise de ângulo de fase refere-se a um método de análise de pulsos de descarga parcial, que examina o comportamento de pulsos de descarga parcial e séries de pulsos em relação a uma tensão de fase da rede, com frequência fixa (por exemplo, 50 Hz ou 60 Hz). Dados de medição são recolhidos durante centenas ou milhares de ciclos de tensão de modo a ser capaz de fazer análises estatísticas sobre o comportamento de pulsos de descarga parcial.

Nesta análise, deve-se ter atenção a forma da envoltória de distribuição formada pela série de pulsos coletados durante os ciclos. A análise não examina a interação entre pulsos individuais. Na análise do ângulo de fase, três tipos de gráficos, carga máxima

( $q_{max}$ ) em função da fase ( $\varphi$ ), carga média ( $q_{avg}$ ) em função da fase ( $\varphi$ ), número de pulsos ( $n$ ) em função da fase ( $\varphi$ ), são preferencialmente usados. Em um gráfico deste tipo, dezenas ou centenas de pulsos de DP são sobrepostos em um único ciclo (50 Hz ou 60 Hz) de tensão [74].

### 3.3.4 Variação da Intensidade com a Rigidez do Isolamento e a Geometria do Defeito

A ruptura de um dielétrico varia dependendo, dentre outros fatores, do tempo de aplicação de uma tensão. Por exemplo, vários mecanismos de ruptura que ocorrem em dielétricos sólidos são as rupturas intrínsecas que ocorrem devido às impurezas e imperfeições da estrutura. Uma pequena rachadura num dielétrico sólido se propaga através do material dielétrico devido ao campo elétrico aplicado e induz a uma ruptura eletromecânica. Uma ruptura térmica ocorre principalmente devido ao aumento da temperatura do material dielétrico a qual é proporcional à frequência. A erosão do material, umidade, poeira e contaminação, produzem os chamados trilhamentos e arborescência em dielétricos sólidos. Os vazios ou cavidades dentro de um meio ou nas interfaces entre dielétrico e eletrodos produzem uma descarga interna em materiais isolantes sólidos.

A rigidez dielétrica do material e o estresse causado por campo elétrico no equipamento de alta tensão são importantes para o projeto cuidadoso de um isolamento. As medições de campo elétrico são também usadas para a escolha coerente da configuração e dimensões dos eletrodos de modo que regiões de alto estresse não sejam formadas sob operação confiável de um equipamento [74]. A capacidade de um dielétrico para suportar o stress elétrico diminui com a exposição a DP em termos de uma graduada diminuição da tensão de ruptura do isolamento.

O efeito de dielétricos com diferentes rigidezes pode ser observado na Figura 3.7, com o dielétrico de maior rigidez sendo melhor representado em frequências mais altas; esta conclusão é suportada por evidências experimentais. É ilustrado também com o uso desta figura, que a maioria da energia irradiada por uma DP se concentra abaixo de 1 GHz [69].

Além da rigidez do dielétrico, outro ponto de interesse na característica de descarga parcial é a geometria do defeito, associado ao isolamento sólido.

Uma descarga parcial em uma falha preenchida por um gás produz uma mudança na polarização da massa do dielétrico. Essa mudança se reflete na magnitude resultante da carga induzida sobre o eletrodo de detecção.

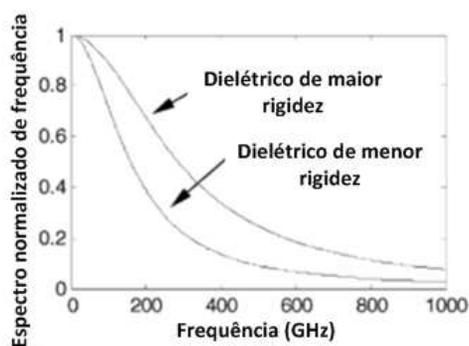


Figura 3.7: Exemplo de curvas de espectros de frequência para dielétricos com diferentes rigidezes.

A carga induzida devido à polarização pode aumentar ou diminuir dependendo da relação das permissividades dielétricas e dentro da qual a falha do dielétrico é localizada. Além da influência da razão de permissividade, a magnitude do efeito também é fortemente dependente da largura/achatamento da geometria da falha, e da orientação geométrica com referência ao eléctrodo. Através da componente de polarização da carga induzida, este comportamento se reflete diretamente na carga poissoniana induzida, e, conseqüentemente, o transitório de descarga parcial registrado [65].

### 3.4 Evolução da Intensidade das Descargas Parciais

Tradicionalmente, o teste de descarga parcial em plantas de alta tensão envolve agendamento periódico. Esta inspeção é realizada por engenheiros de campo, utilizando equipamentos portáteis em intervalos de entre 6 e 24 meses. No entanto, é evidente a partir da experiência de campo que esta abordagem é falha devido a variações na atividade de DP ao longo do tempo e a velocidade com que uma falha pode iniciar e se desenvolver. Descarga parcial é um fenômeno muito complexo e seu desenvolvimento ao longo do tempo é afetado por muitos fatores. As descargas geralmente ocorrem em isolamento danificado ou mal fabricado em pontos de alta tensão elétrica. O tamanho e a taxa de repetição de descargas são funções do tamanho de falha, as condições da superfície e da composição do gás interior, pressão e temperatura. Todos estes parâmetros podem mudar ao longo do tempo como as condições ambientais e de carga, assim como um resultado da atividade de descarga em si. Como resultado, a atividade

de descarga parcial pode ser esporádica, com períodos de muito baixa ou nenhuma atividade seguindo períodos de alta atividade. A carga em um sistema de alta tensão não afeta diretamente DP, no entanto, a alteração resultante na temperatura provoca alterações físicas dentro do isolamento que podem afetá-la. Isto pode manifestar-se como um aumento ou uma diminuição na atividade de DP em períodos de alta carga.

Aproximadamente 15% dos circuitos com descargas que estão sendo monitorados possuem uma relação entre nível de atividade de DP e a carga no circuito, como observado na Figura 3.8 [67].

A análise por um período de 24 horas mostra que a atividade de DP pode, dependendo do tipo de defeito, seguir a carga ou a mudança do padrão de carga. Alguns alimentadores de média tensão tem uma carga maior durante a noite (caso de sistemas de aquecimento e armazenamento em processos industriais) e atividade de DP muito limitada pode ocorrer nesses circuitos durante o dia. No caso do circuito que deu origem a curva observada na Figura 3.8, um teste de mapeamento online conduzido durante o dia não revelaria qualquer problema [67].



Figura 3.8: Curvas de tendência observadas no monitoramento *online* da atividade de DP durante um dia [67].

Outro exemplo pode ser observado na Figura 3.9, uma tendência de crescimento na atividade de descarga parcial detectada pelo sistema de monitoramento num circuito do lado leste de Londres. O aumento da atividade ocorreu sobre um período de 7 semanas. Existe um aumento em ambos, a magnitude individual da descarga e a taxa na qual esta ocorre, embora o acréscimo na taxa foi mais pronunciado [95].

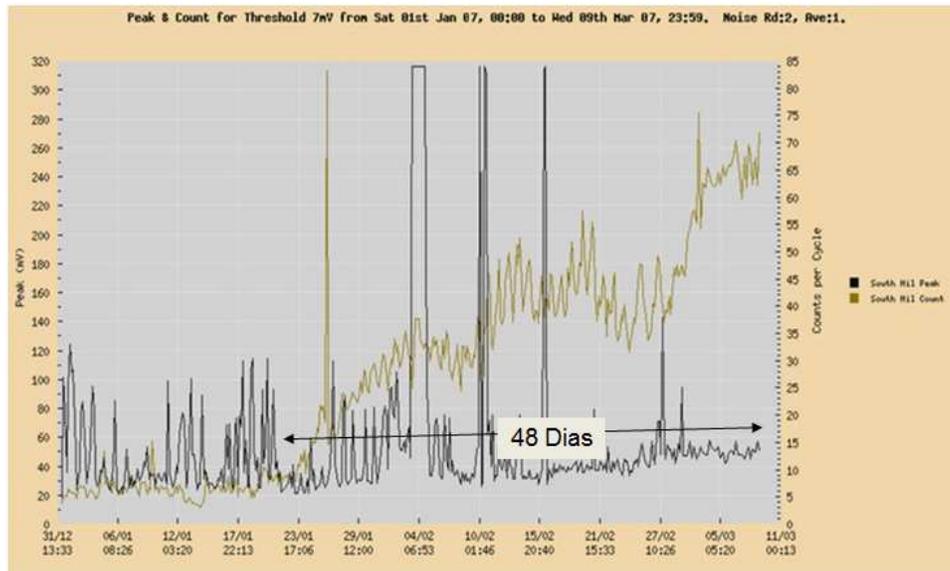


Figura 3.9: Curva representativa da mudança na intensidade de DP em um cabo de alta tensão.

### 3.5 Descargas Parciais como uma Ferramenta para Monitoramento da Condição do *Grid*

O termo *Smart Grid* é um termo de definição complexa abrangendo diversas funcionalidades voltadas para a modernização da rede elétrica. A continuidade do serviço de fornecimento de energia é uma prioridade para os *Smart Grids*. Por conseguinte, o conhecimento da condição de isolamento em redes inteligentes deve ser considerado como uma característica de desempenho relevante. Medições de descargas parciais tem sido a técnica mais aceita no mundo para avaliar a condição de isolamento de equipamentos de alta tensão (cabos de alimentação, juntas, transformadores de corrente e tensão, transformadores de potência, aparelhos de manobra isolados a gás, etc). Um colapso descontrolado em cabos de alta tensão provocam condições críticas e perigosas que podem comprometer a integridade da rede. Visando minimizar as chances de um colapso e buscar alternativas para o gerenciamento de energia, o monitoramento contínuo de DP em uma rede de distribuição *Smart Grid* faz uso de Sistemas de Medição Autônomos (SMA - Sistema de Medição Autônomo) distribuídos ao longo do sistema a ser monitorado, que devem ser implementados em subestações estratégicas. Um Sistema

de Análise de Controle (SAC - Sistema de Análise de Controle) instalado numa subestação centraliza os dados enviados pelas unidades SMA instalados ao longo do sistema de cabos a ser monitorizado. Os dados podem ser enviados por fibra óptica, através de mensagens de GPRS (GPRS - *General Packet Radio Service*) ou por PLC (PLC - *Power Line Communication*). Cada SAC processa os dados recebidos para avaliar as condições de isolamento do sistema de cabos. Alarmes automáticos e análise personalizada são combinados para detectar defeitos incipientes e evitar falhas inesperadas [29].

### 3.5.1 Estrutura do *Smart Grid*

A rede elétrica fornece energia a partir de pontos de geração aos consumidores (residenciais, industriais). Este processo é feito principalmente em dois sistemas primários, ou seja, o Sistema de Transmissão (ST - Sistema de Transmissão) e do Sistema de Distribuição (SD - Sistema de Distribuição). O ST é o meio de ligação que leva a energia a partir de usinas para subestações de distribuição e o SD realiza a distribuição dessa energia das subestações aos consumidores finais. Por outro lado, uma rede inteligente utiliza comunicações digitais e sistemas de controle para monitorar e controlar os fluxos de energia, com o objetivo de tornar a rede elétrica mais robusta, eficiente e de baixo custo [93].

Robusta e inteligente são os requisitos essenciais do desenvolvimento da rede de energia moderna do século XXI. A utilização do *Smart Grid* em resposta a mudanças no ambiente, melhoramento da eficiência energética, reduzindo as emissões de carbono é um objetivo. O *Smart Grid* tornou-se a nova tendência de desenvolvimento para a rede de energia mundial. A coordenação eficiente das demandas de grupos de interesse de *Smart Grid*, promove seu desenvolvimento ordenado. O objetivo principal é realizar a interoperabilidade no *Smart Grid* e assegurar uma estrutura aberta.

A IEC (IEC - *International Electrical Commission*), NIST (NIST - *National Institute of Standards and Technology*) e SGCC (SGCC - *State Grid Corporation of China*) emitiram padrões de tecnologia como um roteiro para o *Smart Grid*. Os objetivos do *Smart Grid* padronizado pelo IEC, NIST e SGCC são para orientar efetivamente o planejamento, projeto, construção, operação e outros trabalhos relacionados ao *Smart Grid*, para corresponder às demandas das partes interessadas, para acelerar e promover seu desenvolvimento [66].

Com o desenvolvimento do *Smart Grid*, a segurança de equipamentos em sistemas

de potência consolida-se como um importante problema. A detecção de sinais de DP é provada como um dos mais significantes parâmetros dentro de um *Smart Grid* [37]. Ter uma infraestrutura mais inteligente de gerenciamento de energia é uma parte essencial na transformação de sistemas convencionais de energia para uma rede inteligente [27].

Considerando todos esses aspectos, um sistema radiométrico projetado para detecção de descargas parciais é uma abordagem de baixo custo, comparado com o valor dos equipamentos monitorados, para monitoramento em tempo real, gerenciamento da infraestrutura e otimização operacional no futuro *Smart Grid* [14].

## 3.6 Revisão sobre Detecção/Medição/Técnicas de Localização de Descargas Parciais

Ao longo dos anos, esforços na investigação no domínio das DP tem aumentado consideravelmente, tanto no que diz respeito para o tipo de material elétrico usado, bem como o tipo de aspecto comportamental da descarga a ser examinada, por exemplo, natureza e forma da descarga, a sensibilidade de detecção, a degradação do isolamento expostos a DP, quantidades de pulsos de descarga, transferência de carga aparente, taxa de repetição de pulso, perda de energia, os intervalos de tempo de separação de pulso, bem como o reconhecimento de padrão do pulso em termos das fontes causadoras das descargas [4].

De fato o monitoramento de tais características pode ser realizado de varias maneiras diferindo de acordo com o tipo do equipamento que se deseja monitorar. A teoria de DP e uma visão ampla de sensores e tecnologia de medição foram sintetizadas por Bartnikas [4].

### 3.6.1 Detecção por Luz Visível e Ultravioleta

Os pulsos de DP também podem ser detectados pela sua radiação visível ou ultravioleta (UV - Ultravioleta). A descarga de superfície ou corona pode ser observada a olho nu quando o nível da DP é superior a 500 pC, se o objeto de teste esta energizado e as condições de iluminação ambiente são muito baixas (o chamado teste em *blackout*). O comprimento de onda da luz irradiada é principalmente na faixa da luz ultravioleta [108].

A luz emitida pelas descargas de corona no ar é muito concentrada em um relativamente pequeno número de larguras de banda muito estreita, normalmente de algumas

dezenas de nanômetros (nm) ou menos. Os comprimentos de onda de emissão de luz de largura de banda de corona são principalmente no espectro ultravioleta (UV), com a intensidade de emissão muito fraca entre os picos dentro desta banda. Muito mais do que metade da intensidade total emitida por uma descarga de corona é emitido em comprimentos de onda mais curtos do que 380 nm, a emissão mais forte é normalmente de uma banda muito estreita centrado em torno de 337,1 nm. Outra forte emissão adicional ocorre a comprimentos de onda mais curtos, na faixa de 295 nm. Portanto, a maior parte da energia emitida pela corona é sob a forma de luz ultravioleta, e o espectro de emissão da corona é, portanto, descontínua.

Em contraste com a natureza descontínua e rica em UV do espectro de emissão corona, a maioria das fontes de luz ambiente, incluindo a iluminação artificial de lâmpadas e luz solar, emitem mais ou menos contínuo espectros que cobrem centenas de nm de largura de banda, e são mais intensos nas porções visíveis e/ou no espectro próximo do infravermelho do que no espectro de UV. A intensidade desta luz ambiente cai rapidamente em comprimentos de onda UV (inferior a 400 nm).

Dispositivos de imagem especializados são usados para detectar as componentes de UV de sinais de DP e são reportados com sucesso [26].

### 3.6.2 Detecção Acústica

As técnicas de emissão acústica na detecção de descargas parciais são baseadas na detecção de um sinal mecânico emitido pela descarga. A descarga aparece como uma pequena explosão, a qual excita uma onda mecânica que se propaga através do isolamento. A onda pode ser detectada por um sensor, no qual a saída pode ser monitorada usando um sistema de aquisição de dados. A forma do sinal detectado depende da fonte, do sistema de detecção e do sensor [2].

O método acústico usando sensores piezoelétricos é largamente usado na prática devido ao fato de sua facilidade em ser implementado para medições *online* e sua baixa susceptibilidade a interferência elétrica. Entretanto, a exatidão da localização é frequentemente pobre devido à natureza complexa dos sinais acústicos. Estes sinais viajam a partir da fonte de DP até o sensor via diferentes caminhos com diferentes velocidades de propagação, como observado na Figura 3.10. Outros problemas podem ser adicionados devido a efeitos como atenuação do sinal, reflexão, refração, ruído mecânico ou reverberação, e a presença de barreiras solidas dentro do transformador (núcleo, enrolamentos, e suportes estruturais). Alguns exemplos de sensores piezoelétricos podem ser observados na Figura 3.11.

Para investigar a localização da descarga parcial em transformadores de potência, os sensores acústicos são montados em posições superiores e inferiores ao lado de enrolamentos como pares lineares. A diferença de tempo entre os sinais acústicos obtidos por cada sensor é usada para calcular o comprimento do caminho de propagação e conseqüentemente obter uma localização 3D da fonte de DP [89].

### Emissão Acústica (EA)

Emissão acústica é uma técnica não destrutiva que é capaz de detectar a dinâmica do processo associada com a degradação da estrutura

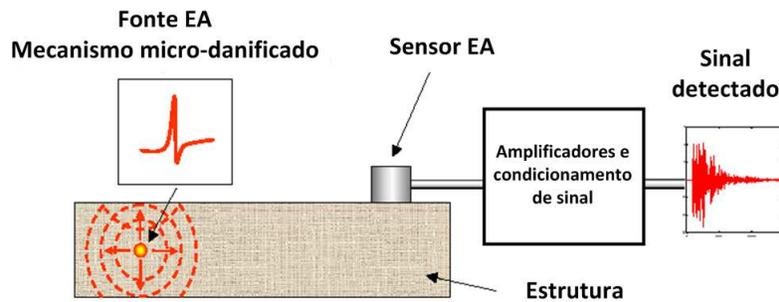


Figura 3.10: Diagrama esquemático de uma emissão acústica [71].



Figura 3.11: Sensores Piezoelétricos para detecção acústica de defeitos em estruturas [101].

### 3.6.3 HFCT

O uso de transformadores de corrente de alta frequência (HFCT - *High Frequency Current Transformers*), para medições de DP em cabos, é um método não convencional de medição largamente usado em campo. O uso de HFCT apresenta algumas vantagens para este propósito, a saber: isolação galvanômica para circuitos de teste, boa sensibilidade e a possibilidade de aplicação de ferramentas de pós processamento e análise espectral para identificação do pulso. Se forem utilizados sensores do tipo *clamp-on*, o uso de HFCT permite testes *on-line* de descarga parcial em cabos com intrusão mínima. Transformadores de corrente de alta frequência são projetados para medições de corrente com uma largura de banda elevada. Para fins de descargas parciais HFCT são usados para medir pulsos de corrente rápidos, com tempos de subida na ordem de nanossegundos, e durações de pulso de até 1000 ns. Normalmente HFCTs são instalados na extremidade dos cabos de blindagem dos equipamentos, no ponto de ligação à terra. Assim HFCT mede a corrente que flui através do condutor de terra, que é igual à corrente que flui através do condutor interno [87].

Em 2008 a banda de frequências de detecção de DP foi estendida até a banda de frequência de rádio com o desenvolvimento de novos sensores, por exemplo, bobinas de Rogowski. Em 1912, a bobina de Rogowski foi introduzida para medir campos magnéticos. Uma vez que a tensão de saída da bobina e a potência não foram suficientes para alimentação de equipamentos de medição, ela tem sido amplamente utilizada para a medição rápida, de alto nível de correntes pulsadas no intervalo de alguns mega amperes, em sistemas de energia. Com a melhoria de relés de proteção baseados em microprocessadores de hoje e dispositivos de medição, as bobinas de Rogowski são mais adequadas para tais aplicações. Elas têm sido geralmente utilizadas onde outros métodos não são adequados. Tornaram-se um método cada vez mais popular de medição atual em equipamentos de eletrônica de potência, devido às suas vantagens de baixa perda de inserção e tamanho reduzido em comparação com um transformador de corrente (TC - Transformador de Corrente) equivalente. É o método preferido de medições de corrente com características mais adequadas do que os TCs e outros dispositivos com núcleo de ferro. As bobinas também têm sido utilizadas em conjunto com sistemas de proteção particularmente elevados sistemas de precisão ou onde existem compensações de corrente contínua que degradam o desempenho dos TCs. Isso é útil ao medir a corrente de *ripple*, por exemplo, em uma linha DC (DC - *Direct Current*). As características das bobinas de Rogowski que os tornam particularmente úteis para medições de tran-

sientes derivam a sua linearidade inerente e uma vasta banda dinâmica. Uma bobina de Rogowski é basicamente um enrolamento toroidal com baixo nível de ruído, em um núcleo não magnético (geralmente núcleo de ar), colocada em torno do condutor a ser medido, o que os torna mais leves e menores do que os dispositivos de núcleo férreo [39].

### 3.6.4 TEV

Se uma descarga parcial ocorre na fase de isolamento para terra de um equipamento de alta tensão, como um quadro de relés revestido de metal ou uma terminação de cabo, uma pequena quantidade de carga elétrica é transferida capacitivamente do sistema condutor de alta tensão para o revestimento metálico terra. A quantidade de carga transferida é pequena e é normalmente medido em picocoulombs. A transferência ocorre, tipicamente, em poucos nanossegundos .

Quando a descarga parcial ocorre, as ondas eletromagnéticas se propagam para longe do local de descarga, devido ao efeito de pele as tensões transitórias no interior da estrutura não pode ser detectada diretamente fora do quadro. No entanto, normalmente existem aberturas no revestimento de metal, por onde a onda eletromagnética pode propagar-se no espaço livre. A frente de onda colide com o lado de fora do revestimento de metal gera uma tensão de terra transiente na superfície do metal. Desse modo a técnica é chamada de TEV (*TEV - Transient Earth Voltage*) para tensão transitória para terra. A tensão transitória tem um tempo de subida de nanossegundos e uma amplitude que varia muito de milivolts para volts.

O TEV é medido com uma sonda capacitiva colocado na estrutura aterrada do quadro. Se duas sondas são colocadas sobre a estrutura é possível localizar o item da planta contendo a descarga por comparação dos tempos de chegada dos sinais das diferentes sondas [7].

Suas vantagens são [104]:

- sob o estado de funcionamento dos dispositivos: online (ininterrupta) ou offline (regular ou irregular) de tecnologia de monitoramento DP sem suspender o serviço do dispositivo, o monitoramento sob a circunstância de tensão resistiu, melhorando a disponibilidade dos equipamentos e confiabilidade de serviço ao cliente;
- geralmente antes da falha acontecer, a possibilidade de existência precoce de fenômeno de descarga parcial é muito elevada, tais como, os defeitos internos do iso-

lante sólido, partículas em suspensão de gás isolante, e assim por diante. Previsão precoce e o processo desse fenômeno de DP, mais falhas de equipamentos podem ser evitada;

- possuir uma melhor capacidade de detecção.

### 3.6.5 UHF Invasivo

Em 2008, muitas pesquisas focaram em aplicações de técnicas de monitoramento de DP usando UHF em transformadores de potência. O benefício mais importante do monitoramento com UHF para transformadores de potência é a capacidade de localização de fontes de DP [47], além do fato de que pode-se realizar um processo de detecção com o mínimo de ruído devido às altas frequências as quais o sistema está condicionado a operar para detecção das descargas, tipicamente entre 200 MHz e 2000 MHz [56].

Para aplicações em GIS, acopladores de UHF são classificados como sendo de dois tipos, internos ou externos. O método de UHF invasivo é chamado assim pelo simples fato de usar acopladores internos ao equipamento monitorado, que são usualmente do tipo disco [48, 36] ou de modelo cônico que também pode ser usado para medir rápidos transientes de tensão. Acopladores internos são instalados normalmente na montagem da subestação, pois reequipar os equipamentos significa realizar uma interrupção de funcionamento.

Quando os sensores UHF são instalados ainda durante o processo de construção dos transformadores ou reatores, eles podem ser instalados na parede do transformador, esse processo oferece uma solução robusta e viável para ocasionais ou contínua medição de DP com a capacidade de localização associada, durante toda a vida útil do transformador. Na Figura 3.12 pode-se observar exemplos de três tipos de sensores UHF para DP que podem ser usados em transformadores [47]:

- um sensor interno observado durante a calibração, ilustrado na Figura 3.12 (a). A construção robusta inclui um sistema de dupla vedação que permite que o sensor possa ser substituído, sem expor o óleo;
- um sensor de janela (também observado durante a calibração), montado sobre uma placa de dielétrico de 40 mm de espessura, a qual pode ser de nylon ou politetrafluoretileno (PTFE - politetrafluoretileno), ilustrado na Figura 3.12 (b);

- um sensor do tipo sonda portátil, que pode ser implantado rapidamente em um transformador, sem a necessidade de uma interrupção, ilustrado na Figura 3.12 (c).

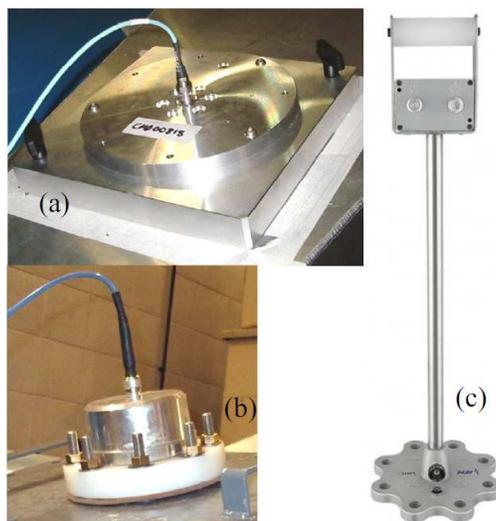


Figura 3.12: Três tipo de acopladores UHF para monitoramento de DP em transformadores. (a) Um acoplador interno, (b) Um externo do tipo com janela dielétrica, (c) Um do tipo sonda para válvula de óleo [47].

### 3.6.6 UHF não Invasivo

A detecção radiométrica de DP por rádio frequência pode ser resumida ao fato de que quando cargas elétricas movem-se com qualquer velocidade não constante, irradiação eletromagnética ocorre e um sinal espalha-se a partir do ponto da descarga em todas as direções [55], desse modo um receptor de rádio direcional pode ser usado para determinar a intensidade e a posição geral de uma descarga dentro de uma subestação de energia elétrica, dentre outras características, um exemplo pode ser observado na Figura 3.13.



Figura 3.13: Sistema de detecção radiométrico implementado na subestação de Melksham.

O crescente mercado de dispositivos móveis de comunicação nos últimos anos levou a grandes reduções no custo de dispositivos eletrônicos em UHF, fazendo com que, medidas avançadas de DP nestas bandas fossem cada vez mais acessíveis. Cerca de 20 anos atrás, os métodos de UHF para a detecção de DP foram pioneiros em subestações blindadas isoladas a gás, que se tornaram amplamente aceitos [69]. A primeira subestação isolada a gás a ser equipada para monitoramento usando UHF (em 1986) foi a subestação de energia nuclear de Torness na Escócia - UK (UK - *United Kingdom*). Desde então, o monitoramento usando UHF para subestações isoladas a gás tem se tornado um meio economicamente viável e uma forma de monitoramento *online* para medição de DP em todo o mundo [36, 53].

O uso de monitoramento de DP como um meio de monitoramento não invasivo da condição de equipamentos de sistemas de energia é amplamente estabelecida.

Neste contexto, o uso de sensoriamento remoto por rádio frequência (RF) tem tornado-se uma grande promessa, já que pode ser facilmente implantado em uma subestação, não exige qualquer contato físico, e pode ser aplicado a qualquer item da planta energizado [69, 47]. Por exemplo, acopladores de UHF, montados em subestações isoladas a gás (GIS - *Gas Insulated Substations*) não necessitam de uma parada de funcionamento para instalação deste equipamento de medição.

A maioria das medições radiométricas é feita utilizando equipamento de rádio recepção de banda estreita. Com os recentes desenvolvimentos em tecnologia de amostragem digital, é possível agora gravar ondas irradiadas por DP usando uma resolução que ainda não tenha sido possível [11].

Quando acopladores externos podem ser usados, a liberdade do uso de estruturas

complexas de banda larga leva a uma sensibilidade superior do que em acopladores internos, visto que existem restrições primordiais para acopladores internos pois estes não podem ter qualquer característica que leve a um aumento do estresse no ambiente de alta tensão.

### 3.7 Vantagens e Desafios de um Sistema Radiométrico

A emissão de energia por meio de RF por meio do mecanismo de descargas parciais é conhecida por ser característica de defeitos de isolamento em equipamentos de alta tensão (HV - *High Voltage*) [78, 68, 69, 81]. Até meados de 2012, no Reino Unido, por exemplo, um sistema de monitoramento de sinais RF para detecção de DP, era usado para realizar uma varredura em toda a rede nacional de subestações de energia elétrica apenas duas vezes por ano. Este monitoramento é realizado por um operador, treinado e equipado com um receptor de radio com banda de frequência de 10 MHz à 900 MHz, para detectar Interferência de RF (RFI - *Radio Frequency Interference*). O operador reconhece a presença de defeitos de isolamento avaliando o nível de intensidade do sinal (visualmente com indicadores de intensidade ou por meio da detecção auricular com uso de fones de ouvido) com a variação da posição da antena e a banda de frequência varrida. Usando esse método, a companhia de fornecimento de energia elétrica detecta entre 20 e 30 defeitos por ano. A detecção sem fio de DP usando um receptor de radio tem a vantagem de que nenhuma conexão com a parte de alta ou baixa tensão de operação do equipamento necessita ser feita, o isolamento primário e o secundário se mantêm sem modificação e a instalação/manutenção do equipamento de detecção não requer que qualquer item da planta seja retirado de serviço. Por isso cresce cada vez mais o interesse na detecção e de medição contínua da RFI para o diagnóstico de defeitos em equipamentos de transmissão e distribuição, que além do mais foi recentemente intensificada devido à queda nos custos de processamento digital de sinais de RF e as vantagens adquiridas em mudar as características de manutenção baseadas na condição, ao invés do tempo.

#### 3.7.1 Abordagem Existente para Localização Baseada em TDOA

A complexidade da tarefa de localização varia dependendo do tipo de material a ser analisado e o ambiente no qual o equipamento opera. Como observado na localização

de DP em cabos de isolamento em GIS o problema é essencialmente unidimensional. Ao utilizar o TDOA (TDOA - *Time Difference Of Arrival*) dos sinais recebidos em dois acopladores de cada lado da fonte de DP, a sua localização pode ser determinada com uma precisão de menos de 20 cm. A tarefa de localizar DP dentro do volume de toda uma subestação ou dentro de um transformador é mais complexa, como o problema é tridimensional. O sinal de DP é gravado por um mínimo de 4 sensores, a fim de resolver para um local candidato no espaço 3D que satisfaça as TDOAs gerados por cada par de sensores. Além disso, complexidade é adicionada quando o caminho de linha de visão (LOS - *Line Of Sight*) da fonte de DP a qualquer um dos sensores é obstruído por objetos dentro da área de monitoramento e encontrar formas de amenizar este problema continua a ser uma área ativa de pesquisa [38].

A tarefa de localizar DP dentro de um ambiente de subestações utilizando TDOA de emissões de rádio UHF foi a primeira realizada com sucesso usando um sistema retangular de 4 antenas passivas. Essa matriz pode ser implantada ou pela instalação em algum ponto de estratégico dentro do complexo da subestação ou montando-a sobre o telhado de um veículo que permiti a matriz ser facilmente deslocada para diversas posições a partir das quais o monitoramento pode ser realizado. Os tempos de chegada da frente de onda em cada antena são usados para estabelecer o TDOAs entre as antenas e utilizando as posições 3D conhecidas das antenas as coordenadas da origem das DP podem então ser calculadas, Figura 3.14 [38].

O cálculo da diferença de tempo de chegada é obtido em dois passos [69]:

1. O tempo de chegada da onda direta no *array* é encontrado aproximadamente usando uma técnica de limite simples sobre o registro digital de cada sinal da antena. Isto dá uma resposta dentro de uma ou duas amostras.
2. A partir de um conhecimento da posição aproximada da onda direta em cada canal, as diferenças de tempo de chegada, são avaliados de forma mais precisa, utilizando uma técnica de correlação cruzada.

Uma descrição detalhada desta técnica pode ser encontrada em [69].

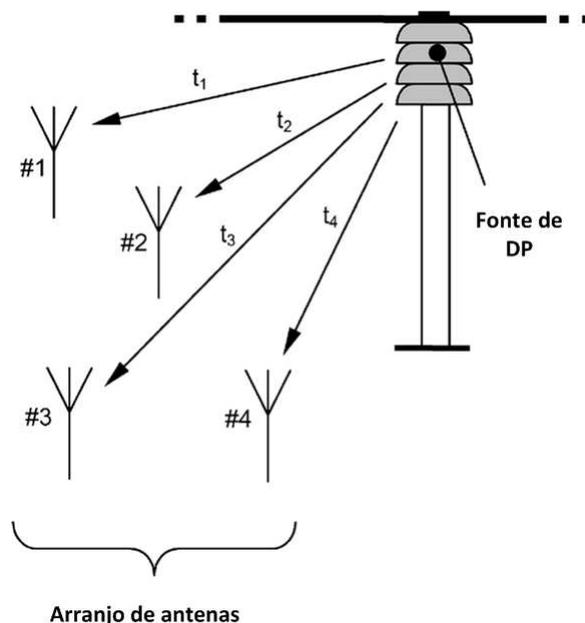


Figura 3.14: Visão conceitual de um sistema de localização de DP baseado no TDOA.

### 3.7.2 Abordagem Proposta para Localização Baseada Apenas em Amplitude do Sinal

Em um sistema radiométrico, cada radiômetro realiza a medição da potência total na sua largura de banda receptora usando um tempo de integração pré-definido. Este tempo deve ser curto para armazenar mudanças na atividade da DP devido a mudanças no estado físico do isolamento, mas longo o suficiente para armazenar de forma confiável o nível de intensidade da DP. Um período de integração deve ser escolhido de modo que também permita suavizar transientes de alta potência, mas que possua curta duração. Cada radiômetro deve transmitir sua medição a uma estação base para coleta de dados usando um *link* de comunicação tal como: *ZigBee*, *Bluetooth*, *Wifi*, ou uma tecnologia de comunicação sem fio. A escolha da tecnologia do transceptor será ditada pelo consumo de energia combinado com o máximo alcance necessário. O problema da contaminação por ruído externo e sinais de origem não-DP (incluindo interferências coerentes por comunicação, navegação e transmissões por radar) pode ser explicado em dois caminhos: primeiro, o largo comprimento de banda do radiômetro suaviza influências, não devidas, de sinais com alta densidade espectral na condição destes serem de banda estreita e o segundo, uma rede de radiômetros usa a vantagem de que o fenômeno das DP é local. Sinais de comunicação ou outros originados distantes da subestação

afetarão todos os radiômetros igualmente. Um sinal de DP ocorrendo próximo de um radiômetro terá intensidade muito maior neste do que nos outros radiômetros da rede. A superposição dos radiômetros como ‘*hot-spots*’ no mapa da subestação terá, portanto, apenas sinais de origem da própria subestação. A densidade aproximadamente uniforme de nós radiômetros fornece a rede uma capacidade inerente de localização. A localização de fontes de DP será refinada, por uma rotina de estimação de localização que usa inversão da lei de perdas de transmissão. A potência do sinal recebido pode ser modelada por:

$$P_R = \frac{kP_t}{r^n} \quad (3.1)$$

onde  $P_R$  é a potência recebida,  $P_t$  é a potência irradiada,  $r$  é a distância a partir da fonte de radiação do sinal,  $k$  é uma constante que depende de parâmetros do sistema (ganho da antena, frequência, etc), e  $n$  é o índice de perda do caminho. Se o valor de  $n$  é independente da distância, a Equação 3.1 é referenciada como lei do *single-slope*. (Para a propagação no espaço livre, por exemplo, o índice de perdas no caminho é 2, correspondendo a uma lei do *single-slope* de 6 dB/oitava) [30].

A lei das perdas de transmissão pode ser invertida [17] para fornecer uma estimativa da razão de distâncias a partir de uma fonte de DP para quaisquer outros dois radiômetros. Uma fonte de DP detectada por três ou mais radiômetros pode, portanto ser localizada a partir da intersecção de dois ou mais círculos de influência. Na prática essa localização será sujeita a erros, determinados principalmente pela variabilidade espacial do índice de perdas do caminho. Para mais de dois círculos de influência isso é diferente, portanto, haverá um único ponto de intersecção e neste caso uma estimativa de localização baseada na minimização de uma métrica apropriada será usada. Com objetivo de realizar a melhor precisão possível para a localização de fontes de DP um programa específico de medições de perdas de transmissão será tomado em um número de subestações de energia elétrica permitindo a obtenção de um índice de perdas do caminho empírico, e sua variação. Uma fonte real ou emulada de DP será usada como um transmissor nestas medições e um dos radiômetros será usado como receptor.

### 3.8 Conclusões

O uso de sensores para medição de DP varia de acordo com o tipo de abordagem a ser aplicada. Cada tipo possui características particulares de instalação, mas todos compartilham um mesmo ponto negativo, no contexto de segurança e escalabilidade, o

fato de que existe a necessidade de contato com o equipamento de alta tensão quando se objetiva o monitoramento de DP internas (No caso de corona existe o processo de medição de luz UV que não requer contato com o item monitorado). As medições radiométricas oferecem o benefício de um monitoramento completamente não invasivo e sem ligação mecânica com o equipamento de alta tensão monitorado.

O processo de medição e localização de DP em equipamentos de alta tensão baseados em métodos radiométricos não é uma novidade. A contribuição da presente tese foca principalmente neste aspecto, a forma de detecção e localização abordada aqui reflete algo não explorado e que representa uma possível solução para o processo de estimação de localização. Um método de estimação de distância baseado em medições de potência é uma alternativa para os sistemas atuais baseados em TDOA. Além do mais, como observado, a medição contínua oferece a vantagem do conhecimento adquirido sobre as mudanças na atividade de DP com as variações as quais o equipamento é submetido (temperatura, carga, umidade, etc).

# Capítulo 4

## Modelagem do Sistema de Medição

### 4.1 Modelos de Fontes de DP

Um modelo de fonte de descarga parcial (DP) para simular o seu comportamento é necessário, pois o desenvolvimento de todas as ferramentas de monitoramento conta com restrições de custo e tempo. Apesar das descargas parciais serem conhecidas, como uma ferramenta confiável para monitoramento da integridade de equipamentos alta tensão (HV), o seu mecanismo ainda é uma parte não trivial a ser lidada. Foram propostos alguns modelos para modelagem de DP considerando diferentes aspectos do seu mecanismo. Dois deles se destacam na frente dos outros, o modelo de capacitância também chamado modelo de *Gemant & Philippoff* [100], baseado em um circuito elétrico que simula o comportamento de DP através de capacitâncias associadas ao isolamento defeituoso, e o modelo de Pedersen [76], que utiliza informações associadas com a geometria e as características do defeito.

#### 4.1.1 Modelo da Capacitância

O comportamento de DP em inclusões (cavidades, defeitos, etc) em dielétricos pode ser representada por um simples circuito equivalente de capacitores desenvolvido por *Gemant & Philippoff* em 1932 [100], conhecido como modelo das capacitâncias. Este modelo pode ser representado com duas configurações, uma simples e uma mais complexa a qual considera a carga acumulada durante o processo de descargas parciais. O circuito mais simples é composto por três capacitores, dois em série ( $C_b$  e  $C_c$ ) e um em paralelo ( $C_a$ ) aos outros dois. Uma chave controlada (S) é adicionada paralela ao ca-

pacitor que representa o defeito dentro do isolador sólido e é usada para curto circuitar o capacitor através do resistor ( $R_k$ ). Na Figura 4.1a, pode-se observar um diagrama esquemático do modelo de capacitâncias mais simples. A versão mais complexa, Figura 4.1b, é uma versão reconstruída com a inclusão de um novo capacitor,  $C_d$ , de forma a considerar o campo elétrico adicional gerado pelo acúmulo de carga devido as descargas precedentes.

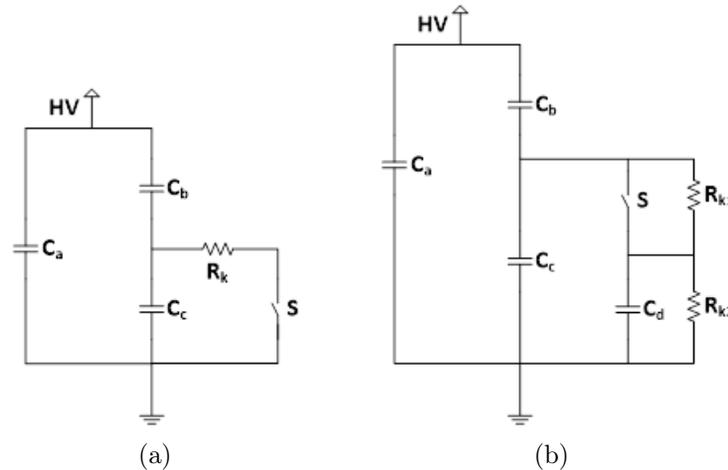


Figura 4.1: Diagrama esquemático para o modelamento de DP, baseado no modelo das capacitâncias. (a) implementação simples do modelo das capacitâncias, (b) versão modificada com a inserção da capacitância de carga.

Cada capacitância  $C_a$ ,  $C_b$  e  $C_c$  pode ser obtida usando as informações sobre a geometria do defeito. O mesmo procedimento não pode ser usado para a obtenção de  $C_d$  ou das resistências  $R_k$ ,  $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$ . Estas variáveis indefinidas fazem o processo de simulação de descargas parciais usando este modelo, muito mais empírico do que teórico, o que é uma grande desvantagem.

### 4.1.2 Modelo de Pedersen

Com base em hipóteses melhoradas que relacionam uma cavidade preenchida após uma descarga com o campo mínimo necessário para suportar uma descarga, Pedersen e colegas [76, 5] fornecer uma teoria quantitativa melhorada para a magnitude da descarga numa cavidade em um sólido. Tal teoria requer expressões para:

1. campo elétrico mínimo para ocorrência do pulso como uma função do tipo de gás e a pressão no interior da cavidade e do tamanho da cavidade;

2. a mudança no campo elétrico dentro da cavidade, como resultado de uma descarga em função de parâmetros relevantes;
3. a relação entre a tensão através da amostra e o campo elétrico dentro de uma cavidade, como uma função de fatores geométricos;
4. a alteração da carga sobre os eletrodos resultante de uma descarga como função da geometria do sistema e o conteúdo da cavidade.

Na maioria das circunstâncias, a cavidade é muito pequena em relação à geometria do objeto dentro da qual é formada. Como resultado, pode-se fazer a hipótese de que o campo elétrico no interior desse objeto varia insignificamente sobre as dimensões da cavidade [5]. O modelo Pedersen é essencialmente um modelo quantitativo, que foi desenvolvido com base na teoria eletromagnética, e pode ser resumido pela Equação 4.1, que representa a carga induzida pela DP no eletrodo de medição em uma cavidade [76]:

$$q = k\Omega\varepsilon_r\varepsilon_0(E_i - E_l)\nabla\lambda_0 \quad (4.1)$$

onde,  $k$  é o fator de geometria da cavidade,  $\Omega$  é o volume da cavidade,  $E_i$  é o campo elétrico de origem para uma descarga parcial,  $E_l$  é o campo limitante para ionização,  $\varepsilon_r$  é a permissividade relativa do material isolante,  $\varepsilon_0$  é a permissividade do espaço livre e  $\nabla\lambda_0$  é a razão entre o campo aplicado pelo arranjo dos eletrodos e a tensão aplicada [111]. Devido à sua natureza, o modelo de Pedersen é ineficaz para simular a dinâmica do processo de DP, que é o foco deste trabalho. No entanto a sua utilização é importante para comparar os resultados anteriores obtidos em medições reais.

### 4.1.3 Modelo de Repetição

Um modelo de repetição nada mais é do que um modelo que usa dados previamente obtidos por meio de uma medição experimental realizada. Esses dados são utilizados como banco de informações para a rotina de processamento a ser testada. No caso das descargas parciais, um modelo de repetição usa informações provenientes de medições realizadas de forma clássica ou alternativa, como por exemplo, um detecção radiométrica. O tamanho do conjunto de dados usado para criação do modelo de repetição deve englobar as mais diversas respostas do sistema de modo que o modelo de repetição retrate os diversos comportamentos do sistema. Devido ao fato desse sistema usar informações reais de respostas do sistema, ele está sujeito aos problemas associados

ao processo de medição, como por exemplo, banda de frequência do sinal obtido. Esta banda de frequência pode ser diminuída de acordo com o sistema de medição usado para obtenção dos dados. Mesmo assim a resposta obtida ainda é uma das mais próximas do sistema real em se tratando de sistemas complexos.

## 4.2 Células de DP para Geração e Coleta de Dados

Células para geração de DP são normalmente constituídas de eletrodos conectados a um potencial de alta tensão, com formas características que representam cada tipo de defeito, corona, descargas internas e descargas de superfície. Estes eletrodos são espaçados, de modo que se possa preencher o espaço entre eles com gás ou óleo de forma a tornar o simulador o mais fiel possível às condições reais de isolamento. Existem basicamente três configurações de defeitos associados a um par de eletrodos, tal como observado na Figura 4.2 [36, 56, 21, 86, 10, 59]:

- descargas em cavidades, representadas pelo sistema de eletrodos esfera-para-plano, Figura 4.2 (a);
- descargas do tipo corona, representadas pelo sistema de eletrodos ponta-para-plano, Figura 4.2 (b);
- descargas de superfície, representadas pelo sistema de eletrodos roda-para-plano com dielétrico (normalmente tipo epóxi), Figura 4.2 (c).

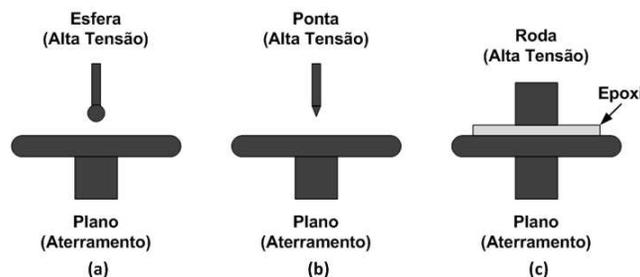


Figura 4.2: Exemplo ilustrativo de um conjunto de eletrodos usados para simulação de Descargas Parciais.

A solução mecânica, apesar de mais semelhante a situação real, torna o sistema de geração dos pulsos impreciso e de difícil manuseio, devido à necessidade de um ambiente de trabalho que forneça níveis elevados de tensão para produção do centelhamento necessário à produção do pulso.

A estrutura do gerador de DP é baseada no aumento do campo elétrico no interior da falha dentro do dielétrico, seja o aumento do campo elétrico devido à alta tensão, o ar dentro da falha tem sua rigidez dielétrica rompida levando a uma micro descarga. Um simples modelo para simulação foi utilizado com o uso do *Comsol Multiphysics*, com o objetivo do monitoramento da intensidade do campo elétrico dentro de uma falha (que representa o defeito de no isolamento sólido) de formato cilíndrico num isolamento de FR4 (FR4 ou FR-4 é um material compósito constituído por uma malha de fibra de vidro com um ligante de resina epoxi que é resistente à chama (auto-extinção)), utilizado em placas de circuito impresso. O uso dessa ferramenta de simulação nos permite um melhor dimensionamento da estrutura do gerador de DP, bem como, os limites de tensão aplicados necessários à ocorrência de DP no interior da falha. A estrutura projetada baseia-se em alguns trabalhos já desenvolvidos, como por exemplo, em [25, 72].

Com o objetivo de melhor visualização do interior da estrutura geradora de DP, foi utilizado como padrão para o desenvolvimento de um modelo para simulação, um tubo de acrílico, com diâmetro externo de 45 mm e diâmetro interno de 32 mm. Um modelo em três dimensões da estrutura geradora de DP foi desenvolvido em um *software* CAD (CAD - *Computer Aided Design*), como observado na Figura 4.3, de modo que este possa ser importado pelo *Comsol Multiphysics* para que o processo de simulação seja realizado.

Um nível alto de tensão definido no teste simulado, foi representado por uma tensão senoidal com amplitude de 10 kV e frequência de 60 Hz. Essa diferença de potencial é implementada na simulação entre os eletrodos espaçados pelo isolamento com defeito, também projetado no *software* CAD. O *Comsol Multiphysics* calcula a cada iteração as componentes do campo elétrico no interior da estrutura, de modo que se possa observar como esse campo se comporta. No modelo simulado, foi traçada uma linha guia cruzando a falha no meio do dielétrico, de modo que se possa monitorar o campo elétrico desde o interior do eletrodo de alta tensão, passando pela falha, até o eletrodo ligado ao potencial terra. Esta linha (b1) pode ser melhor visualizada na Figura 4.4.

A partir dos resultados obtidos por uso da simulação pode-se observar que para uma tensão de 10 kV, tem-se a geração de um campo elétrico numa faixa entre 20 e 120

kV/cm, aproximadamente, dentro do defeito, ou seja, tem-se um nível de intensidade de campo elétrico grande o suficiente para que a rigidez dielétrica do ar seja rompida levando a uma micro descarga no interior do defeito, o que caracteriza o processo de descarga parcial. Esse resultados podem ser observados na Figura 4.5, onde a intensidade do campo elétrico é representada por um gradiente que assume valores mais altos no interior da falha e valores mais baixo nas demais partes de estrutura.

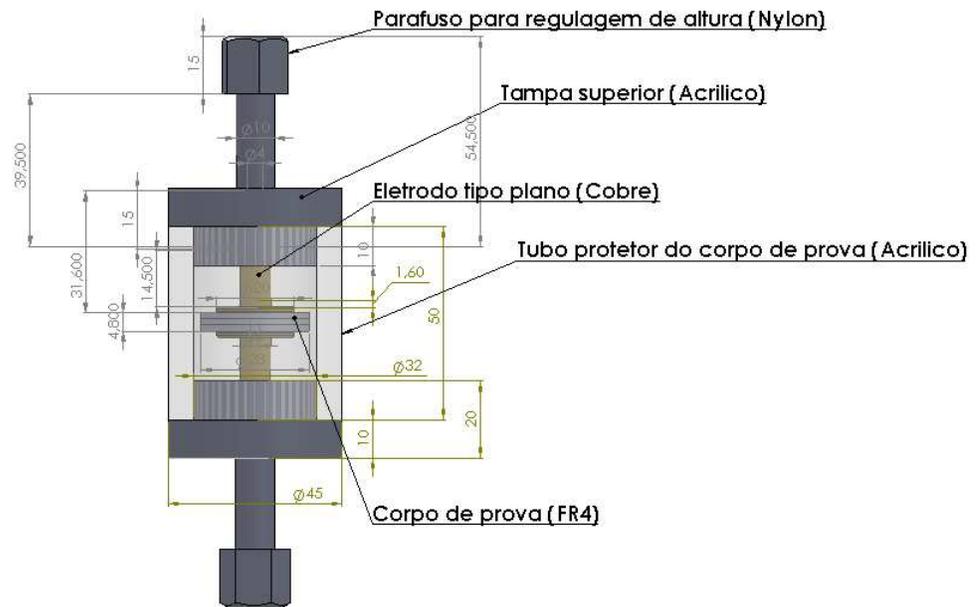


Figura 4.3: Modelo em três dimensões da estrutura geradora de DP.

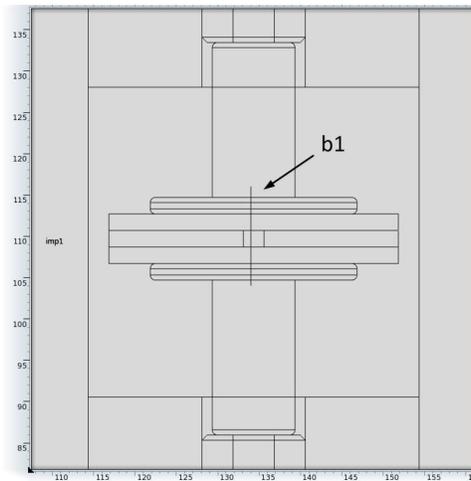
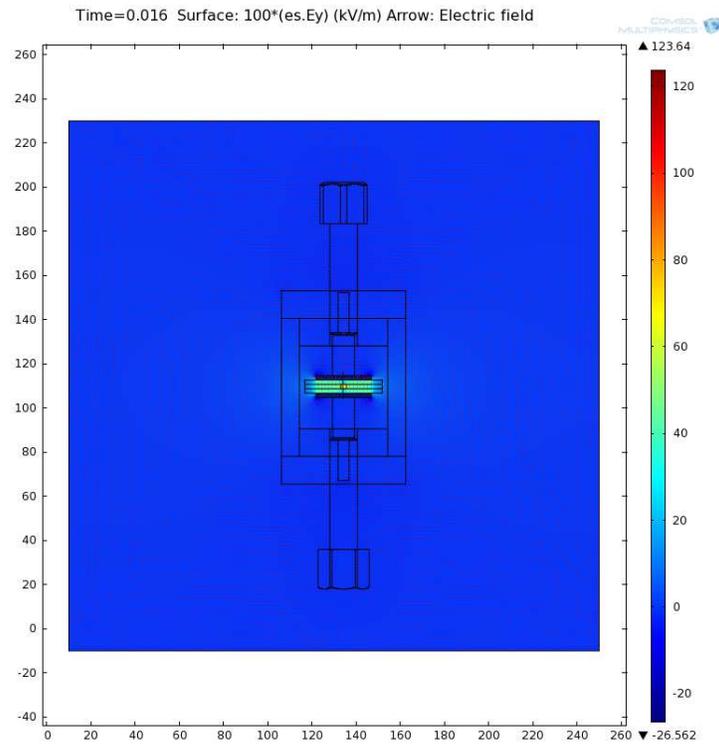
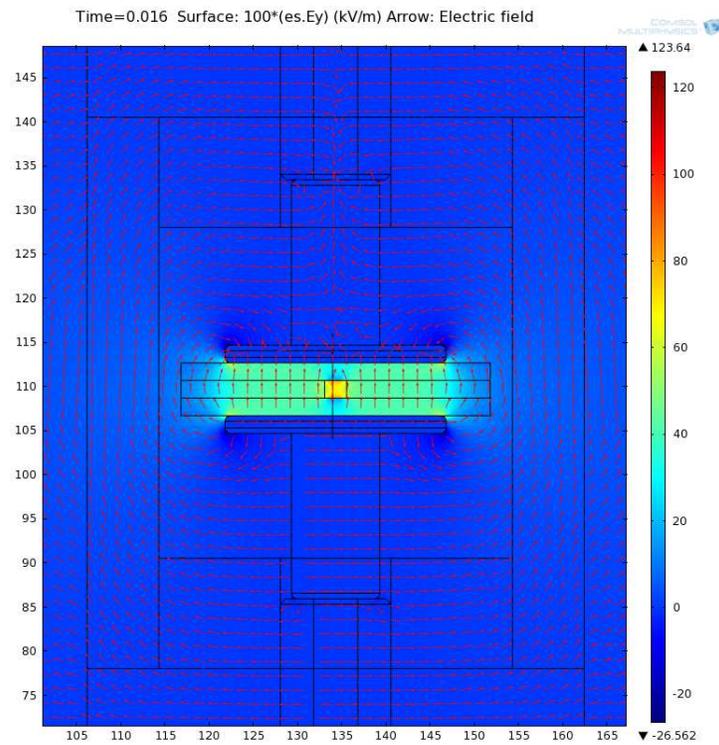


Figura 4.4: Vista aproximada do modelo da estrutura importada para o *Comsol Multiphysics*.



(a) Vista Completa.



(b) Vista ampliada.

Figura 4.5: Gradiente de intensidade de campo elétrica distribuído no interior da estrutura simulada.

A curva representativa do campo elétrico no interior do defeito pode ser observada na Figura 4.6 e demonstra o quão alto podem ser a intensidade do campo elétrico no interior da falha. A curva representa o campo elétrico sobre a reta de monitoramento para diferentes valores de tensão aplicados ao eletrodo de ligado ao potencial de alta tensão.

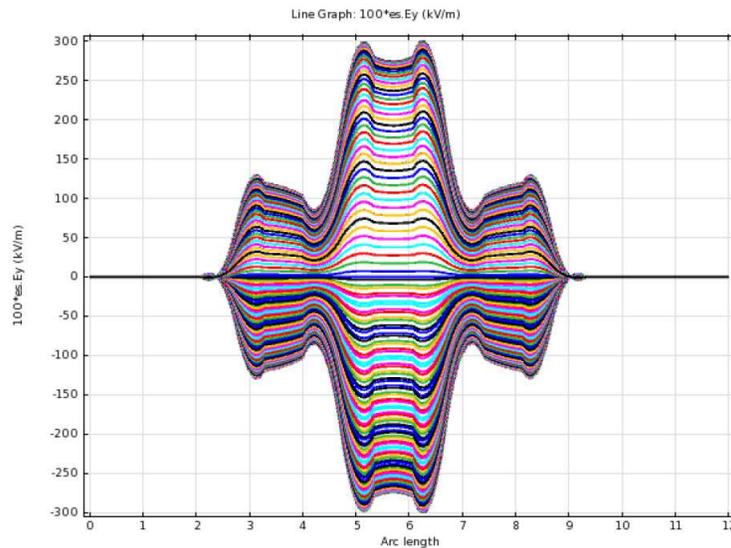


Figura 4.6: Curvas de intensidade de campo elétrico sobre a reta de monitoramento que passa pela falha de isolamento.

De posse de tais resultados simulados, a estrutura projetada foi construída, nas instalações do Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC - Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), para implementação das rotinas de testes com geração de descargas parciais. A estrutura utilizou os mesmos materiais especificados no projeto, com exceção dos eletrodos que foram projetados em cobre, porém foram construídos em latão. Além dessa mudança, foi necessária a inserção de uma borracha de vedação entre as tampas (superior e inferior) e o tubo de acrílico, para contenção do óleo usado como isolante para minimizar a geração de corona no interior da estrutura além de dois furos na lateral do tubo de acrílico para injeção e retirada do óleo, Figura 4.7. Além da configuração de eletrodos do tipo plano-plano, foram construídos diferentes tipos de eletrodos para posteriores testes e geração de diferentes tipos de defeitos, como por exemplo, corona intencionalmente criada com um eletrodo do tipo ponta.



Figura 4.7: Fotografia da estrutura desenvolvida para geração de DP internas.

Além da célula desenvolvida, a partir de agora chamada de BR1, foram utilizadas células de geração de Descargas Parciais baseadas nos projetos de Hampton et al [36]. Tais células encontram-se no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de *Strathclyde* (UoS - *University of Strathclyde*) no Reino Unido. Do mesmo modo que a célula BR1, as células utilizadas na UoS, foram conectadas a um potencial de alta tensão aplicado no eletrodo superior, enquanto que o eletrodo inferior é conectado a terra. Foi testada uma célula (UK1) contendo óleo de transformador, referência L10B, no qual uma partícula metálica livre é situada num prato côncavo de alumínio, permitindo que esta partícula retorne a uma posição estável quando o campo elétrico é cessado, como observado na Figura 4.8. Além da célula com óleo de transformador, foram testadas células com gás  $SF_6$ , onde um cilindro de acrílico e parafusos de nylon conectados as tampas de alumínio superior e inferior, proporcionam um recipiente pressurizado capaz de suportar níveis de pressão de até 0,4 MPa (4 bar), as células com  $SF_6$ , possuem como configuração ponta-plano e partícula livre, Figuras 4.9 (célula UK2) e 4.10 (célula UK3), respectivamente. Foi utilizada também uma célula com ar como gás isolante, Figura 4.11 (célula UK4). Mais detalhes sobre as células utilizadas podem ser encontrados em [85].

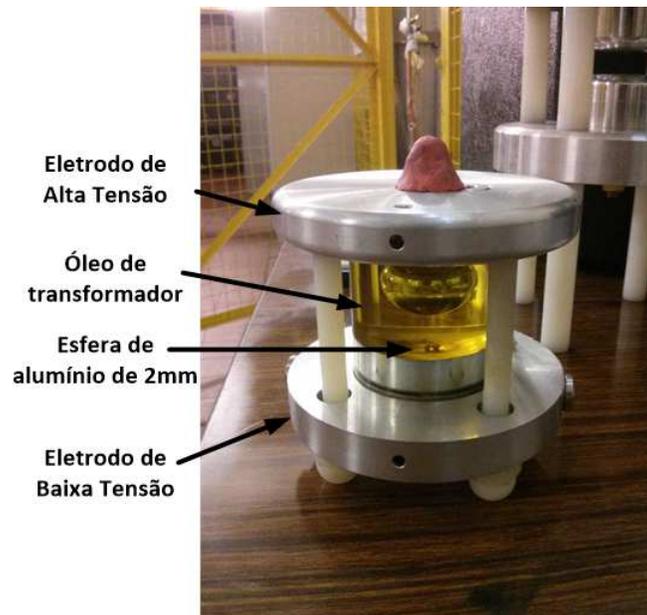


Figura 4.8: Fotografia da célula geradora de DP com partícula de alumínio livre em óleo de transformador (Célula UK1).

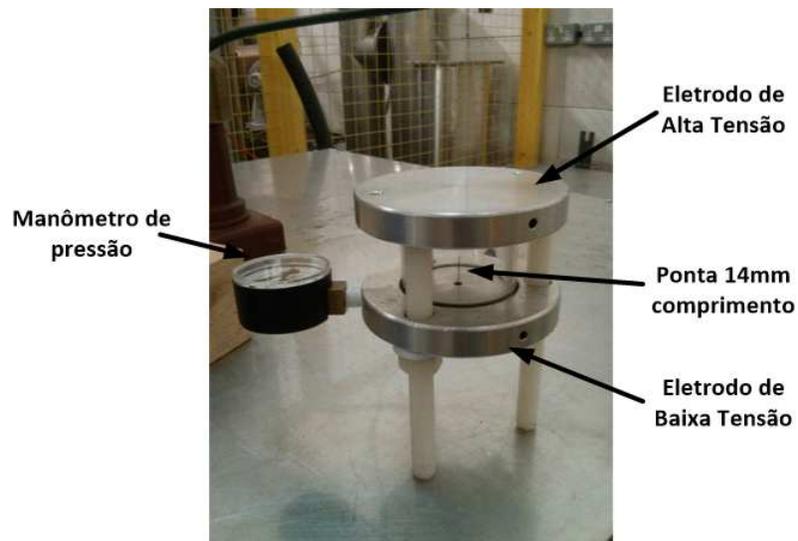


Figura 4.9: Fotografia da célula geradora de PD com configuração Ponta-plano em  $SF_6$  (Célula UK2).

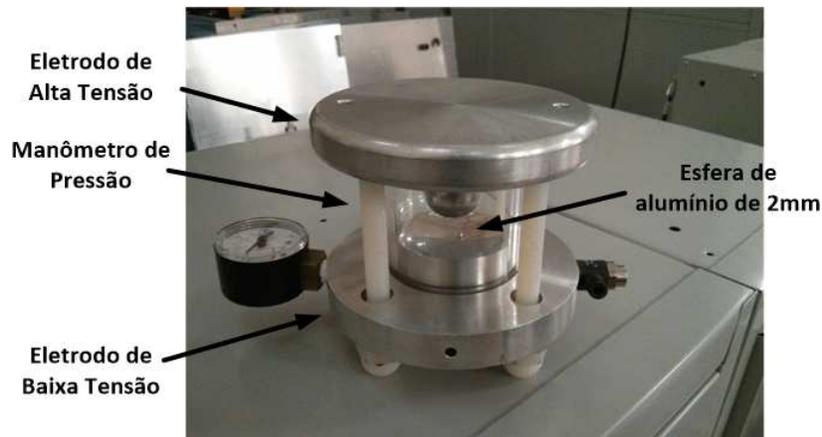


Figura 4.10: Fotografia da célula geradora de PD com partícula de alumínio livre em  $SF_6$  (Célula UK3).

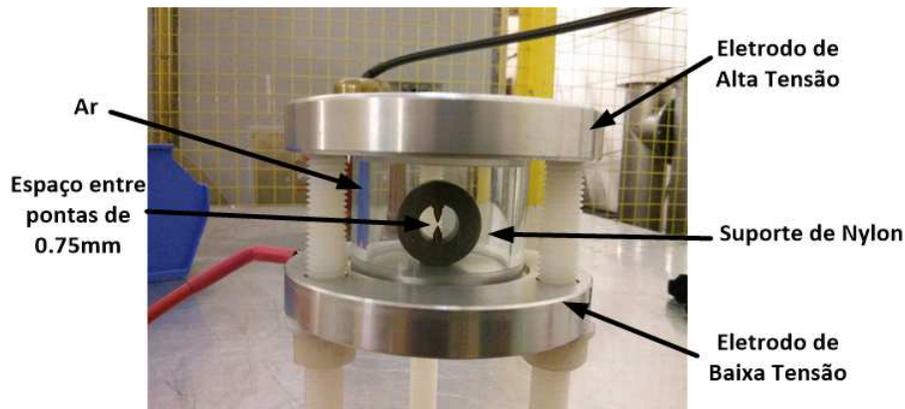


Figura 4.11: Fotografia da célula geradora de PD com eletrodo do tipo ponta flutuante (Célula UK4).

### 4.3 Potência de RF versus Intensidade das DP – Proposta de uma Relação Estatística

A medição de descarga parcial é uma técnica de monitoramento de condição estabelecida utilizado para facilitar a detecção de falhas incipientes em sistemas de isolamento elétrico de alta tensão. Ao gravar simultaneamente descarga parcial usando tanto o método clássico, por uso da 'carga aparente', como técnica de medição e a técnica de medição radiométrica, que mede a energia irradiada a partir da descarga, pensa-se que

mais informações podem ser obtidas sobre a natureza da fonte de DP. Medições foram realizadas usando as mais comuns topologias de fontes de DP recriadas sob condições laboratoriais usando células de teste com diferentes tipos de meios isolantes, tais como  $SF_6$ , óleo e resina epóxi. A geometria das células de teste incluem eletrodos flutuantes, partículas livres e saliências. Traçando carga aparente contra a energia do sinal de RF para um grande número de pulsos DP, a relação entre as duas técnicas pode ser quantificada para uma determinada configuração de teste [85], [52].

### 4.3.1 Metodologia Experimental

O monitoramento usando um sistema comercial LDS-6 para medição de DP e diagnóstico, foi realizado. Este equipamento é fabricado pela Lemke do Grupo Doble e tem como objectivo validar as medições feitas usando a antena *diskcone*. O DUT (DUT - *Device Under Test*) usado nas medições são as células geradoras de DP desenvolvidos na Universidade de *Strathclyde* para permitir DP serem gerada de forma reproduzível. Para as medições aqui relatadas as células DP foram energizados utilizando os níveis de tensões entre 5 e 15 kV, por meio de uma fonte de alimentação controlada. O LDS-6 detector de DP foi projetado para facilitar a metodologia especificada pelo padrão IEC60270. A supressão de ruído externo é conseguida usando uma antena separada. Informação adicional pode ser encontrada em [88].

Alguns dispositivos (por exemplo, controladores de frequência variável, ferramentas eléctricas, etc) cria impulsos eletromagnéticos curtos na forma de ruído de chaveamento. O espectro destes pulsos é semelhante ao do espectro de pulso DP, de forma que não podem, simplesmente, ser filtrados. Podem ser distinguidos por uma antena, no entanto, localizada de tal modo que apenas os impulsos de "ruído" (não os pulsos DP) são recebidos. A unidade de sensoriamento suprime a medição nos momentos que os pulsos de ruído ocorrer. Porque os sinais DP e o ruído são estatisticamente independentes, as medições de DP ainda podem ser devidamente analisadas, apesar de coocorrência de eventos DP será suprimida com o ruído [60].

As medições radiométricas foram realizadas usando uma antena *diskcone* conectada a um osciloscópio de 1 GHz, 10 GS/s de modelo Lacroy 104xi. A antena *diskcone* [70] é uma variação monopolar da antena bicônica. É de baixo ganho, omnidirecional, linearmente polarizada e tem banda larga. É também uma estrutura assimétrica e, portanto, não requer um balun para uma alimentação coaxial. A geometria da antena

está relacionada com a frequência de corte da sua banda projetada [69].

Os experimentos foram realizados no laboratório de alta tensão (*Institute for Energy and Environment*) das dependências do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de *Strathclyde* - UoS, em Glasgow na Escócia, Reino Unido. Este laboratório tem 20 m de comprimento e 12,25 m de largura e é cercado por uma rede metálica aterrada no interior das paredes de tijolos que o formam, de modo a protegê-lo e isolá-lo. No interior do laboratório existe também a presença de varias estruturas metálicas, como antenas, contêineres, cadeias de isoladores, dentre outros. A célula geradora de DP permanece durante todo o experimento no interior de um cercado metálico, também aterrado, que visa proteger o operador da alta tensão aplicada.

Dois conjuntos de medições foram realizados com diferentes objetivos. No primeiro a antena foi posicionada 1,5 m do DUT (a célula DP), polarizada verticalmente, para obter pulsos de DP de amplitudes diferentes, representando diferentes níveis de DP, de acordo com cada célula utilizada. No segundo, a antena foi posicionada no lado de fora da gaiola de proteção e deslocada de sua posição inicial, 1,5 m afastada do DUT, até a posição de 12 m de distancia em relação à fonte de DP, esse deslocamento foi realizado com passos de 1,5 m e 2 m. Na Figura 4.12 pode-se observar a configuração usada no primeiro conjunto de medições.

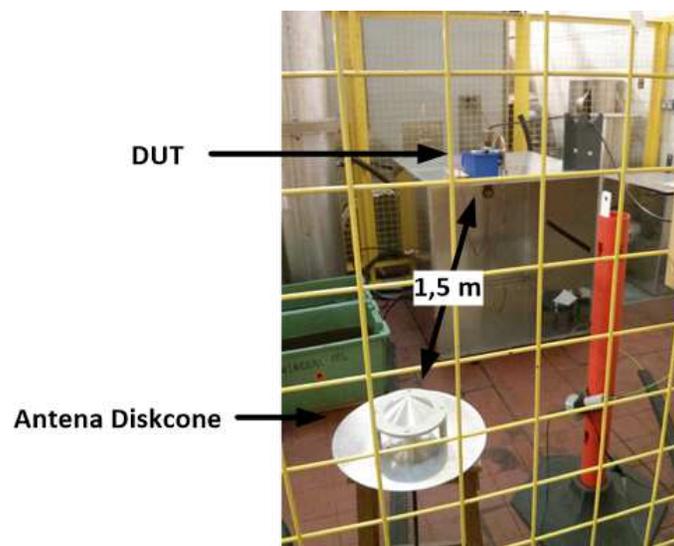


Figura 4.12: Arranjo de medição usando a antena *diskcone*.

A calibração do sistema convencional de medição é feita de acordo com IEC60270. Uma vez que a capacitância do objeto de teste, DUT, afeta as características do circuito,

a norma IEC especifica que a recalibração deve ser realizada para cada novo objeto de teste, a menos que a nova capacitância seja de 10% do valor anterior. A calibração do sistema é realizada através da injeção de impulsos de corrente de carga de magnitude conhecida entre os terminais do DUT e é realizada na faixa pertinente de magnitudes de DP esperadas [52].

Devido à natureza ressonante complexa do pulso de RF, a amplitude do pico pode não ser a melhor abordagem para comparar com a intensidade de DP em pC obtidos pelo sistema de medição de DP convencional. O cálculo da energia de RF acumulada é preferível uma vez que esta quantidade tem em conta todos os pontos sobre a curva, Figura 4.13. A energia de RF acumulada é essencialmente a integral no tempo discreto do pulso de RF e é calculado utilizando a seguinte equação:

$$U_i = U_{i-1} + \Delta T \sum_{i=1}^n \frac{V_i^2}{R} \quad (4.2)$$

onde  $U_i$  é a energia acumulada do sinal discreto no tempo, no ponto  $i$ ,  $U_{i-1}$  é a energia acumulada dos pontos anteriores do conjunto de amostras,  $\Delta T$  é o tempo entre amostras,  $V_i$  é a  $i_{th}$  amostra do sinal de RF, e  $R$  é a impedância de entrada do osciloscópio (50 Ohms) [52].

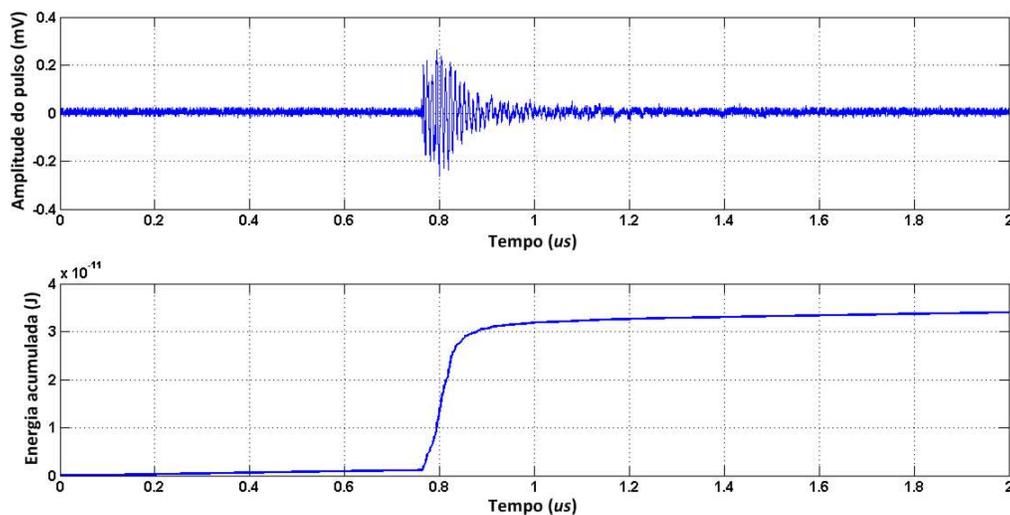


Figura 4.13: Curva do Sinal de RF produzida por um eletrodo do tipo ponta flutuante (curva superior). Curva da energia do sinal de RF acumulada com o tempo (curva inferior). A energia total acumulada corresponde a energia no ponto em  $2 \mu s$ .

### 4.3.2 Resultados Obtidos

Os pulsos gerados pelas células DP foram registados pelo osciloscópio e estas medições de DP foram comparadas com os dados fornecidos pelo LDS-6. O nível de intensidade DP pode variar com o tempo e com as diferentes configurações das células DP utilizadas, como é possível observar através dos resultados obtidos. O valor da intensidade DP obtida através do LDS-6 durante a medição varia dependendo de qual célula foi usada como DUT, o nível mínimo de DP obtido foi de 7 pC e o máxima foi de 1780 pC. Estes valores foram comparados com a média da energia de RF acumulada de cada impulso registrado para o nível considerado de DP. Para entender melhor as experiências realizadas a Tabela 4.1 resume as características importantes de todas as medições.

Tabela 4.1: Resumo com os dados dos experimentos realizados.

| Experimento | Distancia da Antena (m) | Célula/Posição | Intensidade (pC) | Tensão aplicada (kV) | Pulsos Gravados |
|-------------|-------------------------|----------------|------------------|----------------------|-----------------|
| 1           | 1,5                     | BR1/Vertical   | 1780             | 15                   | 20              |
| 2           | 1,5                     | BR1/Horizontal | 1217             | 15                   | 20              |
| 3           | 1,5                     | UK1/Vertical   | 7                | 15                   | 20              |
| 4           | 1,5                     | UK2/Vertical   | 7                | 13                   | 20              |
| 5           | 1,5                     | UK2/Horizontal | 77               | 6                    | 20              |
| 6           | 1,5                     | UK3/Vertical   | 96               | 11                   | 20              |
| 7           | 1,5                     | BR1/Vertical   | 360              | 15                   | 50              |
| 8           | 1,5                     | UK4/Vertical   | 641              | 5                    | 50              |
| 9           | 1,5                     | UK4/Horizontal | 639              | 5                    | 50              |
| 10          | 1,5                     | UK4/45°        | 638              | 5                    | 50              |
| 11          | 1,5                     | UK4/Vertical   | 628              | 5                    | 50              |
| 12          | 2,5                     | UK4/Vertical   | 638              | 5                    | 50              |
| 13          | 3,5                     | UK4/Vertical   |                  | 5                    | 50              |
| 14          | 4,5                     | UK4/Vertical   |                  | 5                    | 50              |
| 15          | 6,5                     | UK4/Vertical   |                  | 5                    | 50              |
| 16          | 8,5                     | UK4/Vertical   |                  | 5                    | 50              |
| 17          | 10                      | UK4/Vertical   |                  | 5                    | 50              |
| 18          | 12                      | UK4/Vertical   |                  | 5                    | 50              |

Os experimentos 1 e 2 foram feitos com o mesmo defeito de isolamento no interior da célula BR1, o que explica a intensidade de DP ter o mesmo nível (1000 de pC). A fonte de alimentação de alta tensão foi ligada no início de cada experimento (1 e 2) e,

em seguida, desligada. Para realizar o ensaio 7, com a mesma célula (BR1), uma nova falha de isolamento foi usada gerando uma diferença entre o nível de DP das experiências 1 e 2, em comparação com a experiência 7. Para o experimento 3 foi utilizada a célula UK1. Apesar de o uso de uma mesma célula DP (UK2) nos experimentos 4 e 5, a intensidade de DP é bastante diferente entre as experiências. Esta alteração foi observada após a nova posição assumida pela célula, que foi a única alteração significativa na configuração utilizada. Também neste caso, a tensão de alimentação foi desligada entre as experiências (4 e 5). O experimento 6 utilizou a célula UK3. As experiências 8, 9 e 10 foram feitas usando a célula geradora de DP estável. Cada teste foi feito separadamente, com o acionamento e desligamento da tensão de alimentação em cada experimento. Para os experimentos de 11 a 18 o fornecimento de energia foi ligado e desligado apenas uma vez. Estes experimentos foram realizados todos sobre uma linha radial em relação a fonte geradora, apenas mudando a distância da antena.

Cada experimento teve o seu comportamento de DP analisado com o uso do sistema comercial LDS-6, e a partir dessa análise pode-se observar que, a célula UK4 fornece um padrão DP muito estável, gerando intensidade DP quase no mesmo valor em todos os experimentos. Na Figura 4.14 pode-se observar, como exemplo, o resultado proporcionado pela atividade de DP gerada pela célula UK4 no experimento 9. No Apêndice B pode-se observar todos os resultados dos experimentos realizados para caracterização das células geradoras de DP.

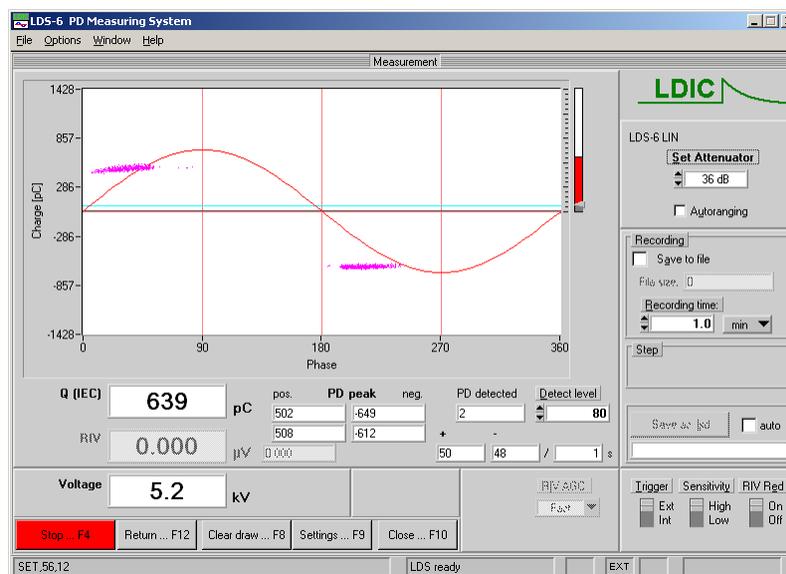


Figura 4.14: Tela com o padrão de intensidade das DP geradas no experimento 9, usando a célula UK4 e obtida com uso do sistema comercial LDS-6.

Para realizar uma análise estatística dos dados, a média e o desvio padrão da energia acumulada de cada experimento para cada nível de intensidade DP foi calculado com base no número de pulsos registrados, Tabela 4.2. A porcentagem de variação da energia comparada com a energia média também foi calculada para observar melhor a estabilidade das células de DP. A energia acumulada para a medição com variação de distância também foi calculada e os resultados podem ser observados na Tabela 4.3, para este conjunto de medições a cada distância 50 pulsos foram registrados. A intensidade DP para este conjunto de medidas, obtidas pelo equipamento de validação, foi 638 pC, e seu padrão pode ser observado na Figura B.11. Uma visão mais qualitativa da variação de energia pode ser observado na Figura 4.15.

Tabela 4.2: Dados referentes a energia acumulada para cada intensidade de DP.

| Intensidade (pC) | Energia acumulada média (J) | Desvio padrão | (%) da variação de energia | Número de amostras | Célula |
|------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------|--------------------|--------|
| 7                | 9,2722e-15                  | 1,2589e-15    | 13,57                      | 20                 | UK2    |
| 7                | 9,9621e-15                  | 2,0004e-15    | 20,07                      | 20                 | UK1    |
| 77               | 9,8003e-15                  | 1,4401e-15    | 14,69                      | 20                 | UK2    |
| 1217             | 6,4041e-14                  | 1,5433e-14    | 24,09                      | 20                 | BR     |
| 1780             | 1,1733e-13                  | 3,8948e-14    | 33,19                      | 20                 | BR     |
| 96               | 1,3316e-14                  | 1,2833e-15    | 9,63                       | 20                 | UK3    |
| 370              | 6,7148e-14                  | 3,6698e-14    | 54,65                      | 50                 | BR     |
| 641              | 4,0124e-11                  | 1,4655e-12    | 3,65                       | 50                 | UK4    |

Tabela 4.3: Dados referentes a variação da energia acumulada com a distância.

| Distância (m) | Energia acumulada média (J) | Desvio padrão |
|---------------|-----------------------------|---------------|
| 1.5           | 2,5701e-12                  | 8,3664e-13    |
| 2.5           | 2,3395e-12                  | 8,4911e-13    |
| 3.5           | 1,8463e-12                  | 5,2282e-13    |
| 4.5           | 1,6556e-12                  | 5,7099e-13    |
| 6.5           | 1,2763e-12                  | 4,6252e-13    |
| 8.5           | 7,0236e-13                  | 2,2780e-14    |
| 10            | 8,3539e-13                  | 4,4105e-14    |
| 12            | 3,7805e-13                  | 1,1715e-14    |

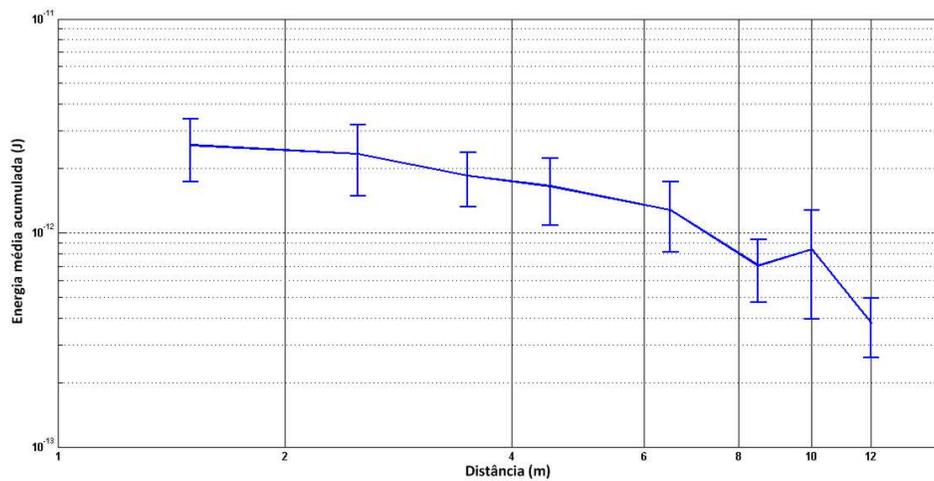


Figura 4.15: Curva da variação média da energia acumulada com a distância.

## 4.4 Modelo de Canal

O meio de propagação ou caminho eletromagnético ligando o transmissor ao receptor é chamado canal. Em geral, um canal de comunicação pode consistir de fios, cabos coaxiais, cabos de fibra óptica, e, no caso de ligações de RF, guias de onda, a atmosfera, ou o espaço livre [94]. Um modelo de canal representa teoricamente as características do meio que o sistema de comunicações utiliza para transmitir dados e deve conter informações sobre as características de perdas as quais o sinal que o utiliza será submetido. Muitas vezes, a complexidade e variabilidade do canal torna difícil a obtenção de um modelo de canal determinístico preciso. Para esses casos modelos estatísticos são usados frequentemente [31]. Para um *link* RF o modelo de canal mais simples assume uma propagação do sinal em um espaço livre. A complexidade desse modelo de canal aumenta quando a superfície da terra ou o meio ambiente são tidos em conta.

### 4.4.1 Propagação no Espaço Livre e Plano de Terra

A fórmula básica para as perdas de transmissão em *Watts* no espaço livre é dada pela Equação 4.3 [30]:

$$C = P_t G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_r \quad (4.3)$$

onde,  $P_t$  é a potência transmitida em dBm,  $G_t$  é o ganho da antena transmissora,  $\lambda$  é o comprimento de onda em m,  $R$  é a distancia entre as antenas em m e  $G_r$  é o ganho da antena receptora. A quantidade  $P_t G_t$  é chamada potencia radiada isotrópica efetiva (EIRP - *Effective Isotropic Radiated Power*) e a quantidade  $[\lambda/(4\pi R)]^2$  é chamada de perdas de caminho do espaço livre (FSPL - *Free Space Path Loss*). Deve-se observar que a FSPL é uma função do comprimento de onda [30]. Em aplicações mais gerais de RF o modelo de propagação pode ser de dois tipos, físico e empírico. O modelo físico quando normalmente adotado tem a vantagem significativa de portabilidade, i.e. o modelo físico pode ser utilizado em uma variedade de ambientes sem requerer um trabalho extenso de coleta de informações de propagação em cada um dos ambientes. O modelo físico plausível mais simples para um terreno predominantemente plano esperado é um modelo de dois raios que considera os caminhos direto entre os módulos e o sinal propagado no solo.

A potência do sinal refletido no solo depende de características como comprimento da antena, geometria do *link* de comunicação, características elétricas do solo no ponto de reflexão e rugosidade do solo neste mesmo ponto. Um coeficiente de reflexão complexo,  $\rho e^{j\phi}$ , pode ser definido tal que  $\rho$  é a razão da magnitude da potência do campo da onda refletida em relação a onda incidente e  $\phi$  é o avanço de fase que ocorre nessa reflexão. O coeficiente de reflexão para um campo incidente polarizado paralelamente a superfície de incidência é dado pela equação de Fresnel (Equação 4.4)[42, 106]:

$$\rho_{\parallel} = \frac{(k_2/k_1)^2 \cos\theta_i - \sqrt{(k_2/k_1)^2 - \sin^2\theta_i}}{(k_2/k_1)^2 \cos\theta_i + \sqrt{(k_2/k_1)^2 - \sin^2\theta_i}} \quad (4.4)$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes apropriadas ao meio, para o meio de transmissão e a superfície incidente, respectivamente, e  $\theta_i$  é o angulo de incidência. Seja o meio de transmissão o ar, o  $k$  utilizado pode ser representado por  $k_1 = 2\pi/\lambda$ . A constante de propagação complexo ao quadrado é dado, por (Equação 4.5):

$$k^2 = w^2 \varepsilon \mu - j w \sigma \mu \quad (4.5)$$

onde  $w = 2\pi f$  é a frequência angular,  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica do meio,  $\mu$  é a permeabilidade magnética e  $\sigma$  é a condutividade elétrica.

A magnitude do coeficiente de reflexão de Fresnel é reduzida pelo fator de rugosidade de Rayleigh utilizado para adicionar as perdas devido a difusão da onda refletida no solo. Este fator é dado pela Equação 4.6:

$$R_o = e^{-8\{\pi s(\sin\gamma)/\lambda\}^2} \quad (4.6)$$

A rugosidade da superfície ( $s$ ) no contexto da reflexão depende não somente da escala das alturas aleatórias que o solo pode assumir, mas também do complemento do ângulo de incidência ( $\gamma$ ). Assumindo que os ângulos de partida e de chegada do raio refletido no chão, para transmissores e receptores, é pequeno comparada ao comprimento das antenas (quer dizer, não há uma redução significativa no ganho da antena devido ao caminho do raio refletido estar fora do eixo de propagação) então a potência do sinal recebido na antena receptora será modificado pelo fator de ganho do plano de terra  $F$  (Equação 4.7):

$$F = 1 + \rho_{ef} e^{-j2\pi(d_2-d_1)/\lambda} \quad (4.7)$$

onde  $d_1$  e  $d_2$  correspondem aos caminhos de propagação em linha de visão e refletido no solo, respectivamente, além de  $\lambda$  corresponder ao comprimento de onda do sinal. A potência total recebida é então dada pela Equação 4.8:

$$P_r = P_t G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_r \times |F|^2 \quad (4.8)$$

Como podemos observar pela Equação 4.8, no modelo dos dois raios, a contribuição das perdas de sinal referente ao ambiente é inserida na equação do FSPL através do fator de ganho  $F$ .

#### 4.4.2 Interferência Coerente e Ruído Branco

Uma das maiores dificuldades no monitoramento das descargas parciais é associada ao nível muito baixo de energia transmitido. Essa característica é ainda mais prejudicada quando se leva em consideração um alto nível de ruído presente no ambiente de medição. Esse ruído associado à medição pode comprometer por completo a análise do pulso. Existem basicamente dois tipos de interferência que causam grande impacto na transmissão do sinal das descargas parciais, a interferência coerente, causada por transmissões de sinais de rádio e o ruído branco [58]. Ambas possuem uma larga banda, no caso do ruído branco e um grande numero de componentes no caso das varias portadoras de radio usadas nas mais diversas formas de comunicação, como por exemplo, dispositivos de curto e médio alcance (controle remoto, comunicação móvel, dentre outras), rádios FM, TV (UHF e VHF), etc. Tais dispositivos são regulamentados pela

ITU (ITU - *International Telecommunication Union*) com uma potência máxima a ser transmitida. Cada portadora é representada no tempo por um sinal senoidal modulado tais sinais alteram a característica do pulso de descarga parcial além de aumentar o nível de potencia dentro da banda monitorada. De acordo com [109] “Ruído branco é o ruído que mais influencia na medição de descargas parciais”. Várias técnicas para eliminação de ruído já foram apresentadas na literatura, a maioria delas usam transformadas *Wavelet* para tal processo.

## 4.5 O Sistema de Detecção não Sincronizado

O sistema proposto e implementado usa sinais não correlacionados e não sincronizados para localização de descargas parciais. Essa alternativa proporciona a implementação de uma rede simples, onde os nós sensores são de complexidade tecnológica baixa, deixando-os baratos, e tornando a rede expansível de forma rápida e fácil. Tais pontos podem ser atingidos pelo uso de uma rotina de localização baseada na comparação de potências recebidas em diferentes posições.

Para implementar tal sistema, o processo para medir a potência irradiada a partir da fonte DP é um ponto-chave para sua confiabilidade. O pulso DP irradiado obtido é um sinal estreito com baixa amplitude (algumas dezenas de mV quando monitorado a curtas distâncias, inferior a 10 m), o que significa que um sistema de detecção com alta taxa de amostragem deve ser usado para monitorar tal atividade. Este dispositivo de aquisição, normalmente um osciloscópio de alta taxa de amostragem proporciona um aumento de custos. Uma abordagem baseada em um detector de envoltória para reduzir a frequência de amostragem, pode ser uma solução razoável para a obtenção de resultados confiáveis [Apêndice A - Artigo 8 da lista de artigos publicados].

### 4.5.1 O Problema da Relação Sinal/Ruído

Como os sinais de DP são impulsivos (durações de pulso medido em  $ns$ ) a sua largura de banda é grande (algumas centenas de MHz). A largura de banda dos sensores receptores terá de ser correspondentemente grande e o ruído recebido irá, portanto, ser elevado. Se os sinais são detectados incoerentemente (em vez de através da correlação entre os sinais de receptor separados espacialmente), então existe um problema de sinal/ruído, e assim o problema da sensibilidade/alcance, é algo que pode colocar a aplicação em risco.

#### 4.5.1.1 Resolução Temporal e Restrições Tecnológicas

O aumento da resolução de tempo pode minimizar este problema da seguinte maneira: se forem detectados os pulsos individuais então a relação sinal/ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*) será elevada para a curta duração do pulso (em outras vezes o SNR é zero, isto é, nenhum sinal). Esta solução é superficialmente atraente até que o desafio de proporcionar uma conversão analógica para digital (AD - *Analog to Digital*) adequadamente rápida é considerada. Embora seja tecnicamente possível amostrar o sinal DP recebido suficientemente rápido para captar os impulsos de curta duração (período durante o qual SNR é alta) o *hardware* necessário se tornará mais complexo e caro. Pior, a potência necessária para executar um conversor AD rápido seria onerosa. Além disso, o processamento de sinal adicional no nó seria necessário ou grandes quantidades de dados brutos teriam de ser transmitidos de volta para um ponto de coleta de dados para processamento. Nenhuma dessas opções é atraente, já que ambos irão aumentar as necessidades de energia ainda mais. Os nós terão de operar por longos períodos (pelo menos 12 meses) entre os eventos de manutenção e tecnologias de bateria e de captação de energia (por exemplo) vão ser capazes de suportar apenas as soluções de energia mais baixas.

#### 4.5.2 Detector de Envoltória como um Mecanismo para Troca de Custos

Um possível compromisso entre um rápido (centenas de MHz - GHz) ADC capaz de detectar impulsos DP (com alta SNR) e com uma baixa taxa de amostragem para medição simples de energia (com baixa SNR e tempo de integração medido em segundos) pode ser a utilização de um detector de envoltória para assegurar aos impulsos um decaimento com uma constante de tempo, talvez, uma ordem de grandeza menor do que a média de intervalo esperado entre pulsos DP (ou seja, dezenas - centenas de ms). Isto permite que um conversor AD significativamente mais lento (dezenas - centenas de kHz) possa ser usado, o qual é capaz de capturar o sinal de saída do detector de envoltória com fidelidade suficiente. A probabilidade de detectar o sinal perto de seu pico (e, assim, garantir uma medição de alta SNR) aumenta com a frequência de amostragem, assim como o custo (em R\$) do conversor AD e o custo (em *Watts*) da potência necessária. O detector de envoltória, por conseguinte, pode proporcionar um meio eficaz para reduzir a taxa de amostragem e, assim, compreender um baixo custo,

ao sistema com baixo consumo de energia.

### 4.5.3 Proposta de uma Arquitetura para o Receptor

O modelo de simulação proposto baseia-se nas características de transmissão do impulso, a partir da sua geração, até a sua medição por um sistema de monitoramento. O pulso DP é gerado usando um modelo de repetição, que é o modelo mais simples utilizado para fornecer informações para a atividade de DP. Este modelo usa experiências feitas anteriormente usando um gerador de DP bem definida composta por uma célula de acrílico e defeitos de isolamento criados para fins de simulação DP. O pulso radiométrico de DP gerado viaja através do sistema de alta tensão utilizando seus cabos e componentes metálicos como antenas, o que torna o processo de definir uma antena simples para representar o sistema HV, quase impossível sem uma abordagem empírica.

Para resolver este problema, a antena usada é representada por um amplificador, que correlaciona a intensidade DP (baseado nos pC obtidos durante o experimento) com a potência transmitida, e um filtro passa-baixa, que tem um ganho fixo de 0 dB em sua banda de passagem e uma frequência de corte de 700 MHz, como definido por uma revisão de literatura. Após o estagio da antena, o pulso DP viaja ao ar livre, sujeito a perdas de caminho de espaço livre, ruído de fundo (inerente a partir do ambiente de subestação) interferência de operadoras de televisão, estações de rádio, celular, etc. A próxima etapa é a de recepção, que é representado pelo sistema de monitoramento, o foco deste projeto. Esta fase está representada por uma antena receptora (representada por um filtro passa-banda), uma fonte de ruído simples (uma vez que o ruído dos componentes utilizados é negligenciado, isto é, ruído térmico e qualquer outra fonte de ruído estão incluídos nesta fonte), um amplificador de baixo ruído (LNA - *Low Noise Amplifier*), um filtro passa-alto, um detector de envoltória e o conversor analógico-digital (representado por um microcontrolador).

A fim de investigar a plausibilidade de tais argumentos uma simulação do processo de transmissão do sinal de DP de uma fonte até um sensor receptor foi implementada. O diagrama de blocos do sistema pode ser observado na Figura 4.16.

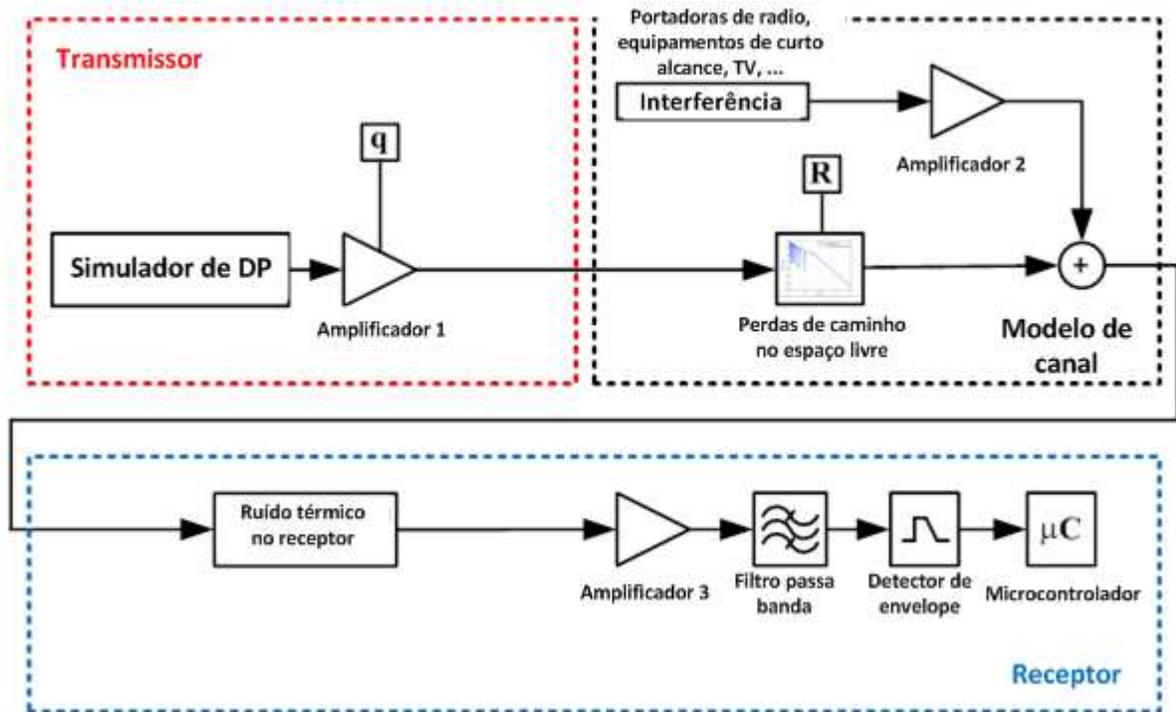


Figura 4.16: Diagrama de blocos do sistema simulado, onde  $q$  é a carga do pulso e  $R$  é a distância entre fonte e sensor.

## 4.6 Modelo de Simulação

O pulso simulado é gerado pela repetição do sinal de RF medido usando uma antena *diskcone* ligado ao osciloscópio de modelo Tektronix TDS 5104B com uma taxa de amostragem de 5 GS/s. Os pulsos de corrente simultâneos de DP também foram registrados num canal separado do osciloscópio utilizando um transformador de corrente de alta frequência (HFCT). Os pulsos de DP pela norma IEC também foram gravados usando um sistema de medição de DP comercial, o Doble Lemke LDS- 6. O arranjo utilizado para as medições pode ser observado na Figura 4.17. O gerador de descarga parcial foi feita a partir de um cilindro de acrílico com dois eletrodos planos do tipo disco, em paralelo [15]. Dois parafusos de nylon são usados para definir a distância entre os eletrodos que estão ligados à fonte de alimentação de alta tensão. Detalhes do gerador DP são dados em [61, 16]. Um pulso DP medido pode ser observado na Figura 4.18.

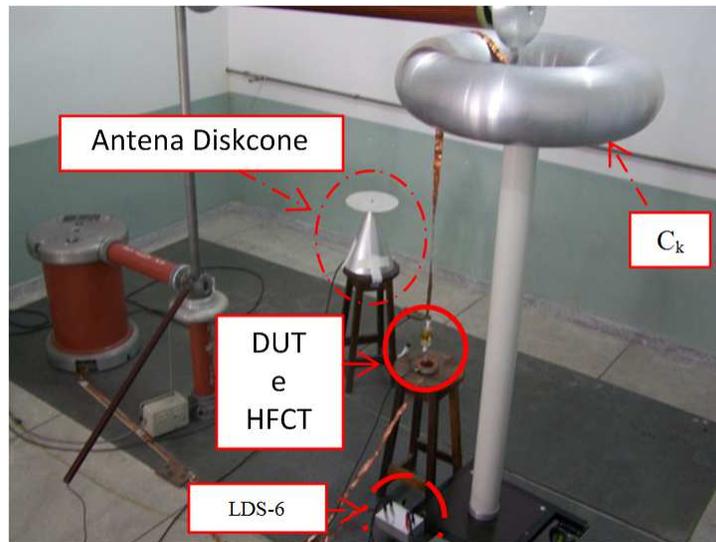


Figura 4.17: Esquema de medição usado.

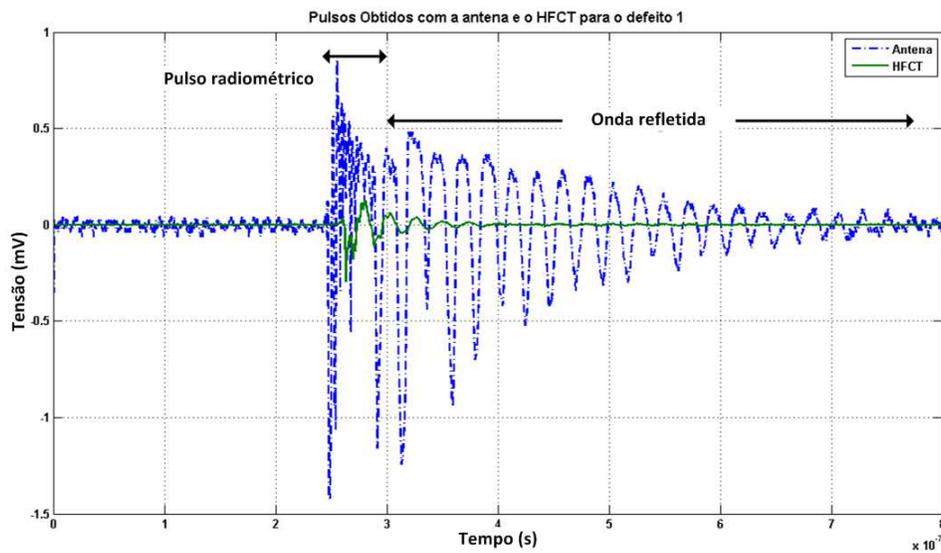


Figura 4.18: Pulso de DP com componente devido a uma antena não casada propriamente com o sistema de medição.

O SNR de pico da medição DP na Figura 4.18 foi de 24,6 dB. O ruído inerente ao DP repetido é, portanto, considerado negligenciável (uma vez que o SNR do sinal DP em receptores numa rede é provavelmente muito menor do que isto). O primeiro amplificador 1 (Figura 4.16), na cadeia dos subsistemas da Figura 4.16 é utilizado para ajustar a potência do sinal DP. Esta potência é determinada a partir da intensidade de DP (em pC) utilizando uma relação a ser determinada empiricamente por medição da

potência do sinal recebido DP usando uma antena *diskcone* e um analisador de espectro a uma distância de 1 m a partir de uma fonte de DP, cuja intensidade é em pC sendo medido usando a instrumentação do LDS-6 [19].

A resposta em frequência da estrutura de radiação é, em geral, desconhecida e vai depender da geometria e os materiais em particular no local da DP e a disposição dos condutores e isoladores que se afastam dela. Uma vez que um modelo de repetição do sinal DP está sendo usado aqui não é necessário nenhum modelo explícito da resposta de frequência da estrutura de radiação. Isso ocorre porque o efeito da resposta em frequência da estrutura de radiação já foi contabilizado na medição. Um argumento similar aplica-se a antena de recepção. Numa simulação em que o DP é gerado a partir de um modelo físico em vez de uma medida empírica, as respostas em frequência, tanto para estrutura transmissora quanto para a receptora teriam de ser representadas explicitamente na simulação. O modelo de perda de percurso utilizado para esta simulação é o modelo para propagação no espaço livre [82].

A interferência estreita, coerente, é representada por um conjunto de senoides (não moduladas). O número, frequência e potência dessas interferências irão variar de local para local e de tempo em tempo. Uma amostra deste processo aleatório foi obtida por medição no laboratório de alta tensão (LAT - Laboratório de Alta Tensão) da UFCG, como pode-se observar na Figura 4.19. As medições foram feitas sobre uma banda de 10 MHz à 2000 MHz, utilizando uma antena de *diskcone* e um analisador de espectro. Pelos dados apresentados na Tabela 4.4 pode-se observar as frequências das portadoras e potências extraídas das medidas e utilizadas na simulação relatada aqui.

O amplificador 2 (Figura 4.16), seguindo o gerador de interferência coerente permite que a potência bruta da interferência seja alterada. As frequências e as potências dos suportes individuais serão específicas para um determinado local e (provavelmente menores) para um determinado momento, mas, desde que existem (pelo menos) várias operadoras independentes que não são dominadas por um pequeno subconjunto (um ou dois), então provavelmente é a potência da interferência que é importante na avaliação da plausibilidade do sistema de detecção a ser considerada. Esta potencia bruta também será dependentes do local e hora considerado, assim um modelo das estatísticas espaciais e temporais desta potência dentro de uma determinada região geográfica seria útil para avaliar a proporção de sensores que operam de forma eficaz para uma determinada proporção de tempo ( Isto é equivalente a determinar a proporção de acontecimentos de DP de uma intensidade particular, que seria detectado com sucesso).

Tabela 4.4: Frequência e potência das portadoras usadas na simulação.

| Frequência (MHz) | Potência (dBm) |
|------------------|----------------|
| 29,9             | -39,69         |
| 69,7             | -53,70         |
| 94,58            | -45,27         |
| 158,3            | -52,52         |
| 189,1            | -56,52         |
| 209              | -57,63         |
| 228,9            | -58,53         |
| 253,8            | -58,27         |
| 293,6            | -59,64         |
| 477,75           | -59,67         |
| 527,4            | -60,2          |
| 880,6            | -56,81         |
| 1750             | -17,00         |

Um dos importantes mecanismos pelos quais um único transportador pode vir a dominar por pequenas frações de tempo é a presença de um telefone móvel celular perto a um sensor. Este cenário não é improvável no contexto de operações e engenheiros de manutenção, por exemplo, visitar o local onde uma rede de sensores é implantada. Uma medição de interferência foi, portanto, feita com um telefone celular colocado a 1 m da antena de medição (Este é o tracejado azul da curva na Figura 4.19).

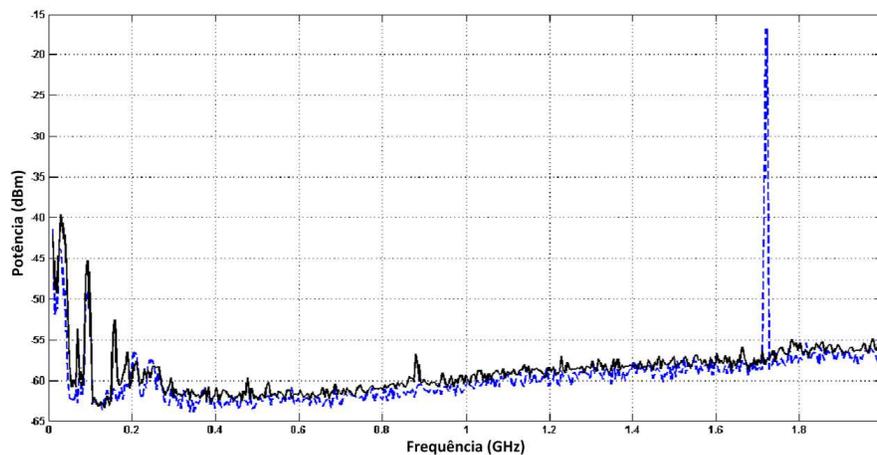


Figura 4.19: Interferência do ambiente medida: Curva preta sólida medida na ausência de um telefone móvel, curva azul tracejada na presença deste.

Desde que mudanças significativas na intensidade DP são relacionadas com as ten-

dências medidas ao longo (pelo menos) de muitas horas, e mais provavelmente, dias ou semanas, esses eventos "raros" quase certamente serão detectados e sinalizados como não significativos pelos algoritmos de processamento de dados. Na Figura 4.20 pode-se observar a estrutura do bloco de interferência usado na simulação, Figura 4.16.

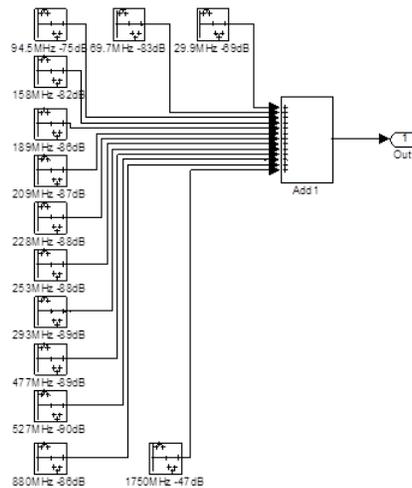


Figura 4.20: Soma de senoides representando as portadoras de sinais de comunicação sem fio e dispositivos similares.

O ruído branco gaussiano aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*) é adicionado na entrada do receptor assumindo uma temperatura de antena de 300 K. O amplificador 3 é incluído, principalmente, para permitir que o ruído do receptor interno seja adicionado. A figura de ruído deste amplificador para os resultados aqui apresentados foi escolhido para ser 3.0 dB. O ganho escolhida para ser de 0 dB uma vez que o detector de envoltória simulado é ideal. Numa aplicação prática do receptor o amplificador vai precisar ter ganho suficiente para que o sinal resultante conduza um detector de envoltória prático. A largura de banda do receptor é limitada por um filtro passa-banda de sexta ordem com frequência de corte inferior de 50 MHz e uma frequência de corte superior de 600 MHz. O detector de envoltória é um demodulador de amplitude ideal compreendendo um filtro passa-baixa, como observado na Figura 4.21. O filtro passa-baixa no detector de envoltória é de quarta ordem com frequência de corte de 50 MHz.

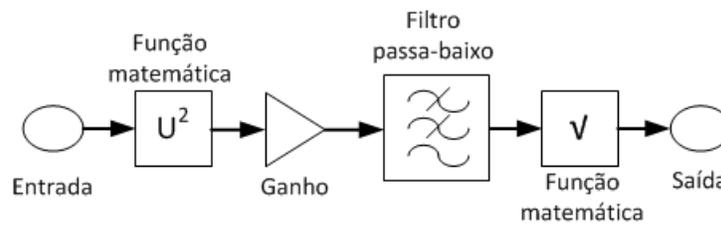


Figura 4.21: Diagrama de blocos da estrutura do detector de envoltória.

#### 4.6.1 Exemplo dos Resultados da Simulação

Na Figura 4.22, pode-se observar a relação sinal/ruído de pico do sinal pré detectado como função da distância entre sensor e fonte. Pela análise desta figura, pode-se concluir que a relação sinal/ruído é adequada até distâncias de pelo menos 50 m.

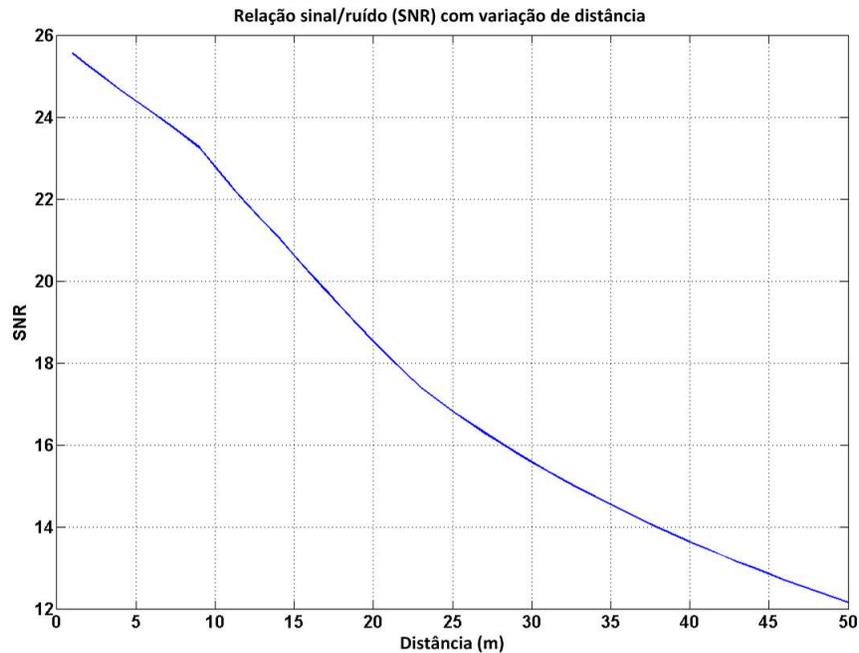


Figura 4.22: Relação sinal/ruído de pico para uma variação de distância de 50 m.

Nas Figuras 4.23 (a, b, c e d) pode-se observar o pulso retificado em diferentes distâncias 1, 10, 25 e 50 m em relação a fonte.

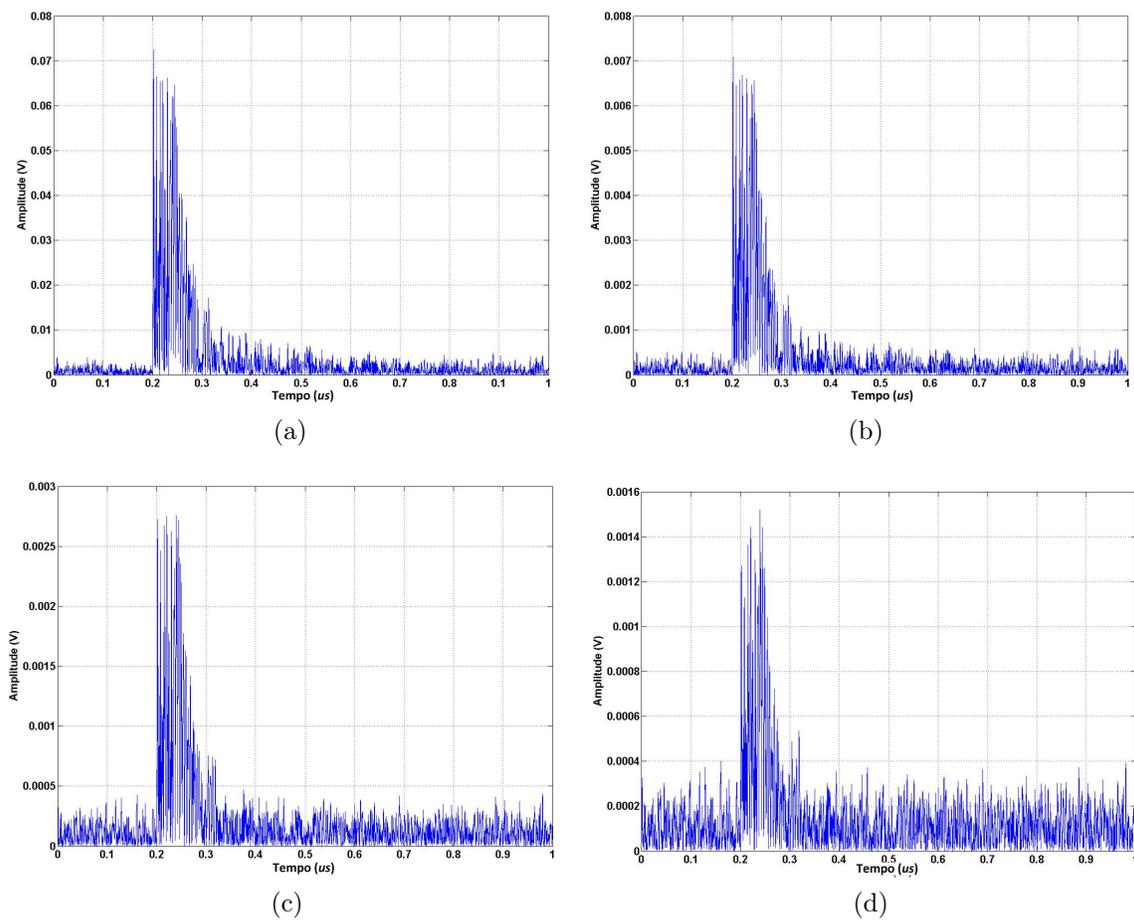


Figura 4.23: Simulação dos pulsos medidos em diferentes distâncias (a) 1 m, (b) 10m, (c) 25m e (d) 50m.

Nas Figuras 4.24 (a, b, c e d) pode-se observar o pulso na saída do detector de envoltória superimposto ao pulso retificado.

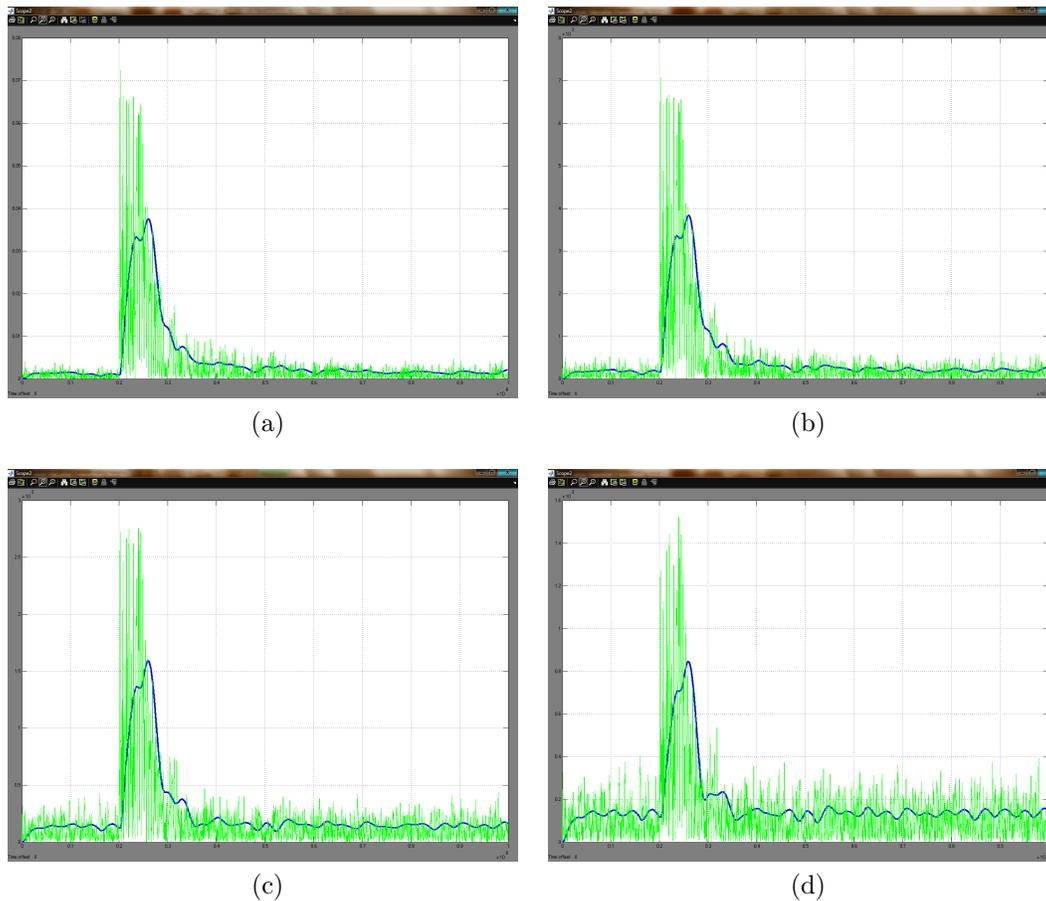


Figura 4.24: Sinal de DP (curva tracejada verde) e sinal do detector de envoltória (curva sólida azul) para diferentes alcances: (a) 1 m, (b) 10 m, (c) 25 m e (d) 50 m.

#### 4.6.2 Otimização dos Parâmetros do Receptor

A viabilidade do receptor depende do detector de envoltória, uma vez as fases anteriores do sistema já foram testadas com componentes reais. Sua sensibilidade permite medições dentro de um alcance de até 12 m, a partir de fontes de DP de 600 pC, com -30,45 dB a 12 m. Este é apenas um exemplo, mas para medições em um ambiente real deve ser utilizado um receptor mais sensível, pela utilização de um amplificador antes de o detector de envoltória. No entanto, esses resultados comprovam a eficácia do sistema para justificar a continuação do desenvolvimento da abordagem detector de envoltória para detecção DP radiométrica.

## 4.7 Características do Sistema de Detecção

O sistema implementado usa medidas apenas de amplitude de sinais de DP através de uma antena que leva a uma abordagem mais barata e mais escalável. Quanto mais próxima de um sensor é de uma fonte de DP, maior a amplitude do sinal DP será esperada. Tal sistema de forma clara, portanto, tem o potencial de ambos, monitorar mudanças temporais em DP (dando assim aviso de possível falha de equipamento) e localizar fontes de DP (identificando, assim, que item do equipamento está em risco de falha). A localização de fontes de DP poderia (em sua forma mais básica) ser associada aos itens de equipamento mais próximos do nó sensor que recebe o maior sinal de DP. Mais sofisticados algoritmos de localização podem usar métodos de *finger-print* para comparar a distribuição espacial das amplitudes de sinal DP com o registro de um gerador de sinal DP calibrado e movido sistematicamente através da área para o qual o sistema com sensores é projetado para monitorar (alternativamente, permanentemente instalado, com baixo ciclo de trabalho, emuladores de DP poderiam ser distribuídos através da subestação para esta função de calibração).

Para realizar tal sistema, pelo menos, um sensor, e preferível três ou mais sensores, devem estar suficientemente perto de cada fonte potencial de DP para ser capaz de detectar com segurança sinais DP significativas. Significativo neste caso implica sinais que são grandes o suficiente para sugerir degradação do isolamento que pode levar a uma falha catastrófica. Se a distribuição espacial dos sensores é suficientemente densa, considera-se que, esta condição pode sempre ser atendida. O custo da rede de sensores proposto, no entanto, deve ser aproximadamente proporcional ao número de nós. Redes arbitrariamente densas não são, portanto, práticas.

## 4.8 Conclusões

Uma simulação foi utilizada para investigar a plausibilidade e sensibilidade de um receptor radiométrico no espaço livre empregando detecção da envoltória do sinal medido. Dados medidos foram usados para modelar uma fonte de DP. Um modelo de perda de percurso em espaço livre foi utilizado para simular a perda de transmissão e interferência coerente de banda estreita foi modelada por meio da extração de um conjunto de portadoras do espectro de fundo medido. A largura de banda de pré detecção do receptor é de 550 MHz. A largura de banda de pós detecção é de 50 MHz. Isto parece produzir uma SNR satisfatória até um alcance de, pelo menos, 10 m com alcance máximo de 50 m. O detector de envoltória permite uma frequência de amostragem a

ser reduzida à custa da SNR e, portanto, proporciona um mecanismo conveniente para negociação destas quantidades. A partir de uma taxa de amostragem que possível é desejável (consistente com o SNR mínimo necessário) uma vez que isto reduz o custo do ADC, ele também reduz a potência necessária para (i) conduzir o ADC e (ii) processar dados localmente e/ou transmitir os dados para um nó base. Isto é importante se formas de reaproveitamento de energia são implementadas no nó sensor.

# Capítulo 5

## Sistema para Monitoramento e Localização de DP

Um sistema implementado com o uso de uma antena, um detector de envoltória e um osciloscópio para aquisição dos dados, como observado na Figura 5.1, é o arranjo mais simples para prova deste princípio. Esse sistema usa um único conjunto de dispositivos para representar o radiômetro, que por sua vez é deslocado para diferentes posições na área de teste, caracterizando assim uma rede não sincronizada. Esse artifício é usado em face da vantagem da abordagem aqui descrita, de um método de localização baseado em razões de potência. Além disso, o uso de uma célula geradora de DP com um padrão de descargas estável viabiliza a utilização de apenas um “nó sensor”.

Os pulsos captados pela antena foram armazenados na memória do osciloscópio em dois conjuntos. Um conjunto no qual os pulsos foram obtidos com o detector de envoltória entre a antena e o osciloscópio e outro conjunto com os pulsos vindos diretamente da antena. Essa separação de pulsos é importante para observação da melhoria proposta com o uso do detector de envoltória. No sistema final, o osciloscópio será substituído por um sistema de aquisição de dados que será responsável, além da aquisição, pelo tratamento da informação e envio desta a um nó base.

### 5.1 Antena

A antena é uma parte fundamental no processo de monitoramento de descargas parciais usando um sistema radiométrico. É a antena que desempenha o papel de sensor nesse tipo de detecção, por UHF, onde a chave é o sensor, que precisa não apenas de

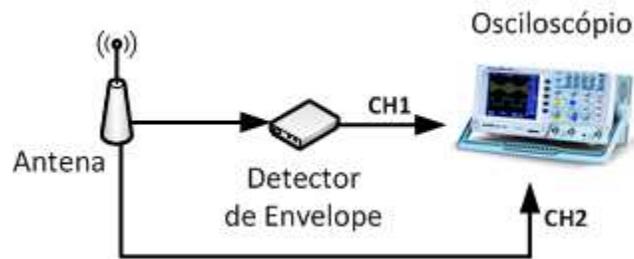


Figura 5.1: Diagrama esquemático do sistema montado.

um bom desempenho na detecção, mas também uma instalação conveniente [110].

Para atender as especificações desse tipo de monitoramento, o tipo de antena escolhido foi o de uma antena *diskcone* que é uma variação da antena monopolo bicônico usando um pequeno "plano de terra", pois o *diskcone* é uma forma de dipolo modificado. Modificações de dipolo são frequentemente utilizados para obter uma operação em banda larga sem aumentar a complexidade.

Antenas bicônicas de ângulo largo são populares por sua larga faixa de impedância e seu padrão de radiação omnidirecional. A variação *diskcone* pode ser preferida quando o tamanho físico reduzido ou radiação, principalmente em uma metade do espaço é necessária [22].

Os primeiros modelos foram desenvolvidos por Kandoian em 1945, seguido anos mais tarde por estudos experimentais de projetos. Foi usada para polarização vertical e aproximadamente uniforme cobertura azimutal [97].

Esta antena é caracterizada por ser do tipo faixa-larga onde sua faixa de operação é de até cinco vezes sua frequência de corte, para transmissão, e de até dez vezes sua frequência de corte, para recepção. O projeto da antena *diskcone* foi realizado de acordo com as especificações da banda de frequência a qual se deseja monitorar (10 MHz à 1000 MHz).

Inicialmente foi proposto o trabalho com duas bandas de frequência de modo a separar os efeitos produzidos por corona (10 MHz à 100 MHz) dos efeitos produzidos por PD (100 MHz à 1000 MHz). As especificações para o projeto de uma antena tipo *diskcone* com impedância de 50 Ohms obedecem as seguintes características, como pode-se observar na Figura 5.2:

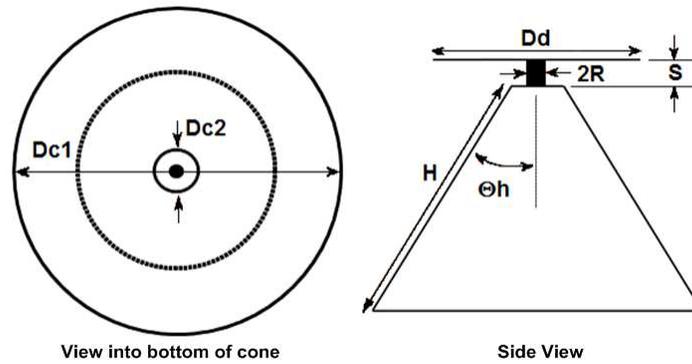


Figura 5.2: Diagrama de uma antena *diskcone*.

onde:  $Dd$  é diâmetro do disco;  $S$  é a distância entre o cone e o disco;  $R$  é o raio do pino de entrada do sinal;  $H$  é o comprimento da lateral do cone;  $\Theta h$  é o ângulo interno do cone;  $Dc1$  o diâmetro maior do cone;  $Dc2$  o diâmetro menor do cone.

Especificado por [22] onde:  $Dd = \frac{52500}{fc}$ ,  $H = \frac{75000}{fc}$  e  $\Theta h = 30^\circ$  para uma impedância de 50 Ohms. Com  $Dd$  e  $H$  em mm e  $fc$  em MHz.

Inicialmente foram determinadas as dimensões da antena que atendem as necessidades de frequência e impedância necessárias ao sistema nas duas bandas (Antena 1 e Antena 2). Ambos os projetos de antenas possuem tamanho relativamente grandes. Desse modo foi proposto trabalho sobre uma terceira banda de frequência iniciando em 300 MHz. Esta antena (Antena 3) foi construída utilizando o modelo simplificado ilustrado na Figura 5.3, que consta de um conjunto de hastes metálicas conectadas a dois anéis metálicos de modo a formar as duas estruturas da antena, o disco e o cone, formando assim o modelo chamado *wired diskcone*.

Foram construídas duas antenas para os testes de comunicação e o uso do analisador de rede para verificação das características de desempenho desse tipo de antena (Figura 5.3).

A forma usual de verificação do desempenho de uma antena é obtendo seus parâmetros característicos, os parâmetros- $s$ , ou parâmetros de espalhamento (Figura 5.4),  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ , esses parâmetros, estão associados aos coeficientes de reflexão e de transmissão de um sinal [73].

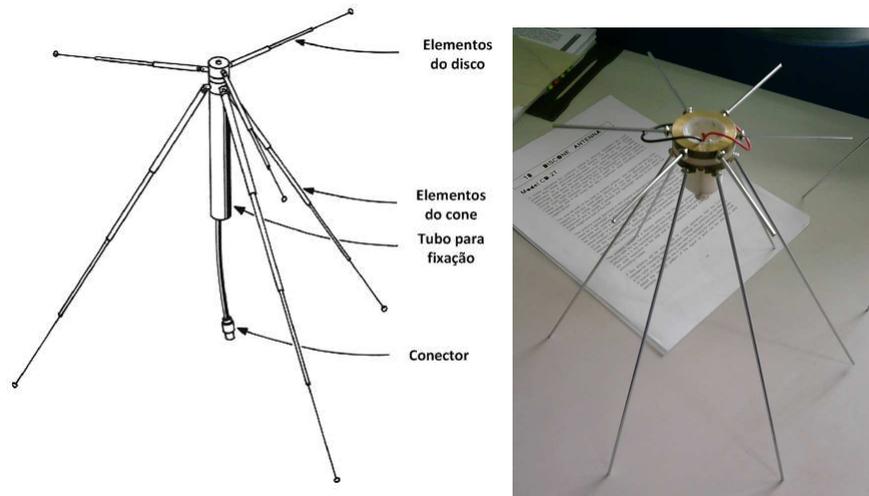


Figura 5.3: Modelo simplificado de uma antena *diskcone* e antena construída para teste.

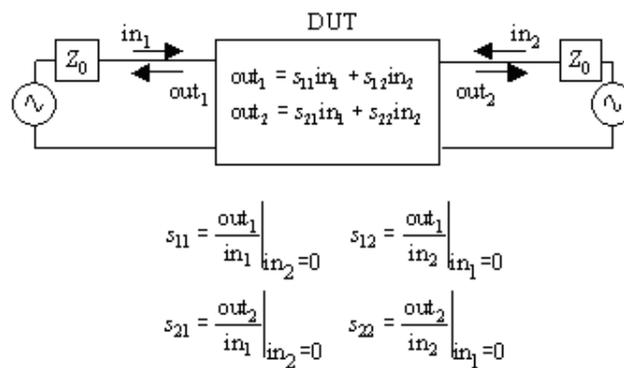


Figura 5.4: Representação esquemática para obtenção dos parâmetros-S.

O dispositivo a ser testado (DUT - *Device Under Test*) para o teste realizado foi representado pelo *link* de comunicação composto pelas duas antenas. Tais parâmetros são importantes pois indicam quais bandas de frequência são melhores aproveitadas para transmissão/recepção. Esperasse assim que a antena funcione na banda de frequência a qual foi projetada para operar, de modo que o máximo de potência seja transmitido dentro da banda de frequência desejada. Para a obtenção desses parâmetros, foi utilizado um analisador de rede com banda de frequência de 300 kHz a 3GHz. No teste inicial foi observado que o *link* de comunicação tem uma boa resposta nas bandas de frequência entre 30 MHz e 75 MHz e entre 105 MHz e 540 MHz (Figura 5.5).

Porém deve-se observar o desempenho das antenas isoladamente. Levando em consideração o uso separado das antenas, percebe-se que uma das antenas possui melhor

resposta em frequências entre 150 MHz e 345 MHz e entre 975 MHz e 1500 MHz, enquanto que a outra antenna possui melhor resposta em bandas de frequência entre 165 MHz e 675 MHz e entre 1770 MHz e 2295 MHz (Figura 5.6). Porém ambas as antenas não possuem um nível de transmissão de sinal adequado ao *link* de comunicação. Esse limiar é representado pela banda de frequência na qual o sinal desce a níveis abaixo de -10 dBm.

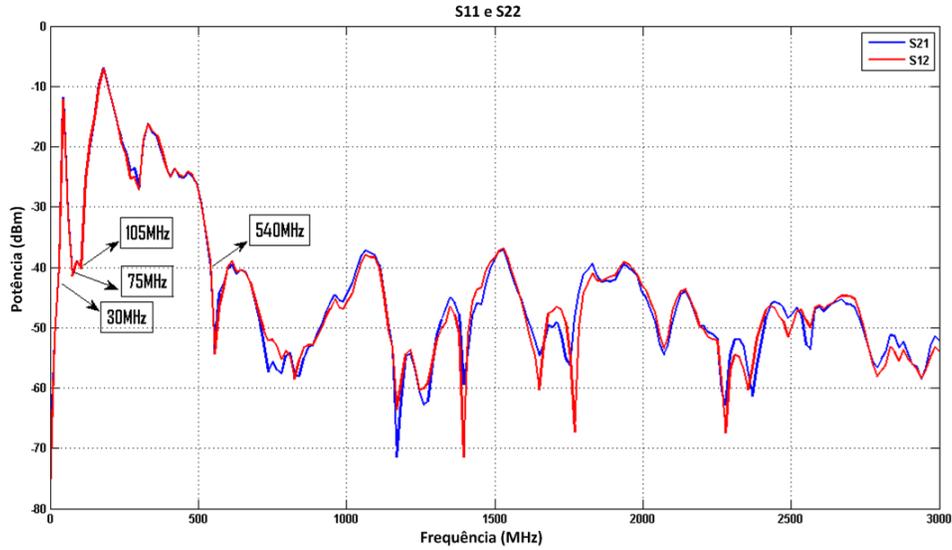


Figura 5.5: Parâmetros  $S_{12}$  e  $S_{21}$ .



Figura 5.6: Parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{22}$ .

Desse modo, um novo projeto foi proposto visando evitar esse problema e realizar alguns testes (Antena 4). A nova antena opera numa banda de frequência iniciando em 200 MHz e foi projetada levando em consideração o modelo original de uma antena *diskcone*.

Os dados obtidos para cada antena podem ser observados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Tabela com os dados principais para o dimensionamento das antenas projetadas.

| Antena | Dd (cm) | H (cm) |
|--------|---------|--------|
| 1      | 525     | 750    |
| 2      | 52,5    | 75     |
| 3      | 17,5    | 25     |
| 4      | 26,2    | 35,7   |

A antena (Antena 4), ao contrário do modelo inicial, foi simulada antes da confecção de um protótipo, com o uso do *software CST Studio Suite* usando os seguintes parâmetros: Dd = 262 mm; S = 3 mm; mm; Dc2 = 12 mm. A curva representativa de  $S_{11}$  obtida para a antena simulada pode ser observada na Figura 5.7.

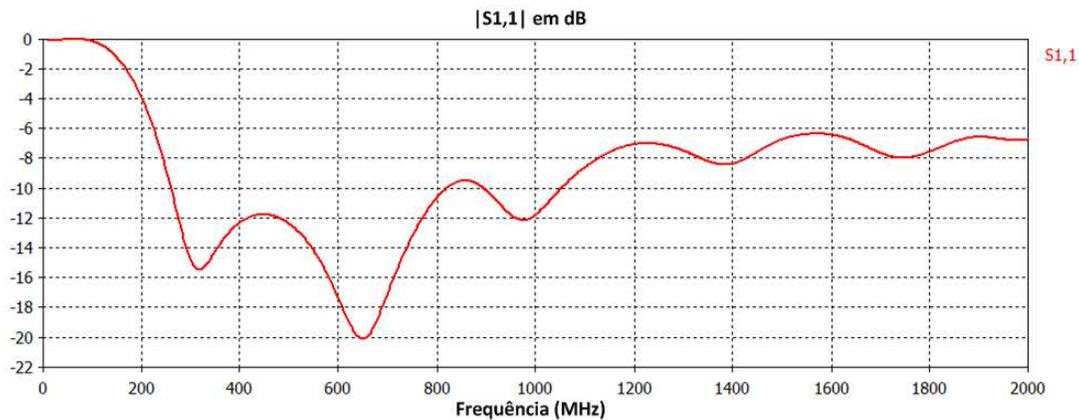


Figura 5.7: Parâmetros  $S_{11}$  para um ângulo de abertura de  $30^\circ$  no cone da antena.

Da análise desses resultados constatou-se que a antena funciona bem para frequências entre 260 MHz e 1050 MHz onde o coeficiente de reflexão desce abaixo de 10 dBm. Para melhorar os resultados, foi realizado um processo de otimização objetivando aumentar a banda de frequência monitorada pela antena. A variável escolhida para otimização foi o ângulo de abertura do cone da antena, visto que este está diretamente relacionado ao diâmetro superior da antena, que por sua vez influencia na sua

resposta em frequência. Após esse processo de otimização, foi obtido um novo ângulo de abertura do cone da antena, no valor de  $20^\circ$ . A melhora na faixa de sensibilidade da antena pode ser observada na Figura 5.8. Usando um ângulo de abertura de  $20^\circ$ , o limite inferior de frequência é de 227 MHz e o limite superior manteve-se em 1050 MHz.

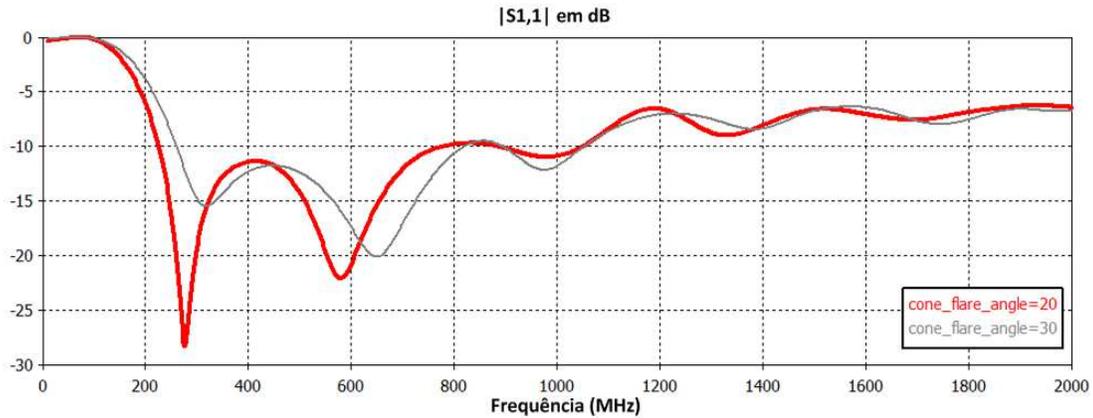
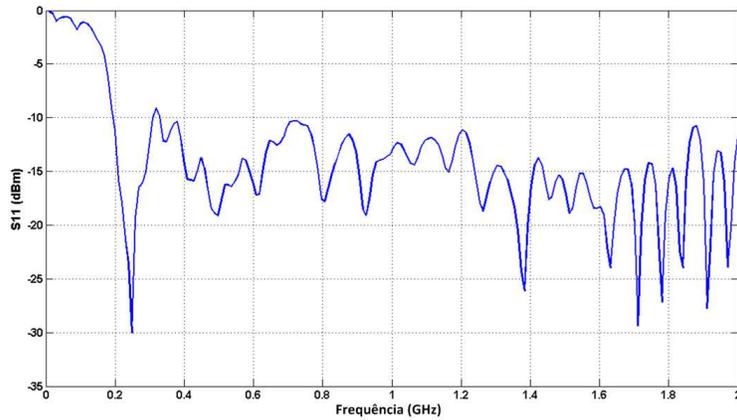


Figura 5.8: otimizada.

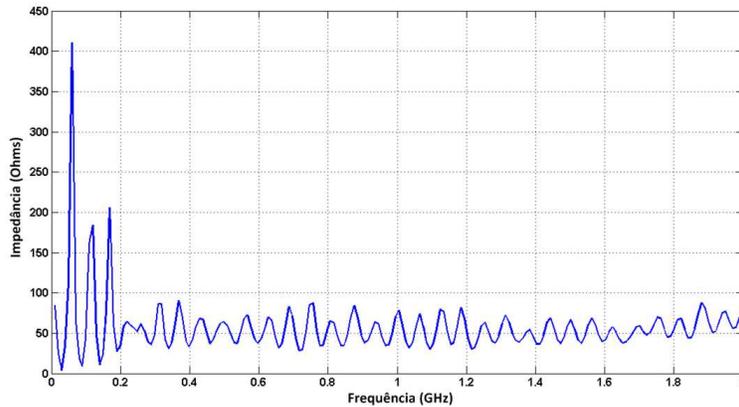
Dados os bons resultados da simulação realizada, foi construído um protótipo da antena em alumínio (Figura 5.9) e esta foi testada usando o analisador de rede. O parâmetro  $S_{11}$  e sua impedância podem ser observadas nas Figuras 5.10a e 5.10b.



Figura 5.9: Foto do protótipo de antena construído.



(a)



(b)

Figura 5.10: (a) Parâmetro  $S_{11}$  e (b) Impedância característica para uma antena *diskcone* real.

Os resultados para a antena *diskcone* real são melhores do que as da antena simulada, podemos observar pelo parâmetro  $S_{11}$  que a antena atende as necessidades do projeto e tem uma impedância característica em torno de 50 Ohms a partir de 200 MHz.

## 5.2 Detector de Envoltória

O detector de envoltória permite uma redução da frequência de amostragem do sistema para uma relação sinal/ruído (SNR) definida e então proporciona um mecanismo conveniente para a negociação dessas quantidades. É desejável que essa taxa de amostragem seja a mais baixa possível (consistente com a mínima SNR requerida) desde que isso reduz os requerimentos para o conversor analógico-digital (ADC - *Analog to Digital Converter*).

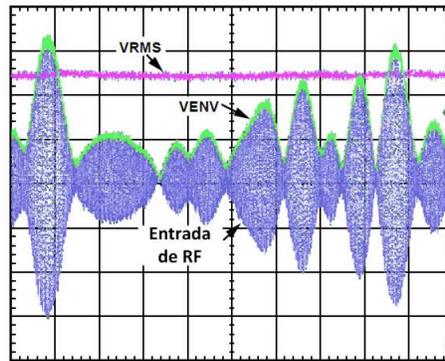


Figura 5.11: Exemplo de resposta do ADL5511.

Por meio de seu uso, também reduz-se a potência necessária para (i) conduzir o ADC e (ii) processar dados localmente e/ou transmitir os dados para um nó de recepção. Isto é importante se formas alternativas de obtenção de energia são utilizados para proporcionar este fornecimento de energia ao nó sensor. A viabilidade do receptor depende do detector de envoltória, uma vez que as fases anteriores do sistema (antena, amplificador) já foram testadas com componentes reais.

A solução proposta para os propósitos do presente trabalho foram baseados no sistema desenvolvido pela *Analog Devices* [3], sob forma de uma placa de sensoriamento com o detector de envoltória ADL5511. Este detector responde as características necessárias ao monitoramento de descargas parciais baseados em sistemas radiométricos.

O ADL5511 é um detector de envoltória de RF e um detector rms TruPwr™, um exemplo da curva característica de saída do sensor baseado numa entrada de RF pode ser observada na Figura 5.11. A tensão de saída do detector de envoltória é apresentada como uma tensão que é proporcional ao envoltória do sinal de entrada. A tensão de saída rms é independente da proporção de pico para a média do sinal de entrada. Ele pode operar a partir de DC a frequências da ordem de 6 GHz em sinais com larguras de banda de envoltória de até 130 MHz.

Este detector de envoltória tem uma banda de frequência ajustável pela adição de um filtro RC na saída do circuito. Para definir esta banda de frequência, foi utilizada toda a base de dados de pulsos de DP adquiridos durante a fase experimental desse trabalho para verificar a constante de tempo mínima do conjunto de pulsos. De posse dessa base de dados, foi estabelecida a constante de tempo de cada conjunto de pulsos obtidos nos diferentes experimentos. Essa constante de tempo foi obtida usando o critério dos 63% do valor da energia acumulada na curva de energia de cada pulso. Esses valores de

constante de tempo variam de acordo com varias características (rigidez do material, tipo de falha, tensão aplicada, etc).

A menor constante de tempo observada foi de 88,2 ns, com uma largura de pulso media de 477 ns. Para o calculo da banda de frequência do detector de envoltória, foi considerado um valor de constante de tempo de 80 ns, um pouco menor que o valor obtido por meio dos experimentos, de modo que temos uma pequena margem de segurança. Considerando o processo de carga do capacitor do detector de envoltória 10 vezes mais rápido que a constante de tempo, temos que, para uma corrente de saída do circuito de 100 mA e a tensão de carga no capacitor de 2,5 V, podemos definir o valor do capacitor por meio do uso da equação de corrente no capacitor. O valor definido é de 300 pF. Usando a expressão de tensão do capacitor é possível definir o resistor que compõe o filtro, considerando um tempo de descarga 10 vezes maior que a constante de tempo dos pulsos. Dadas essas considerações, temos que  $R = 1,2 \text{ k}\Omega$ . Estes valores de resistência e capacitância definem uma banda de frequência de 3 MHz.

### 5.2.1 Amostragem

Devido à larga banda de frequência ocupada pelo fenômeno das descargas parciais, um sistema de aquisição de dados com uma taxa de amostragem elevada é necessariamente algo a ser utilizado. Como mencionado anteriormente, o uso do detector de envoltória visa a suavização da curva característica do pulso de DP para posterior diminuição da taxa de amostragem necessária a obtenção do pulso. Para verificar esta característica, os pulsos obtidos com a ajuda do detector de envoltória foram reamostrados computacionalmente de modo a se obter uma perspectiva sobre as perdas proporcionadas por este processo. Esta análise foi realizada considerando toda a base de dados obtida com o uso do detector de envoltória. Os pulsos de DP foram adquiridos com o uso de um osciloscópio *Lecroy Waverunner 104xi* de 10GS/s e 1GHz de banda. A taxa de amostragem usada para os experimentos foi a máxima permitida pelo equipamento. Cada pulso foi medido dentro de uma janela de  $2\mu\text{s}$  e possuem 20000 amostras.

Um conjunto de 100 pulsos foi reamostrado com diferentes taxas: 5 GS/s, 1 GS/s, 100 MS/s e 10 MS/s. A variação de energia com a diminuição da taxa de amostragem pode ser observada na Tabela 5.2.

A partir dessa variação podemos estabelecer uma taxa mínima na qual a variação de energia e o número de amostras estão dentro de um limite aceitável para sua utilização na rotina de estimação de localização. Como podemos observar, uma taxa de amostragem de 100 MS/s, 100 vezes menor que a taxa original, ainda representa uma

Tabela 5.2: Tabela de comparação de energias para diferentes taxas de amostragem.

| Taxa de amostragem | Energia acumulada média (J) | Desvio padrão           | % da variação de energia média | Variação de energia em relação a anterior (%) | Número de amostras |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|---|--------------------|
| original 10 GS/s   | $3,5693 \cdot 10^{-12}$     | $2,1272 \cdot 10^{-13}$ | 5,959                          | -   | 20000              |
| 5 GS/s             | $3,5693 \cdot 10^{-12}$     | $2,1272 \cdot 10^{-13}$ | 5,959                          | 0   | 2000               |
| 1 GS/s             | $3,5695 \cdot 10^{-12}$     | $2,1273 \cdot 10^{-13}$ | 5,959                          | 0   | 200                |
| 100 MS/s           | $3,5501 \cdot 10^{-12}$     | $2,1376 \cdot 10^{-13}$ | 6,021                          | 0,54  | 20                 |
| 10 MS/s            | $3,8876 \cdot 10^{-12}$     | $1,9990 \cdot 10^{-13}$ | 5,142                          | 8,68  | 2                  |

taxa viável e com um número de amostras que garante que para pulsos com uma largura média de 477 ns, ao menos 4 pontos são usados para representar o pulso com um intervalo entre amostras de 100 ns. O valor de 4 pontos por pulso não foi escolhido arbitrariamente. Esse valor garante uma relação sinal distorção de 15,8 dB, se essa relação é maior que 10 dB então uma melhor relação sinal ruído será alcançada [30].

### 5.3 Sistemas de Localização

Uma das aplicações de rede sem fio para curtas distancias é a determinação aproximada da localização física de um objeto em um dado instante de tempo. O conhecimento em tempo real de pessoas, propriedades, e instrumentos portáteis pode tornar o gerenciamento mais eficiente. A estimação de localização, é o processo de obtenção da informação de localização de um nó em relação à um conjunto de posições de referência conhecidos.

Os sistemas de localização desenvolvidos que usam redes sem fio de curta distância também são chamados de sistemas de posicionamento local (LPSs - *Local Positioning Systems*) para diferenciar do chamado sistema de posicionamento global (GPS - *Global Positioning System*). O sistema LPS ao contrario de um sistema GPS não usa informação proveniente de um satélite ou transmissor de longa distância.

A escolha do algoritmo de estimação de localização depende do cenário no qual o sistema é implementado. Os métodos de estimação de localização são comparados baseados na sua complexidade e desempenho. A precisão na localização, que relaciona a

posição atual com a posição estimada, é talvez o mais intuitivo parâmetro de desempenho. Se o objetivo da estimação da localização é para o rastreamento de pessoas, uma precisão grosseira de alguns metros pode ser suficiente. Um sistema de localização simples e de baixo custo, baseados em redes sem fio de curtas distâncias pode ser implementado utilizando o protocolo *ZigBee*, porém que não é tão bom para aplicações com escalas de precisão em centímetros. Sinais em UWB (UWB - *Ultra-Wideband*) são mais apropriados para este tipo de sistemas de localização [62].

O tempo para determinação do posicionamento de um nó também é um critério de desempenho. Durante a disputa no período de acesso a canal, por exemplo, um nó *ZigBee* pode realizar muitas tentativas antes de ganhar acesso ao canal. O desempenho de cobertura especifica o máximo espaço físico que uma LPS pode cobrir e o sucesso no rastreamento do posicionamento de um nó. Escalabilidade é outro parâmetro que determina quão bem o algoritmo de localização se adapta quando o número de nós e a área de cobertura aumentam. Em aplicações de baixo custo, com nós associados a baterias, a capacidade computacional e o espaço na memória são limitados. Deste modo, estes nós não são aptos a implementação de algoritmos de maior complexidade computacional.

A estimação da localização usualmente envolve dois grupos de nós. O primeiro grupo consiste de nós fixos com localização conhecida. Estes nós fixos são referenciados como nós âncora (*Anchor Node*), são usados como referência para estimação de localização. A localização do nó âncora pode ser determinada pelo instalador, ou, esse pode ser equipado com um GPS para determinar sua própria localização.

O segundo grupo são os nós com posições desconhecidas, chamados de nós rastreáveis (*Tracked Nodes*). O objetivo principal do sistema de localização é determinar a posição dos nós rastreáveis com a ajuda dos nós âncoras.

A ideia básica de um sistema LPS pode ser resumida da seguinte forma. Um nó rastreável com posição desconhecida emite um sinal que é recebido por seus vizinhos nós âncoras. O nó âncora mede a potência do sinal recebido (RSS - *Received Signal Strength*), o tempo de viagem (TOA - *Time of Arrival*), ou o ângulo de chegada (AOA - *Angle of Arrival*) do sinal recebido. Estes valores medidos são usados como entradas para o algoritmo de localização utilizado que determina aproximadamente a localização do nó rastreável. O algoritmo usa apenas uma dessas três entradas. A determinação do tempo de viagem, requer um *clock* de alta precisão. Encontrar o ângulo de chegada requer modificações de *hardware* o que pode aumentar os custos. A maioria dos algoritmos de localização baseados em *links* RF usa apenas o RSS (RSS -

*Received Signal Strength*) para estimar a localização devido a sua simplicidade e pouca ou nenhuma mudança de *hardware* [23].

## 5.4 Algoritmos de Localização Baseados em RSS

O RSS pode ser medido para cada pacote recebido. A energia do sinal medido é quantizada para formar o indicador de potência do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*). O RSSI e o tempo no qual o pacote foi recebido, pode ser disponibilizado pelas camadas MAC (MAC - *Media Access Control*), NWK (NWK - *NetworkA*) e APL (*Application*) para qualquer tipo de análise.

Existem quatro parâmetros associados ao RSSI: Escala dinâmica, precisão, linearidade e o tempo médio. A escala dinâmica do RSSI é medida em dB os valores mínimo e máximo de RSSI que o dispositivo é capaz de medir. A precisão do RSSI indica o erro médio que associado a cada RSS medido. Um valor comercial típico para um transceptor é de  $\pm 4$  dB. A linearidade no RSSI indica o desvio máximo que a curva pode ter para uma reta em relação a atual potência do sinal recebido em escala logarítmica. O RSS é medido sobre um período de tempo e então é realizada uma média para gerar o RSSI. O tempo da média é de oito ciclos de máquina, o qual é requerido pelo padrão IEEE (IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*) 802.15.4 [45] se o RSSI for usado para gerar o indicador de qualidade de *link* (LQI - *Link Quality Indicator*). O método mais simples de determinar a posição de um nó é requisitar ao nó rastreável o envio de um pacote. A vantagem deste método é que ele pode ser implementado facilmente com baixo custo, nós alimentados com baterias, pequeno tamanho de memória e baixa capacidade de processamento. Entretanto a precisão da estimação de localização pode ser inadequada para muitas aplicações. O melhor caminho de melhorar a precisão deste método é aumentar o número de nós âncoras, o que pode aumentar o custo das implementações.

Para o caso particular da medição de RSS associada ao contexto de descargas parciais, o RSS é estimado com o pulso eletromagnético recebido. Esse valor varia de acordo com a intensidade destas descargas, ou seja, o processo de estimação de distância, pode se tornar bastante complexo, visto que, além da mudança da intensidade, temos que levar em conta o não conhecimento da potência transmitida pela fonte de DP.

### 5.4.1 Estimação de Distância Usando RSS

O processo de estimação de distância usando RSSI normalmente é realizado usando a curva que interpola o padrão de decaimento do sinal sem fio propagado no ambiente,

de acordo com a Equação 5.1 [1]:

$$RSSI = -(10 \times n \times \log_{10}d + A) \quad (5.1)$$

onde:  $n$  é o expoente de perdas do caminho, também conhecido como constante de propagação,  $d$  é a distância entre os módulos de comunicação.  $A$  é o RSS a uma distância de 1 m. Como podemos observar nas curvas das Figuras 5.12 e 5.13, o processo de estimação de distância utilizando a curva aproximada, insere um erro inerente a região de interferências construtivas e destrutivas presente no padrão de decaimento do sinal no ambiente.

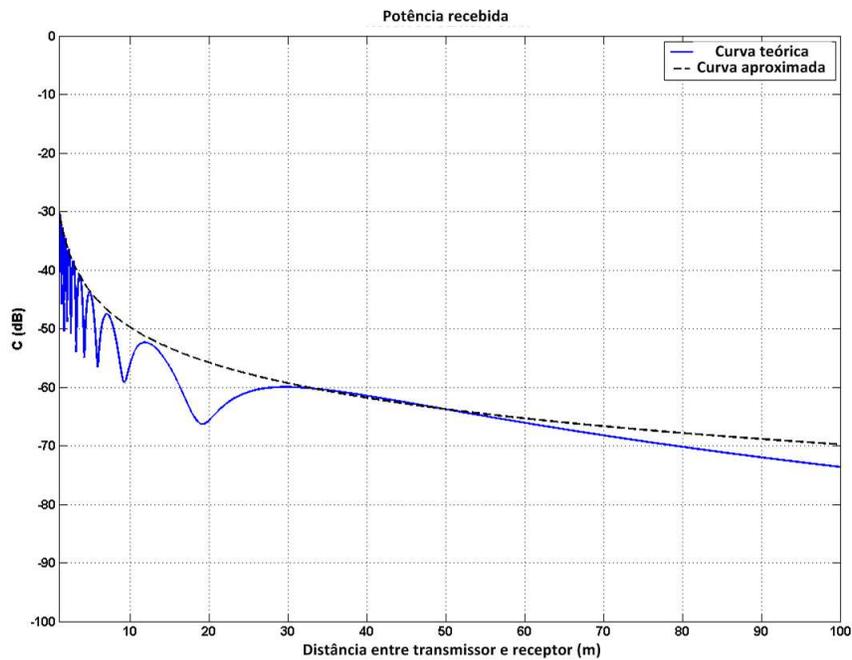


Figura 5.12: Curva de decaimento do sinal no ambiente com escala normal.

De modo a minimizar tal erro, utiliza-se como forma de estimação de distância o modelo de dois raios para caracterização do ambiente onde o sinal é propagado.

Em um ambiente aberto com alta probabilidade de linha de visão (LOS - *Line-Of-Sight*) sem obstáculos e com baixo efeito de multicaminhos, é possível utilizar um algoritmo simples onde um erro grosseiro é mais aceitável. A propagação do sinal pode ser imaginada como uma esfera expandindo com centro na antena. No espaço livre, a potência do sinal transmitido para uma distância  $d$  a partir da antena é proporcional a  $\frac{P_0}{(4\pi d/\lambda)^2}$ , onde  $P_0$  é a potência do sinal na antena [63]. Se a distância de transmissão é duplicada, a potência do sinal no local de chegada é reduzida por um fator de 4. A

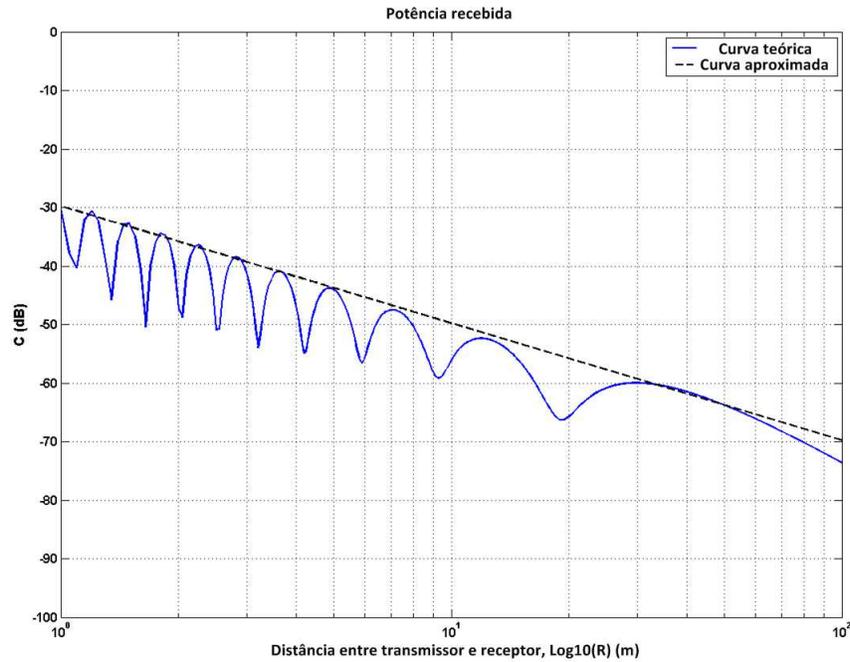


Figura 5.13: Curva de decaimento do sinal no ambiente com escala logarítmica.

potência do sinal a uma distância  $d$  é também uma função da frequência.

Em cenários mais próximos da realidade, tal como dentro de uma casa, a equação para espaço livre poderá não ter uma precisão suficiente. Isso porque parte do sinal transmitido poderá sofrer absorção de diferentes materiais, o sinal pode ser refletido múltiplas vezes por vários objetos e versões atrasadas do sinal podem ser adicionadas ao sinal original. Todos esses incidentes mudam a potência do sinal. Baseado em vários experimentos [91] a equação das perdas de transmissão no espaço livre também pode ser escrita como Equação 5.2:

$$P_r = P_T - 10 \times n \times \log_{10}(f) - 10 \times n \times \log_{10}(r) + 30 \times n - 32,44(\text{dBm}) \quad (5.2)$$

O valor de  $n$  (expoente de perdas no caminho) pode ser determinado experimentalmente, na Tabela 5.3 podemos observar alguns valores de  $n$  segundo [12, 91, 84]. Porém, deve-se observar que o uso de tal equação insere um erro no cálculo do RSS inerente à caracterização do ambiente ao qual a aplicação é implementada visto que os valores de  $n$  representam um cenário particular onde o experimento foi realizado.

Tabela 5.3: Expoente de perdas no caminho para diferentes ambientes.

| $n$       | Ambiente   |
|-----------|--|
| 2,0       | Espaço aberto  |
| 1,6 a 1,8 | Dentro de uma construção com linha de visão                  |
| 1,8       | Armazém  |
| 1,8       | Fábrica de papel/cereais                                     |
| 2,09      | Sala de conferência típica (15 x 7,6 m) com mesas e cadeiras |
| 2,2       | Supermercado   |
| 2 a 3     | Dentro de uma fabrica sem linha de visão                     |
| 2,8       | Dentro de um ambiente residencial                            |
| 2,7 a 4,3 | Dentro de um prédio de escritórios sem linha de visão        |

### 5.4.2 Localização Baseada em *Finger-print*

A exatidão da localização (a diferença em locais verdadeiros e estimados) geralmente melhora com a complexidade (e, portanto, a despesa). A localização do item da planta com um defeito de isolamento, na aplicação prevista aqui, exige uma exatidão (no plano horizontal), que é tipicamente de alguns metros, em ambas as dimensões  $x$  e  $y$ . O algoritmo de localização de *Finger-print* [54, 105] baseia-se numa correlação espacial. Para cada nó que transmite um sinal PD emulado numa rede de  $N$  sensores, a distribuição espacial da energia é amostrada a  $N-1$  pontos. A distribuição bidimensional de potência medida é característica da irradiação de energia a partir da localização da fonte de DP.

Apenas o valor médio da distribuição muda com a mudança na intensidade da DP irradiada, o padrão característico permanece não modificado. A “assinatura espacial” da DP co-localizada com cada nó é então disponível para a rede de sensores. A informação nesta assinatura espacial pode ser extraída e processada numa variedade de maneiras para identificar a localização desconhecida da fonte de DP.

Um algoritmo de correspondência de padrão pode ser usado, por exemplo, no qual o padrão de potência a partir da fonte de localização desconhecida é correlacionado com os padrões espaciais observados por todas as localizações de DP emuladas (ou seja, todas as posições dos nós da rede). Em sua forma mais simples a localização de uma fonte de DP é considerada como sendo co-localizada com o nó, no qual, quando irradiando um sinal DP emulado, resulta no padrão espacial de potência mais proximamente correlacionado com aquele gerado pela fonte real de DP.

Um refinamento permite que a fonte de DP seja localizada exatamente usando in-

terpolação espacial entre a localização correspondente aos múltiplos padrões espaciais cada um dando surgimento a uma correlação significativa com o padrão da fonte de DP. Esta abordagem, que é mais simples de implementar, foi simulada para estabelecer a plausibilidade do método. Na simulação índice de perdas do caminho,  $n$ , é definido usando uma função aleatória a qual gera valores entre dois níveis ( $n_l$  - índice de perdas do caminho inferior e  $n_h$  - índice de perdas do caminho superior) para cada caminho ligando o nó sensor à fonte de DP. Estes valores diferentes de  $n$  são gerados para refletir as diferenças espaciais características do ambiente que devem ser encontradas na prática. Assumindo uma potência transmitida de 0 dBm para cada nó, a potência recebida em todos os outros nós é calculada usando a Equação 5.2 [23].

O índice de perdas no caminho para propagação em espaço livre, por exemplo, é 2 correspondendo a um decaimento espacial em densidade de potência ou intensidade de campo de 6 dB/oitava [30]. Para testar a funcionalidade do método de correlação para estimação de localização, dois cenários de teste foram examinados. No teste 1, uma rede com 25 nós em um grid quadrado é assumido com 10 m de espaçamento entre nós. O padrão espacial da potência recebida (ou seja, a assinatura espacial) é então calculado para cada emulador energizado. Uma fonte de DP hipotética é localizada na posição (5,5) e então movida em degraus de 10 m, para a localização (45,45). Para cada localização de uma fonte de DP (simbolizada por um círculo vermelho na Figura 5.14) o padrão espacial resultante a partir de uma fonte de DP é correlacionado com cada padrão espacial obtido a partir das fontes emuladas.

Os contornos de correlação constante podem ser observados, para cada localização da fonte de DP, na Figura 5.14 (a-e). Pode-se observar que os contornos definem uma região com um aumento de correlação no qual contem a fonte de DP e então localiza com sucesso ao menos aproximadamente.

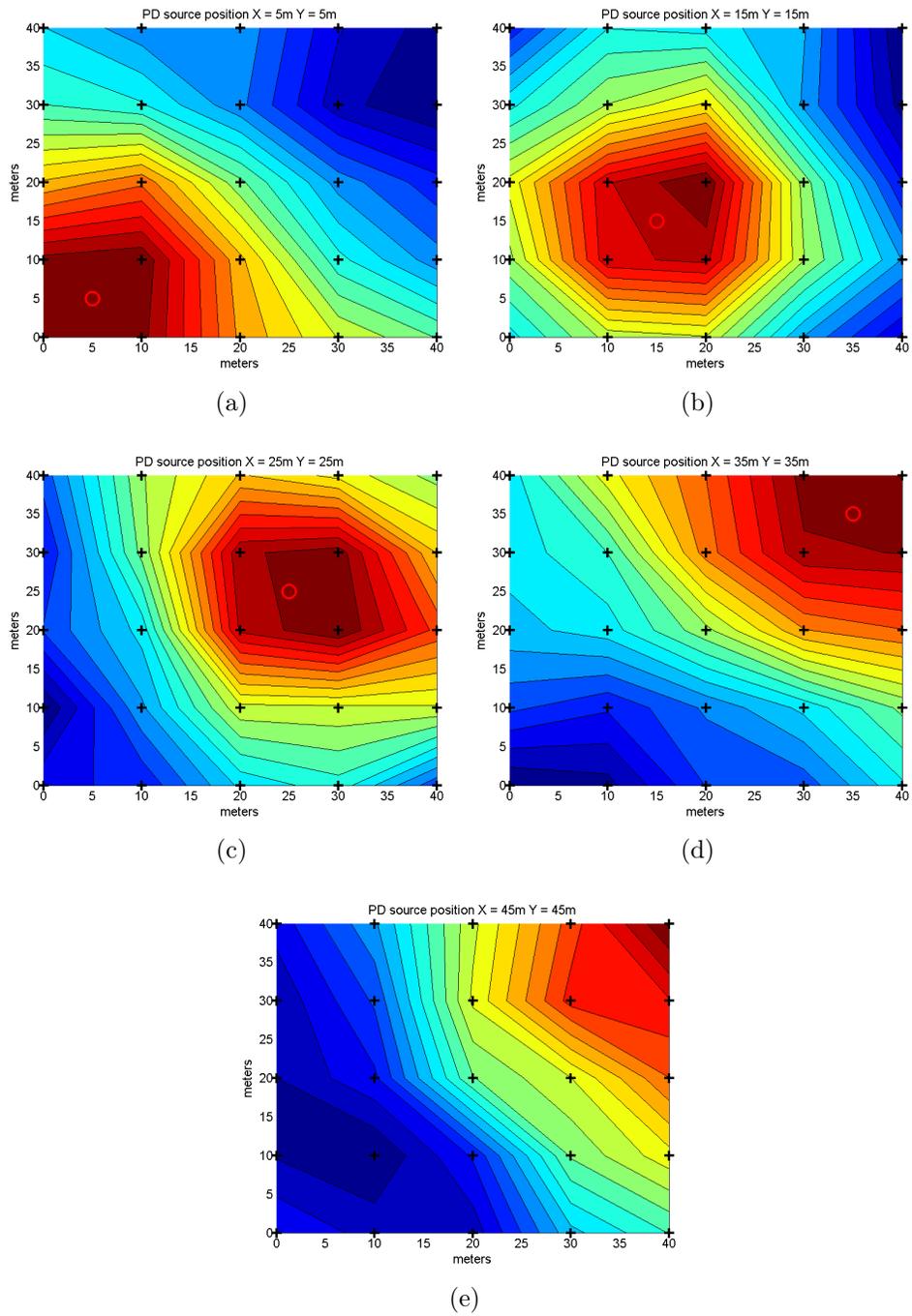


Figura 5.14: Contornos de correlação constante entre a assinatura da fonte de DP e a assinatura para fonte emulada numa configuração de 25 nós.

O teste 2 é idêntico ao teste 1 com apenas a mudança no número de nós usado, que aumenta de 25 para 100, Figura 5.15 (a-e).

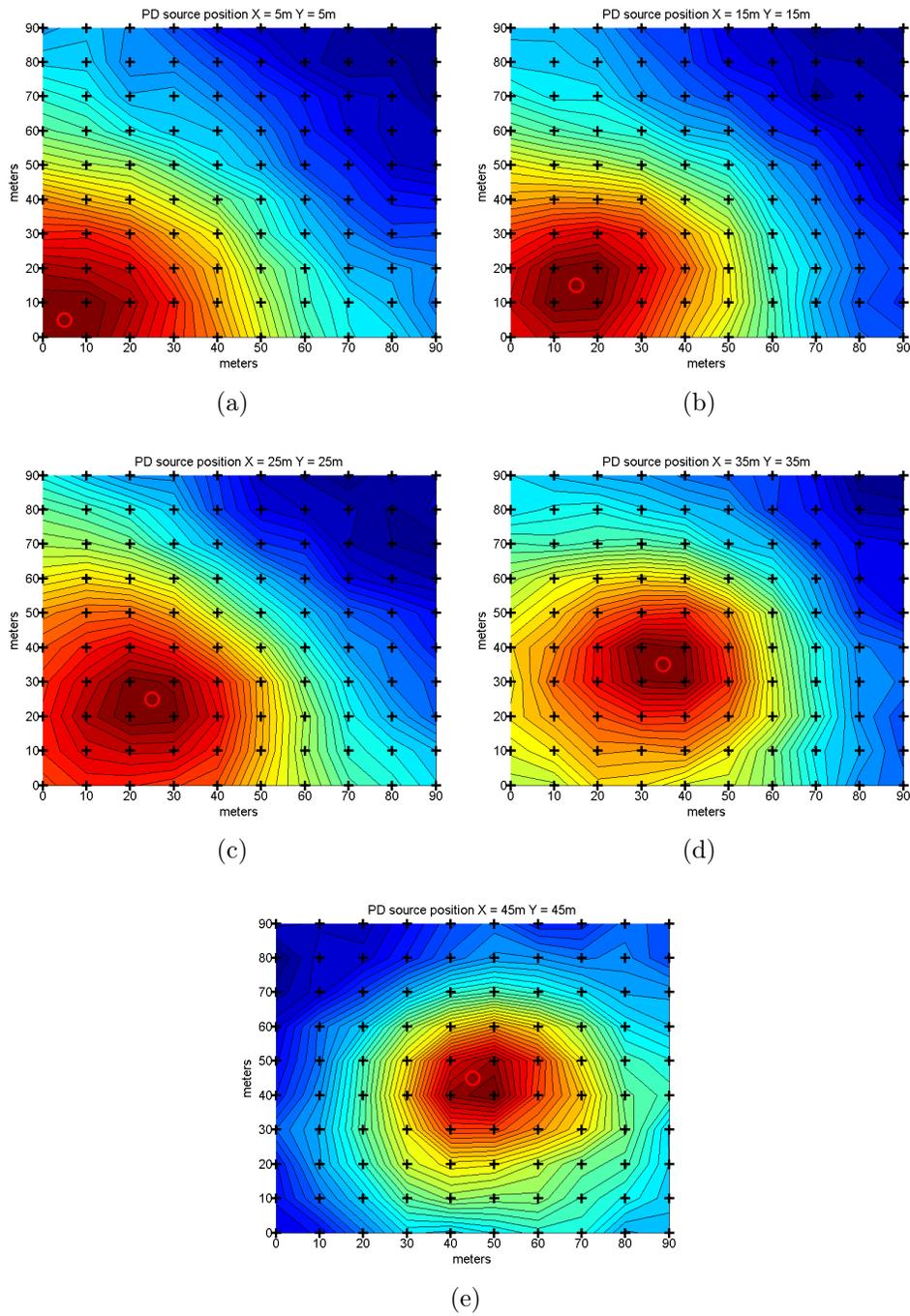


Figura 5.15: Contornos de correlação constante entre a assinatura da fonte de DP e a assinatura para fonte emulada numa configuração de 100 nós.

### 5.4.3 Uso da Razão das Potências como Alternativa para Estimação de Distância e Localização

Para o caso da estimação de distância baseada nos pulsos medidos de descargas parciais, faz-se necessário a adaptação da lei de perdas do espaço livre, considerando que não existe informação sobre a potência transmitida.

Seja a potencia do sinal recebido dada pela Equação 5.3:

$$P_R = \frac{kP_t}{r^n} \quad (5.3)$$

onde  $k$  é uma constante que depende de parâmetros do sistema tais como ganho da antena transmissora, ganho da antena receptora, frequência, etc, e  $r$  é a distância entre transmissor e receptor.

Considere uma fonte de descargas parciais na posição 0, considere também um conjunto de cinco nós sensores espalhados nas posições de um a cinco recebendo um pulso de descargas parciais vindo da fonte. Por meio desse pulso é calculada a potência recebida em cada nó. Desse modo tem-se que:

$$P_{R1} = \frac{kP_t}{r_1^n}, \quad (5.4)$$

$$P_{R2} = \frac{kP_t}{r_2^n}, \quad (5.5)$$

$$P_{R3} = \frac{kP_t}{r_3^n}, \quad (5.6)$$

$$P_{R4} = \frac{kP_t}{r_4^n}, \quad (5.7)$$

$$P_{R5} = \frac{kP_t}{r_5^n} \quad (5.8)$$

fazendo  $P_{R1}/P_{R2}$  tem-se:

$$\frac{P_{R1}}{P_{R2}} = \frac{r_2^n}{r_1^n} \quad (5.9)$$

$$\frac{P_{R1}}{P_{R2}} = \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^n \quad (5.10)$$

$$r_2 = r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R2}}} \quad (5.11)$$

Repetindo o mesmo processo para as outras razões de potência, tem-se:

$$r_3 = r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R3}}} \quad (5.12)$$

$$r_4 = r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R4}}} \quad (5.13)$$

$$r_5 = r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R5}}} \quad (5.14)$$

Assumindo que todos os nós possuem antenas omnidirecionais, cada um dos nós fixos 1-5 pode estimar a distância ( $r$ ) entre suas localizações e a localização da fonte. Na Figura 5.16 (a) podemos observar um cenário ideal para estimação de localização onde podemos observar 3 nós com localizações fixas conhecidas. O quarto nó é móvel e o objetivo é determinar a estimativa bidimensional da localização deste nó. Mas o mesmo conceito pode ser estendido para o espaço tridimensional ou com o uso de mais nós.

O nó 1, por exemplo, pode estimar a distância ( $r_1$ ) entre sua localização e a localização da fonte de DP usando RSS. A partir de uma única medição feita pelo nó 1, a única conclusão que pode ser feita é que a fonte de DP está localizada no perímetro do círculo com raio  $r_1$  centrado no nó 1. Usando a equação da circunferência (Equação 5.15) podemos estimar a distância entre os nós:

$$(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = r_1^2 \quad (5.15)$$

Onde  $(x_1, y_1)$  e  $(x_0, y_0)$  são coordenadas para os nós 1 e a fonte de DP, respectivamente. Equações similares podem ser derivadas para as coordenadas no nó 2, 3, 4 e do nó 5. Desse modo, para encontrar a localização da fonte de DP, nós precisamos encontrar  $(x_0, y_0)$  que satisfaça o seguinte sistema de equações já na forma matricial (Equação 5.16):

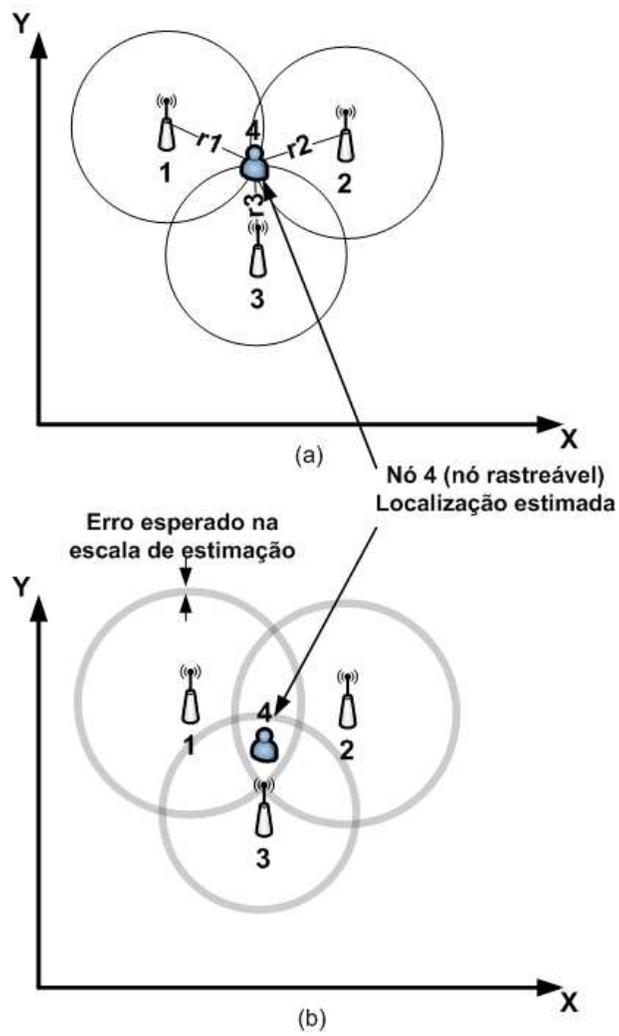


Figura 5.16: Estimação de localização usando triangulação (a) Caso ideal e (b) Com escala de estimação de erro.

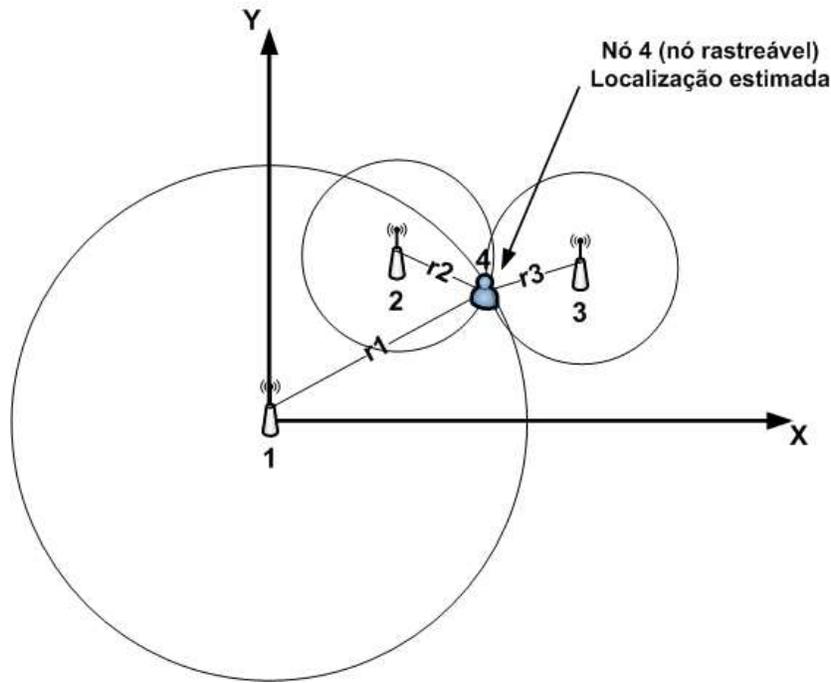


Figura 5.17: Sistema de estimação de localização simplificado.

$$\begin{bmatrix} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 \\ (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 \\ (x_5 - x_0)^2 + (y_5 - y_0)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \\ r_4^2 \\ r_5^2 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Um método de solução deste problema pode ser aplicado, simplificando o sistema de equações, apenas deslocando a posição de um dos nós fixos para a origem do eixo coordenado como observado na Figura 5.17[57]. A título de simplificação, consideremos a origem do sistema coordenado na posição  $(x_1, y_1)$ .

Nesse modo de solução do problema, temos um sistema simplificado, onde o par  $(x_1, y_1)$  representa a origem do sistema, logo o sistema de Equações 5.16 pode ser reescrito como (Equação 5.17):

$$\begin{bmatrix} x_0^2 + y_0^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 \\ (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 \\ (x_5 - x_0)^2 + (y_5 - y_0)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \\ r_4^2 \\ r_5^2 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Substituindo os valores de distancias calculadas de acordo com as Equações de 5.11 a 5.14, tem-se:

$$\begin{bmatrix} x_0^2 + y_0^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 \\ (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 \\ (x_5 - x_0)^2 + (y_5 - y_0)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1^2 \\ \left(r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R2}}}\right)^2 \\ \left(r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R3}}}\right)^2 \\ \left(r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R4}}}\right)^2 \\ \left(r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R5}}}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Desenvolvendo as equações do sistema, e subtraindo a linha 1 das linhas subsequentes, chega-se ao seguinte sistema simplificado:

$$\begin{bmatrix} \left(\sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R2}}}\right)^2 - 1 & 2x_2 & 2y_2 \\ \left(\sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R3}}}\right)^2 - 1 & 2x_3 & 2y_3 \\ \left(\sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R4}}}\right)^2 - 1 & 2x_4 & 2y_4 \\ \left(\sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R5}}}\right)^2 - 1 & 2x_5 & 2y_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1^2 \\ x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 \\ x_4^2 + y_4^2 \\ x_5^2 + y_5^2 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

ou

$$HX = b$$

Que possui como solução:

$$X = (H)^{-1} b \quad (5.20)$$

## 5.5 Conclusões

O que se observa no presente capítulo são os passos básicos para a prova do princípio de um sistema radiométrico de detecção de DP. Este sistema é baseado na configuração

mais simples de dispositivos para realização desta tarefa, ou seja, o uso de apenas uma antena, um detector de envoltória e um sistema de aquisição de dados, representado aqui por um osciloscópio. Este sistema foi usado em diferentes posições para obtenção de pulsos de DP em diferentes instantes de tempo, com o objetivo de detecção e localização da fonte de DP, demonstrando assim o não sincronismo nesse processo de aquisição. Este sistema prova o princípio de uma rede de sensores distribuídos e não sincronizados para detectar e localizar DP. No sistema final, o osciloscópio será substituído por um sistema de aquisição de dados que será responsável, além da aquisição, pelo tratamento da informação e envio desta a um nó base. A simulação realizada demonstra a eficiência no método de estimação de localização de *finger-print* e introduz o método a ser usado baseado na razão de potências [13]. Apesar de não haver a transmissão da informação coletada localmente em cada posição, essa transmissão em nós independentes já foi abordada em [17], onde nós sem fio foram responsáveis pela transmissão de informação usada para estimação de localização.

# Capítulo 6

## Resultados Obtidos

### 6.1 Procedimento Laboratorial para Validação

O processo de verificação do sistema de localização foi dividido em dois estudos de caso. No estudo de caso 1, o experimento foi realizado no laboratório de alta tensão (*Institute for Energy and Environment*) das dependências do departamento de engenharia elétrica da Universidade de *Strathclyde* - UoS, em Glasgow na Escócia, Reino Unido. Este laboratório tem 20 m de comprimento e 12,25 m de largura e é cercado por uma rede metálica aterrada no interior das paredes de tijolos que o formam, de modo a protegê-lo e isolá-lo. Além dessas características, existe também a presença de várias estruturas metálicas, como observado na Figura 6.1. A célula geradora de DP permanece durante todo o experimento no interior de um cercado metálico que visa proteger o operador da alta tensão aplicada. A célula é posicionada a uma altura de 1,3 m em relação ao solo, esta mesma altura foi utilizada para posicionar as antenas, de modo que a influência da diferença de altura entre antena e célula fosse minimizada.

O experimento realizado objetivou a medição de pulsos de descargas parciais em 5 diferentes locais, no interior do laboratório, de acordo com o diagrama de posicionamento observado na Figura 6.2. A célula utilizada foi a UK4, descrita anteriormente como sendo de boa estabilidade para garantir um nível aproximadamente constante de descargas parciais durante a duração do experimento. Para validação das medições um equipamento comercial LDS-6 da Doble Lemke foi utilizado para verificação dos níveis de descargas parciais. A mesma antena utilizada anteriormente para levantamento da base de dados dos pulsos e conseqüentemente definição da célula mais apropriada para estes experimentos, foi usada, antena *diskcone*.



(a)



(b)

Figura 6.1: Fotos ilustrativas do laboratório de alta tensão correspondente ao estudo de caso 1 na Universidade de *Strathclyde*.

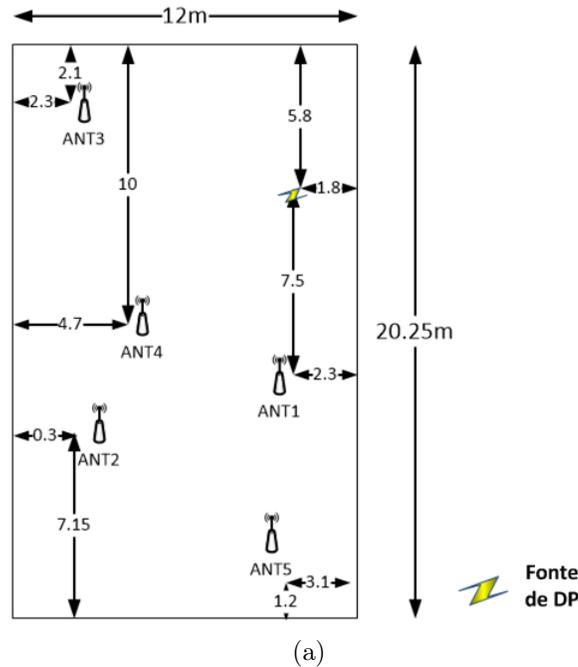


Figura 6.2: Diagrama de posicionamento da antena no local do experimento, correspondente ao estudo de caso 1.

O segundo conjunto de medições, estudo de caso 2, foi realizado nas dependências do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de *Huddersfield* - UoH, em *Huddersfield*, Inglaterra, Reino Unido. Este laboratório possui 12 m de comprimento e 9 m de largura, suas paredes são basicamente feitas de madeira, o que não deveria causar um severo efeito de multipercurso e reflexão, fotos ilustrativas do laboratório podem ser observadas na Figura 6.3. Do mesmo modo que no estudo de caso 1, foi utilizada uma célula de geração de descargas parciais com as mesmas configurações da célula UK4. Esta célula foi desenvolvida nas dependências da Universidade de *Huddersfield* e apresenta a mesma estabilidade característica da célula utilizada na Universidade de *Strathclyde*. Neste caso 4 posições diferentes foram assumidas pela antena, ao invés das 5 no caso anterior, as posições podem ser observadas no diagrama da Figura 6.4.



(a)



(b)

Figura 6.3: Fotos ilustrativas do laboratório de alta tensão correspondente ao estudo de caso 2 na Universidade de *Huddersfield*.

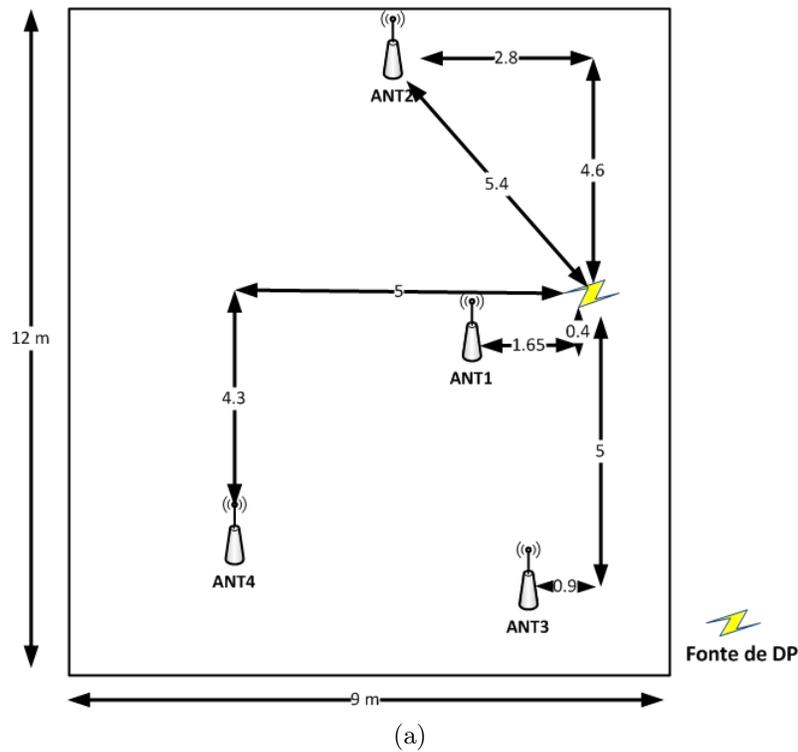


Figura 6.4: Diagrama de posicionamento da antena no local do experimento, correspondente ao estudo de caso 2.

## 6.2 Resultado dos Estudos de Caso

Pulsos gerados pela célula de descargas parciais foram gravados, estes pulsos medidos foram validados usando os dados obtidos pelo osciloscópio e o sistema LDS-6. A intensidade das descargas parciais geradas durante as medições na Universidade de *Strathclyde* foi de 744 pC. A energia acumulada para este conjunto de medições foi calculada baseada em cada posição da antena. O mesmo processo foi repetido para as medições feitas na Universidade de *Huddersfield*. Porém, o nível de intensidade das descargas não pode ser observado dado à falta de um equipamento de validação comercial que use a norma IEC60270. Essa informação é dispensável dado o uso de uma rotina de estimação de distancia baseada na razão de potências e considerando-se a estabilidade característica da célula de geração de DP. No experimento realizado na Universidade de *Strathclyde* para cada posição 200 pulsos foram armazenados e a energia associada a esta posição foi obtida pela média aritmética das energias de cada pulso. Os 200

Tabela 6.1: Dados da energia acumulada para os experimentos de estimação de localização.

| Energia Acumulada (J) | Estudo de caso 1 - UoS |                        |                         | Estudo de caso 2 - UoH |                        |                         |
|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
|                       | Antena                 | envoltória             | Variação de energia (%) | Antena                 | envoltória             | Variação de energia (%) |
| Posição 1             | $2,661 \cdot 10^{-13}$ | $2,128 \cdot 10^{-13}$ | 25,04                   | $2,019 \cdot 10^{-11}$ | $2,078 \cdot 10^{-11}$ | 2,92                    |
| Posição 2             | $2,023 \cdot 10^{-13}$ | $1,605 \cdot 10^{-13}$ | 26,04                   | $0,536 \cdot 10^{-11}$ | $0,422 \cdot 10^{-11}$ | 27,01                   |
| Posição 3             | $1,151 \cdot 10^{-13}$ | $0,891 \cdot 10^{-13}$ | 29,18                   | $0,436 \cdot 10^{-11}$ | $0,315 \cdot 10^{-11}$ | 38,41                   |
| Posição 4             | $2,427 \cdot 10^{-13}$ | $1,905 \cdot 10^{-13}$ | 24,40                   | $0,445 \cdot 10^{-11}$ | $0,240 \cdot 10^{-11}$ | 53,93                   |
| Posição 5             | $1,556 \cdot 10^{-13}$ | $1,233 \cdot 10^{-13}$ | 26,19                   | -                      | -                      | -                       |

pulsos foram obtidos de forma separada, 100 pulsos foram medidos a partir da antena e os outros 100 foram obtidos através do detector de envoltória. Uma forma de verificar a estabilidade na intensidade da célula geradora de DP é através do valor do desvio padrão da energia obtida para cada ponto. Este desvio padrão, para a célula estável, é o menor dentre os modelos de células de geração de DP testadas (como é possível de se observar na Tabela 4.2). No experimento realizado na Universidade de *Huddersfield*, 50 pulsos foram obtidos para cada posição, 25 com o uso do detector de envoltória e outros 25 direto da antena. Uma forma qualitativa de observar o comportamento dos pulsos obtidos em ambos os estudos de caso pode ser observada nas Figuras 6.5 e 6.6, que representam os dados da UoS e UoH, respectivamente.

O nível de energia obtido para cada conjunto de dados nas diferentes posições para cada estudo de caso pode ser observado na Tabela 6.1. A diferença dos níveis de energia pode ser atribuída a vários fatores, dentre eles, mais certamente a intensidade das descargas parciais, além dessa, deve-se considerar as diferenças nos locais os quais os experimentos foram realizados. Em comparação com o ambiente da UoH a UoS representa um local de análise muito mais complexo, sendo considerado mais complexo do que uma subestação real ambiente foco para o uso deste sistema de localização.

Baseado nessas energias, a estimação de localização foi obtida para ambos os estudos de caso. Na Figura 6.7 (a) pode-se observar o resultado para as medições realizadas na Universidade de *Strathclyde*, para a abordagem sem o detector de envoltória, ou seja, com o pulso coletado direto da antena e ainda considerando um índice de perdas de caminho de 2 (espaço livre), temos um erro na estimação de posição (distancia entre a

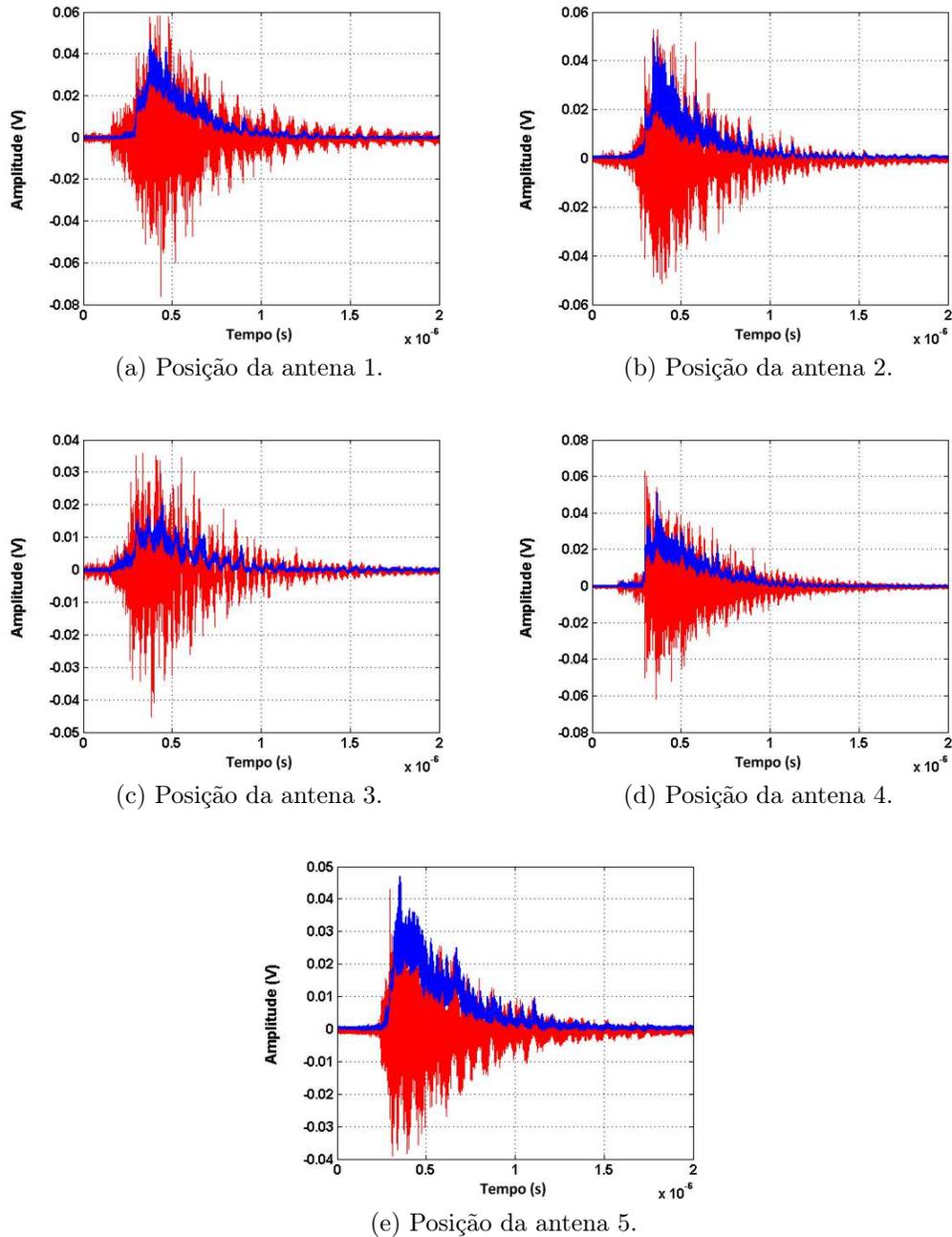
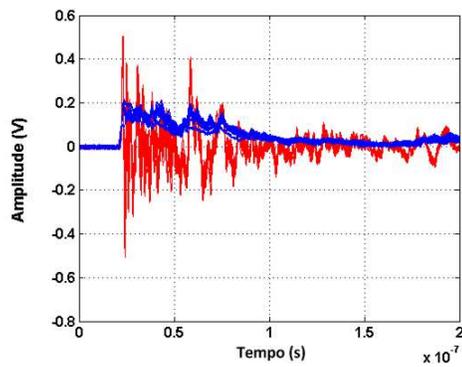
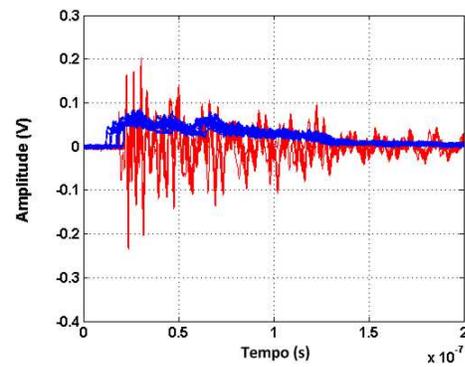


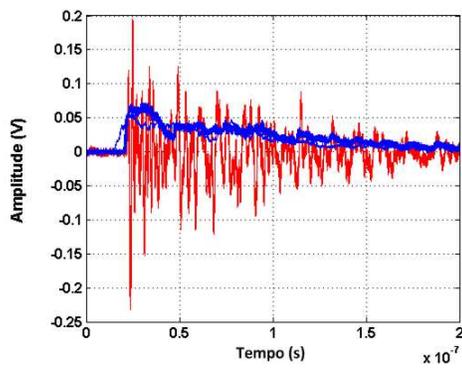
Figura 6.5: Curvas do comportamento dos pulsos para as diferentes posições monitoradas. Experimento realizado na UoS.



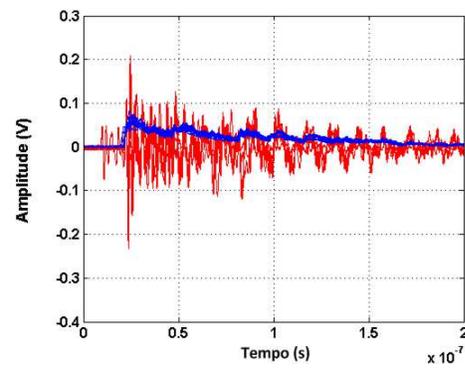
(a) Posição da antena 1.



(b) Posição da antena 2.



(c) Posição da antena 3.



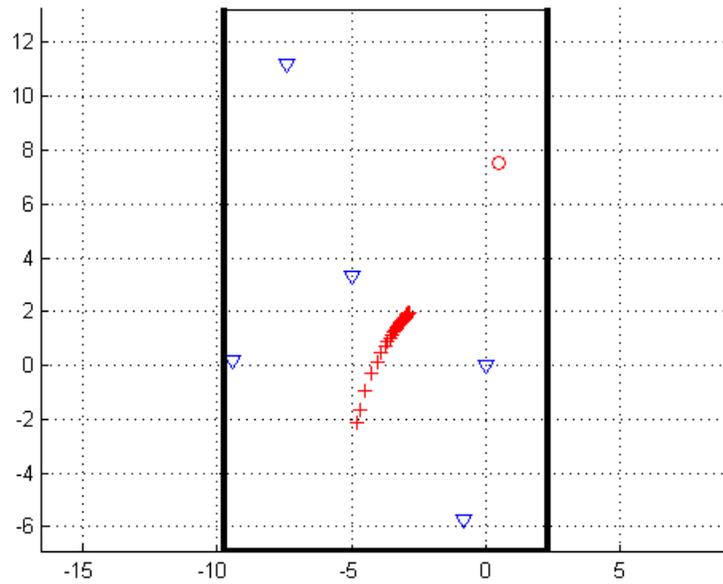
(d) Posição da antena 4.

Figura 6.6: Curvas do comportamento dos pulsos para as diferentes posições monitoradas. Experimento realizado na UoH.

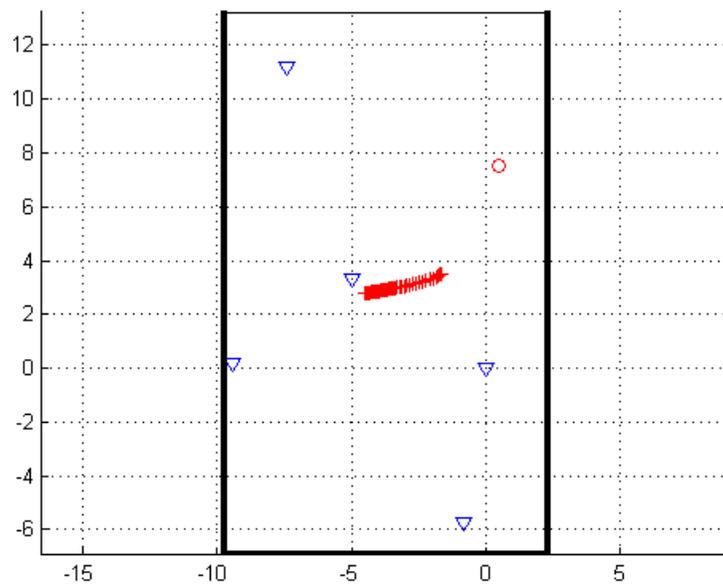
posição real e a posição estimada) de 6,8913 m. Para as medições realizadas utilizando a abordagem com detector de envoltória, Figura 6.7 (b), o erro é de 5,9423 m.

Nas Figuras 6.8 (a e b) podemos observar os resultados para as medições realizadas na Universidade de *Huddersfield*, com e sem detector de envoltória respectivamente. Assumindo o mesmo índice de perdas,  $n = 2$ , temos um erro de 2,2310 m sem detector e 0,9256 m com detector. Podendo-se ainda obter um erro mínimo de 0,7193 m para um índice de perdas  $n = 1,4$ , que se aproxima ao limite inferior da faixa de 1,6-1,8 que representa o índice de perdas de um ambiente típico de construção, com pouco material metálico se comparado com o ambiente representado pela UoS. Em ambas as Figuras 6.7 e 6.8, O círculo vermelho representa a posição da fonte de DP e as cruzes vermelhas representam diferentes estimativas de distancia para diferentes índices de perda.

O erro associado às medições na UoS é grande demais considerando as dimensões da sala onde o experimento foi realizado, fato este leva ao questionamento da validade dos dados. Uma forma de verificar a influência do ambiente face os dados levantados é comparando a correlação entre os pulsos de uma mesma posição e de diferentes posições. Quando comparados os coeficientes de correlação obtidos com uso dos dados de cada posição da antena para as medições realizadas na Universidade de *Strathclyde*, podemos observar que o nível de correlação entre pulsos da mesma posição é alto, como esperado.

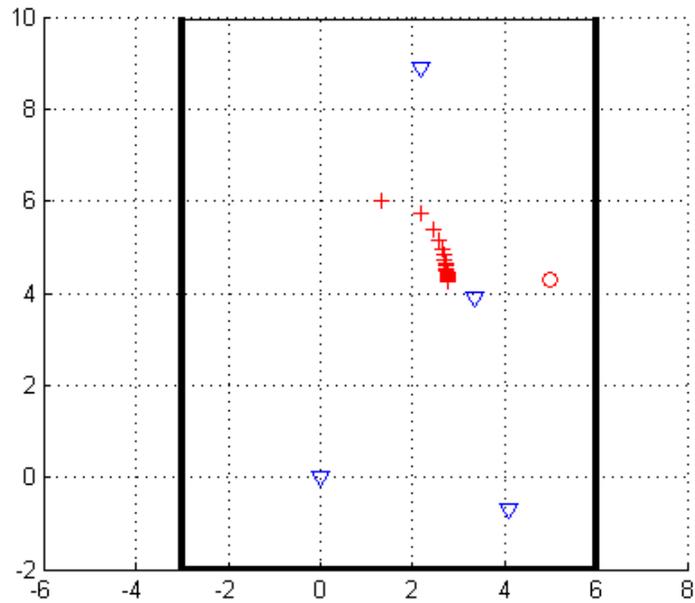


(a)

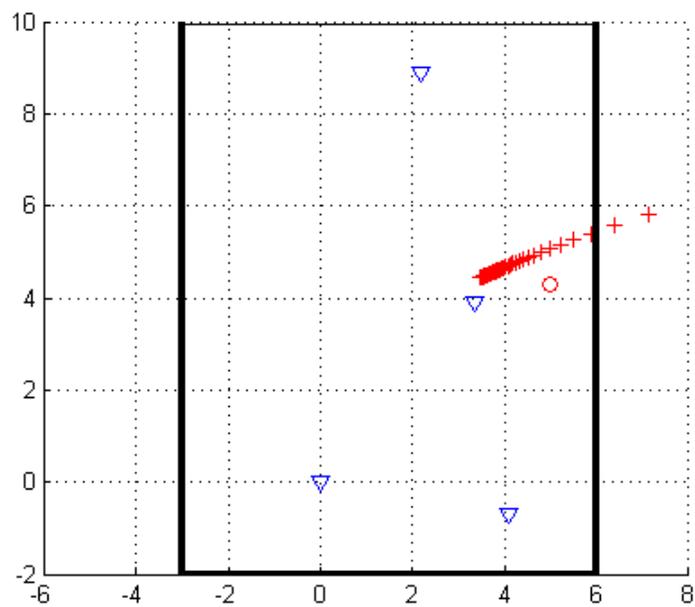


(b)

Figura 6.7: Diagramas representativos da estimativa de localização baseada na medição de potência realizada na UoS. (a) Sem o detector de envoltória, (b) com o detector de envoltória. Eixos em metros.



(a)



(b)

Figura 6.8: Diagramas representativos da estimativa de localização baseada na medição de potência realizada na UoS. (a) Sem o detector de envoltória, (b) com o detector de envoltória. Eixos em metros.

Tabela 6.2: Coeficientes de correlação para os pulsos obtidos na UoS.

|    | P1                     | P2      | P3                     | P4      | P5      |
|----|------------------------|---------|------------------------|---------|---------|
| P1 | 0,5479                 | -0,0192 | $3,4581 \cdot 10^{-5}$ | 0,0394  | -0,0223 |
| P2 | -0,0192                | 0,7908  | -0,0056                | -0,0558 | -0,0059 |
| P3 | $3,4581 \cdot 10^{-5}$ | -0,0056 | 0,9277                 | -0,0727 | -0,0717 |
| P4 | 0,0394                 | -0,0558 | -0,0727                | 0,9237  | -0,0393 |
| P5 | -0,0223                | -0,0059 | -0,0717                | -0,0393 | 0,6254  |

Tabela 6.3: Coeficientes de correlação para os pulsos obtidos na UoH.

|    | P1      | P2      | P3     | P4      |
|----|---------|---------|--------|---------|
| P1 | 0,8865  | -0,0617 | 0,1505 | 0,1008  |
| P2 | -0,0617 | 0,8498  | 0,1888 | -0,0740 |
| P3 | 0,1505  | 0,1888  | 0,9625 | 0,2853  |
| P4 | 0,1008  | -0,0740 | 0,2853 | 0,8058  |

A partir do momento que estes pulsos de uma mesma posição, são comparados com os pulsos de outra posição, temos um nível de correlação baixo, Tabela 6.2. Esta análise aponta uma característica importante, o fato dos pulsos não serem correlacionados, ou correlacionados de forma muito baixa, comprova um comportamento bastante variável é relação à forma do pulso. Vale salientar que essa análise não é completamente correta visto que para uma completa prova da influência do ambiente, deveria ser considerado um mesmo pulso obtido por diferentes antenas. Porém, dada à análise estatística de vários pulsos, podemos considerar que baseado no conjunto de pulsos obtidos, a correlação nos dá uma perspectiva do quão semelhantes esses pulsos são. Para termos uma melhor comparação, foi calculada a correlação dos pulsos obtidos na Universidade de *Huddersfield*. Espera-se que devido à minimização da reflexão/refração dos pulsos no ambiente, estes além de possuírem uma maior correlação para cada posição isolada, também possuam uma maior correlação entre posições, quando comparados com os resultados obtidos na UoS. Como observado na Tabela 6.3, os resultados da correlação baseada nos dados da UoH são factíveis com a análise realizada.

# Capítulo 7

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Os princípios de um sistema de baixa complexidade, não sincronizado, utilizando radiômetros para monitoramento em tempo real da intensidade de DP em diferentes configurações de defeitos, bem como a localização de fontes de DP foram descritas. Tal sistema seria um componente significativo no futuro *Smart Grid*.

Os primeiros passos para a implementação do sistema foram a confecção de um sensor radiométrico, representado pela antena, detector de envelope e sistema de aquisição de dados. Este sensor foi utilizado para obtenção de dados necessários à simulação do processo de propagação do pulso de descarga parcial no ambiente. A antena *diskcone* provou sua eficiência na medição de sinais de banda larga, com uma escala prática de frequência entre 200 MHz e 2 GHz.

Para a obtenção de um conjunto de dados representativos de descargas parciais foram utilizadas diferentes células geradoras de DP, cada uma apresentou uma característica particular referente ao padrão de geração de pulsos. Essas características representavam diferentes aspectos, tais como tipo de DP, intensidade, dentre outras. Um conjunto de pulsos foi armazenado e utilizado como base de dados para a simulação do processo de transmissão do sinal.

Esta simulação foi utilizada para investigar a plausibilidade e sensibilidade de um receptor radiométrico em espaço livre empregando detecção de envelope como solução para minimização das características de amostragem do pulso de DP. Os dados medidos foram usados para modelar por meio da repetibilidade do pulso, uma fonte de DP. Um modelo de perda de percurso em espaço livre foi utilizado para simular a perda de transmissão e uma interferência coerente de banda estreita foi modelada por meio da extração de um conjunto de portadoras medidas no espectro de fundo. A largura de

banda de detecção do receptor simulado é de 550 MHz. A largura de banda pós-detecção é de 50 MHz. Isto produz uma relação sinal/ruído satisfatória até uma distância de, pelo menos, 10 m da fonte. O detector de envelope é uma ferramenta que permite que o requerimento sobre a taxa de amostragem do sistema de aquisição de dados seja reduzida a custa da SNR e, portanto, proporciona um mecanismo conveniente para a troca destas quantidades.

É desejável uma taxa de amostragem o mais baixa possível (consistente com a SNR mínima necessária) uma vez que isto reduz o custo do ADC. Isso também reduz a potência necessária para (i) conduzir o ADC e (ii) processar dados localmente e/ou transmitir os dados para um nó base. Isto é importante se a energia usada para alimentar os radiômetros é obtida através energia solar, por exemplo.

Além da base de dados adquirida, o conjunto de experimentos realizado proporcionou a definição de uma célula geradora de DP com um padrão de intensidade estável durante o tempo do experimento. Essa característica é extremamente importante, visto as limitações do processo de medição. Limitações essas que estão associadas com a variação de energia com a distância e o não conhecimento da potência transmitida associada a cada pulso.

Os resultados demonstram que um sistema viável de detecção de descargas parciais pode ser implementado usando um sistema radiométrico e essa viabilidade depende basicamente do detector de envelope, uma vez que este é o componente do núcleo do radiômetro, permitindo o impulso ser amostrado com taxas baixas, da ordem de dezenas de MHz, sem perder informação significativa da energia associada. Sua sensibilidade para os experimentos realizados permite medições dentro de um alcance de até 12 m, a partir de fontes de DP de entre 600 pC à 700 pC, com -30,45 dB a 12 m. Este é apenas um exemplo, mas para medições em um ambiente real deve ser utilizado um receptor mais sensível, com a utilização de um amplificador antes de o detector de envelope. No entanto, esses resultados são suficientemente encorajadores para justificar a continuação do desenvolvimento da abordagem com detector de envelope para detecção DP radiométrica. Os testes realizados para a verificação de funcionalidade dos algoritmos de localização provaram ser de bastante utilidade, pois indicaram uma abordagem que supre os problemas inerentes a um sistema de localização de DP, como por exemplo, a ausência da informação da potência transmitida pela fonte de DP. A estimativa de localização é altamente dependente do ambiente no qual o sistema é implementado. Para as medições feitas na Universidade de *Strathclyde*, os resultados estão longe de serem aceitáveis, considerando as dimensões da sala, isso aconteceu devido ao nível

de complexidade do ambiente, composto por muitos obstáculos, vários metálicos, e do isolamento metálico presente nas paredes que faz todo o lugar apresentar um comportamento semelhante ao de medições no interior de uma grande gaiola de *Faraday*.

Com um erro mínimo de aproximadamente 70 cm entre a posição real e a posição estimada da fonte de descargas parciais, os resultados para a Universidade de *Huddersfield* representam a eficiência do sistema proposto bem como da rotina de estimação de localização usada para determinar aproximadamente a posição da fonte de DP. Baseado nesses resultados pode-se afirmar que os objetivos propostos foram alcançados, desde que a prova do princípio de um sistema de detecção radiométrico para estimação da localização de uma fonte de DP foi realizada com sucesso.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Face os resultados alcançados com o sistema desenvolvido propõem-se a continuidade da pesquisa com a evolução do sistema. Esta evolução engloba o refinamento do que já foi aplicado e o desenvolvimento de partes fundamentais para sua implementação em um cenário real, ou seja, uma subestação de energia. Desse modo, espera-se que no futuro tenha-se:

- desenvolvimento de um protótipo integrado, com tecnologia de comunicação sem fio;
- aumento da sensibilidade do sistema pelo uso de um amplificador de baixo ruído (LNA);
- aplicação de um método de calibração do sistema pelo uso de um gerador de descargas parciais portátil;
- refinamento do algoritmo de estimação de localização de DP;
- correção de possíveis falhas no protótipo e implementação em um cenário real;
- desenvolvimento de um sistema de suprimento de energia com uso de células solares para substituir as baterias convencionais.

# Referências Bibliográficas

- [1] K AAMODT. *Application Note AN042 (Rev. 1.0)*. 2006. Published: Section 5, Inductor and Flyback Transformer Design.
- [2] A. Akbari, P. Werle, H. Borsi, and E. Gockenbach. High frequency transformer model for computation of sectional winding transfer functions used for partial discharge localization. In *Proceedings of the 12th International Symposium on High Voltage Engineering, Bangalore, India*, pages 46–51, 2001.
- [3] Analog Devices. *ADL5511: DC to 6 GHz ENVELOPE AND TruPwr RMS Detector*. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADL5511.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADL5511.pdf), Acessado em Setembro 2013.
- [4] R. Bartnikas. Partial discharges. their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 9(5):763 – 808, October 2002.
- [5] S.A. Boggs. Partial discharge. III. cavity-induced PD in solid dielectrics. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 6(6):11–16, November 1990.
- [6] S.A. Boggs and G.C. Stone. Fundamental limitations in the measurement of corona and partial discharge. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, (2):143–150, 1982.
- [7] P. Brown. Nonintrusive partial discharge measurements on high voltage switchgear. In *Monitors and Condition Assessment Equipment (Digest No. 1996/186), IEE Colloquium on*, pages 10/1–10/5, Dec 1996.
- [8] A. Calónico. Prevention before malfunction: Partial discharge analysis. *Technology Matters*, pages 10—13, June 2009.

- [9] S.R. Campbell, G.C. Stone, and H.G. Sedding. Characteristics of partial discharge pulses from operating rotating machines. In *Electrical Insulation, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on*, pages 229–232. IEEE, 1994.
- [10] A. Cavallini, F. Ciani, G. Mazzanti, and G.C. Montanari. First electron availability and partial discharge generation in insulation cavities: effect of light irradiation. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 12(2):387 – 394, April 2005.
- [11] A. Cavallini, G.C. Montanari, A. Contin, and F. Pulletti. A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 19(2):23 –30, April 2003.
- [12] K. Daeyoung, M.A. Ingram, and Jr. Smith, W.W. Measurements of small-scale fading and path loss for long range RF tags. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 51(8):1740 – 1749, August 2003.
- [13] J.M.R. de Souza Neto, T.C.M. Cavalcanti, J.S. da Rocha Neto, and I.A. Glover. Partial discharge detection and location in electricity substations for the self-diagnosing smart grid. September 2012.
- [14] J.M.R. de Souza Neto, J.S. da Rocha Neto, L. Chang, R. Atkinson, K. Sasloglou, and I.A. Glover. A self-calibrating partial discharge WSN for condition monitoring in the future smart grid. In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, pages 1–7. IEEE, 2012.
- [15] J.M.R. de Souza Neto, E. Macedo, M. Batista, T.C.M. Cavalcanti, E. C. Guedes, J.S. da Rocha Neto, and I.A. Glover. Development of a partial discharge emulator for calibration of a radiometric PD detection system. In *International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2012)*, Graz, Austria, May 2012.
- [16] J.M.R. de Souza Neto, E. Macedo, M. Batista, T.C.M. Cavalcanti, E. C. Guedes, J.S. da Rocha Neto, and I.A. Glover. Early progress in the development of a radiometric PD location system. In *International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2012)*, Graz, Austria, May 2012.

- [17] J.M.R. de Souza Neto, J.J.C. Silva, T.C.M. Cavalcanti, D.P. Rodrigues, J.S. da Rocha Neto, and I.A. Glover. Propagation measurements and modeling for monitoring and tracking in animal husbandry applications. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE*, pages 1181–1185, May 2010.
- [18] E.M. Dembinski and J.L. Douglas. Calibration and comparison of partial-discharge and radio-interference measuring circuits. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, 115(9):1332–1340, 1968.
- [19] Doble Lemke. *Prospect PDS-100*. [http://www.doble-lemke.eu/en/Products/Partial\\_Discharge/PDS\\_100.html](http://www.doble-lemke.eu/en/Products/Partial_Discharge/PDS_100.html), 2011.
- [20] M. Doi, H. Muto, H. Fujii, and M. Kamei. Frequency spectrum of various partial discharges in GIS. In *Electrical Insulating Materials, 1998. Proceedings of 1998 International Symposium on*, pages 441–444, September 1998.
- [21] M.A. Elborki, P.A. Crossley, Z.D. Wang, A. Darwin, and G. Edwards. Detection and characterisation of partial discharges in transformer defect models. In *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, volume 1, pages 405–410 vol.1, July 2002.
- [22] Eletronix Handbook. *Discone VHF - UHF Antenna*, volume 1. First edition edition, 1997.
- [23] S. Farahani. *ZigBee Wireless Network and Transceivers*, volume 1. Newnes, 30 corporate drive, suite 400, burlington, MA 01803, USA, 1 edition, 2008.
- [24] R. Feinberg. Partial discharges: the engineering viewpoint. *Electronics and Power*, 11(6):203, 1965.
- [25] C. Forssan. *Partial discharges in cylindrical cavities at variable frequency of the applied voltage*. Number 2005:13 in Trita-ETS. KTH, School of Electrical Engineering (EES), 2005. QC 20101129.
- [26] K.W. Forsyth. Corona detector with narrow-band optical filter, March 1999. US Patent 5,886,344.

- [27] A.M. Gaouda. Adaptive partial discharge monitoring system for future smart grids. In *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, pages 4982–4987. IEEE, 2013.
- [28] S. M. Gargari, P.A.A.F. Wouters, P.C.J.M. van der Wielen, and E.F. Steennis. Partial discharge parameters to evaluate the insulation condition of on-line located defects in medium voltage cable networks. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 18(3):868–877, 2011.
- [29] F. Garnacho, M.A. Sanchez-Uran, J. Ortego, F. Alvarez, and A. Gonzalez. Control of insulation condition of smart grids by means of continuous PD monitoring. In *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*, pages 1–4, June 2013.
- [30] I. A. Glover and P. M. Grant. *Digital Communications*, volume 1. Prentice Hall, second edition edition, 2004.
- [31] A. Goldsmith. *Wireless communications*. Cambridge University Press, Cambridge; New York, 2005.
- [32] J. Gorablenkow, T. Huecker, and U. Schichler. Application of UHF partial discharge monitoring and expert system diagnosis. In *Electrical Insulation, 1998. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on*, volume 1, pages 61 –64 vol.1, June 1998.
- [33] K. Govender, L. Moodley, A. Nesbitt, et al. Partial discharge detection using RFI measurements. *Transmission and Distribution*, pages 26—28, 2010.
- [34] I.S. Hammoodi, B.G. Stewart, A. Kocian, S.G. McMeekin, and A. Nesbit. Wireless sensor networks for partial discharge condition monitoring. In *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [35] B. Hampton. UHF diagnostics for gas insulated substations. In *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467)*, volume 5, pages 6 –16 vol.5, 1999.
- [36] B.F. Hampton and R.J. Meats. Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, 135(2):137 –145, March 1988.

- [37] T. Han, B. Du, Y. Gao, and Y. Xia. Partial discharge pattern recognition based on transient earth voltage for 10 kV switchgear in smart grid. *Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE*, pages 1–4, 2012.
- [38] R. M. Harris and M.D. Judd. Locating partial discharge using particle swarm optimisation. In *Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of 2011 46th International*, pages 1–6. VDE, 2011.
- [39] G. M. Hashmi. Partial discharge detection for condition monitoring of covered-conductor overhead distribution networks using rogowski coil. 2008.
- [40] W. Hauschild and E. Lemke. *Partial Discharge Measurement*. Springer, 3rd edition edition, December 2000.
- [41] X. He, G. Xie, and Y. Jiang. Online partial discharge detection and location system using wireless sensor network. *Energy Procedia*, 12:420–428, 2011.
- [42] E. Hecht. *Optics*. Pearson, isbn: 0-321-18878-0, 2002.
- [43] M. Hikita, H. Yamashita, T. Hoshino, T. Kato, N. Hayakawa, T. Ueda, and H. Okubo. Electromagnetic noise spectrum caused by partial discharge in air at high voltage substations. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 13(2):434–439, April 1998.
- [44] M. Hikita, H. Yamashita, T. Kato, N. Hayakawa, T. Ueda, and H. Okubo. Electromagnetic spectrum caused by partial discharge in air under AC and DC voltage application. In *Properties and Applications of Dielectric Materials, 1994., Proceedings of the 4th International Conference on*, volume 2, pages 570–573 vol.2, July 1994.
- [45] IEEE. IEEE standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks - specific requirement part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs). *IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, pages 1–203, 2007.
- [46] T. Ju, X. Zhongrong, Z. Xiaoxing, and S. Caixin. GIS partial discharge quantitative measurements using UHF microstrip antenna sensors. In *Electrical Insulation*

- and Dielectric Phenomena, 2007. CEIDP 2007. Annual Report - Conference on*, pages 116–119, October 2007.
- [47] M.D. Judd. Radiometric partial discharge detection. In *Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on*, pages 1025–1030, April 2008.
- [48] M.D. Judd, O. Farish, and B.F. Hampton. Broadband couplers for UHF detection of partial discharge in gas-insulated substations. *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -*, 142(3):237–243, May 1995.
- [49] M.D. Judd, O. Farish, J.S. Pearson, T. Breckenridge, and B.M. Pryor. Power transformer monitoring using UHF sensors: installation and testing. In *Electrical Insulation, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on*, pages 373–376. IEEE, 2000.
- [50] M.D. Judd, B.F. Hampton, and O. Farish. Modelling partial discharge excitation of UHF signals in waveguide structures using green’s functions. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 143(1):63–70, 1996.
- [51] M.D. Judd, B.M. Pryor, S.C. Kelly, and B.F. Hampton. Transformer monitoring using the UHF technique. In *IEE conference publication*, pages 5–362. Institution of Electrical Engineers, 1999.
- [52] M.D. Judd, A.J. Reid, L. Yang, B.G. Stewart, and R.A. Fouracre. A new integrated diagnostic partial discharge monitoring strategy for HV plant items: combining UHF couplers and the IEC60270 standard. volume 2005, pages v1–93–v1–93. IEE, 2005.
- [53] M.D. Judd, L. Yang, and I.B.B. Hunter. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. part i: sensors and signal interpretation. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 21(2):5–14, April 2005.
- [54] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy. Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting. In *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 2, pages 1012–1022 vol.2, March 2004.

- [55] R. Kuppuswamy. On the UHF partial discharge measurement in transformers. In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003. Annual Report. Conference on*, pages 349 – 352, October 2003.
- [56] R. Kuppuswamy and S. Lelaidier. Experience with UHF partial discharge measurements. In *Dielectric Liquids, 2002. ICDL 2002. Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on*, pages 239 – 241, 2002.
- [57] S. Kyperountas. Practical considerations of localization in ZigBee networks, June 2006. ZigBee Developers Conference.
- [58] J. Li, S. Grzybowski, L. Du, and Y. Wang. Extraction of partial discharges from noises by use of wavelet and pulse-sequence analysis. In *2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pages 656–659, 2006.
- [59] J. Li, C. Sun, and S. Grzybowski. Partial discharge image recognition influenced by fractal image compression. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 15(2):496 –504, April 2008.
- [60] X. Ma, C. Zhou, and I.J. Kemp. Automated wavelet selection and thresholding for PD detection. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(2):37–45, March 2002.
- [61] E. Macedo, J.M.R. de Souza Neto, J. M. Villanueva, E. C. Guedes, R. Freire, and I. A. Glover. Partial discharge estimation based on radiometric and classical measurements. In *International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2012)*, Graz, Austria, May 2012.
- [62] W. Q. Malik and B. Allen. Wireless sensor positioning with ultrawideband fingerprinting. In *Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007. The Second European Conference on*, pages 1 –5, November 2007.
- [63] G. Mao and B. Fidan. *Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Network*, volume 1 of *Premier Reference Sources*. Information Science Reference, 1 edition, 2009.
- [64] J.H. Mason. Enhancing the significance of PD measurements. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 2(5):876 –888, October 1995.

- [65] I. W. McAllister and G.C. Crichton. Influence of bulk dielectric polarization upon partial discharge transients: Effect of void geometry and orientation. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 12(2):240–247, 2005.
- [66] X. Miao, X. Chen, X. Ma, G. Liu, H. Feng, and X. Song. Comparing smart grid technology standards roadmap of the IEC, NIST and SGCC. In *Electricity Distribution (CICED), 2012 China International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2012.
- [67] M. Michel. Comparison of off-line and on-line partial discharge MV cable mapping techniques. In *Electricity Distribution, 2005. CIREN 2005. 18th International Conference and Exhibition on*, pages 1–6, June 2005.
- [68] P.J. Moore, I.E. Portugues, and I.A. Glover. Remote diagnosis of overhead line insulation defects. In *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, pages 1831–1835 Vol.2, June 2004.
- [69] P.J. Moore, I.E. Portugues, and I.A. Glover. Radiometric location of partial discharge sources on energized high-voltage plant. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 20(3):2264–2272, July 2005.
- [70] P.J. Moore, I.E. Portugues, and I.A. Glover. Partial discharge investigation of a power transformer using wireless wideband radio-frequency measurements. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 21(1):528–530, January 2006.
- [71] Netcomposites. *Acoustic Emission*. <http://www.netcomposites.com/ikb/Topics/Defects/AE%20Defects%20Acoustic%20Emission/AE%20Brunel%20Modal%20Schematic.png>, Acessado em Setembro 2013.
- [72] M.G. Niasar. Partial discharge characteristics due to air and water vapor bubbles in oil. In *ISH 2011*, August 2011.
- [73] S.J. Orfanidis. *Electromagnetic Waves and Antennas*. <http://www.ece.rutgers.edu/orfanidi/ewa/>, Acessado em Agosto 2010.
- [74] V. Padma and V.S. Raghavan. Analysis of insulation degradation in epoxy insulators using finite element method. In *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on*, pages 498–503. IEEE, 2012.

- [75] J.S. Pearson, B.F. Hampton, and A.G. Sellars. A continuous UHF monitor for gas-insulated substations. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 26(3):469–478, 1991.
- [76] A. Pedersen, I. W. McAllister, G. C. Crichton, and S. Vibholm. Formulation of the streamer breakdown criterion and its application to strongly electronegative gases and gas mixtures. *Archiv fÃœr Elektrotechnik*, 67(6):395–402, November 1984.
- [77] A.J.M Pemen, W.R. Rutgers, T.J.M. Van Rijn, and Y.H. Fu. On-line partial discharge monitoring of HV components. In *IEE conference publication*, pages 5–136. Institution of Electrical Engineers, 1999.
- [78] I. Portugues, P.J. Moore, and I.A. Glover. Characterisation of radio frequency interference from high voltage electricity supply equipment. In *Antennas and Propagation, 2003. (ICAP 2003). Twelfth International Conference on (Conf. Publ. No. 491)*, volume 2, pages 820 – 823 vol.2, April 2003.
- [79] I. Portugues, P.J. Moore, and I.A. Glover. Frequency domain characterisation of partial discharges via a non-invasive measurement system. In *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on*, volume 3, pages 835 – 838 vol.3, June 2003.
- [80] I.E. Portugues, P.J. Moore, and I.A. Glover. The effect of multipath in time domain characterization of partial discharges. In *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on*, volume 1, pages 311–314. IEEE, 2003.
- [81] I.E. Portugues, P.J. Moore, I.A. Glover, C. Johnstone, R.H. McKosky, M.B. Goff, and L. van der Zel. RF-Based partial discharge early warning system for air-insulated substations. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 24(1):20 –29, January 2009.
- [82] J.G. Proakis. *Digital communications*. McGraw-Hill, isbn: 0072321113 9780072321111 0071181830 9780071181839, Boston, 2001.
- [83] K. Raja, F. Devaux, and S. Lelaidier. Recognition of discharge sources using UHF PD signatures. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 18(5):8 –14, October 2002.

- [84] T.S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*, volume 1. Prentice Hall, second edition edition, 2002.
- [85] A. J. Reid, M.D. Judd, R.A. Fouracre, B.G. Stewart, and D.M. Hepburn. Simultaneous measurement of partial discharges using IEC60270 and radio-frequency techniques. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 18(2):444–455, 2011.
- [86] S. Rengarajan, R.N. Parmar, A. Bhoomaiah, and J.S. Kuntia. Development of an UHF detection system for partial discharge measurement in transformer insulation. In *Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on*, pages 100 –103, June 2008.
- [87] A. Rodrigo, P. Llovera, V. Fuster, and A. Quijano. Study of partial discharge charge evaluation and the associated uncertainty by means of high frequency current transformers. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 19(2):434–442, 2012.
- [88] D. Russwurm. Partial discharge measurements and diagnostics on power transformers using a multi channel digital DP detector. Alexandria, Virginia, September 2000. HV Testing.
- [89] A. Santosh Kumar, R.P. Gupta, K. Udayakumar, and A. Venkatasami. Online partial discharge detection and location techniques for condition monitoring of power transformers: a review. In *Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on*, pages 927–931. IEEE, 2008.
- [90] U. Schichler, J. Gorablenkow, and A. Diessner. UHF PD detection in GIS substations during on-site testing. 2000.
- [91] S.Y. Seidel and T.S. Rappaport. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 40(2):207–217, February 1992.
- [92] S. Shihab and K.L. Wong. Detection of faulty components on power lines using radio frequency signatures and signal processing techniques. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, volume 4, pages 2449 –2452 vol.4, 2000.

- [93] A. Singhal and R. P. Saxena. Software models for smart grid. In *Software Engineering for the Smart Grid (SE4SG), 2012 International Workshop on*, pages 42–45, June 2012.
- [94] B. Sklar. *Digital communications: fundamentals and applications*. Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, N.J., 2001.
- [95] C. Smith, P. Fleming, and M. Michel. Advances in continuous partial discharge monitoring. CIRED, 2007.
- [96] S.M. Strachan, S. Rudd, S.D.J. McArthur, M.D. Judd, S. Meijer, and E. Gulski. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 15(1):259–268, 2008.
- [97] W.L. Stutzman and G.A. Thiele. *Antenna Theory and Design*, volume 1. First edition edition, 1981.
- [98] Y. Sun, H. Yin, Q. Zhang, F. Yu, H. Wang, and Y. Qiu. Partial discharge detection for GIS using narrow band ultra-high-frequency (UHF) method. In *Electrical Insulating Materials, 2005.(ISEIM 2005). Proceedings of 2005 International Symposium on*, volume 3, pages 748–751. IEEE, 2005.
- [99] M. Tozzi. *Partial discharges in power distribution electrical systems: Pulse propagation models and detection optimization*. PhD thesis, Ph. D. Thesis. Bologna, Italy 2010. University of Bologna, 2010.
- [100] P. Trnka, M. Svoboda, and J. Pihera. The specific aspects of degradation of electrical insulation under DC voltage. In *2013 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pages 112–115, 2013.
- [101] ttiinc. *Piezoelectric sensors*. <http://www.ttiinc.com/props/IO/19151/204/Piezoelectric-Ceramic-Shock-Sensors-Murata.jpg>, Acessado em Maio 2013.
- [102] S. Xiao, P.J. Moore, and M.D. Judd. Investigating the assessment of insulation integrity using radiometric partial discharge measurement. In *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on*, pages 1—7. IEEE, 2009.

- [103] S. Xiao, P.J. Moore, M.D. Judd, and I.E. Portugues. An investigation into electromagnetic radiation due to partial discharges in high voltage equipment. In *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pages 1–7. IEEE, 2007.
- [104] M. Yao. The application of temporary earth voltage (TEV) measurement in the online monitoring of the partial discharge of HV switch cabinet. In *Electricity Distribution (CICED), 2010 China International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [105] Qingming Yao, Fei-Yue Wang, Hui Gao, Kunfeng Wang, and Hongxia Zhao. Location estimation in ZigBee network based on fingerprinting. In *Vehicular Electronics and Safety, 2007. ICVES. IEEE International Conference on*, pages 1–6, December 2007.
- [106] K.Y. Yazdandoost and R. Kohno. The ultra-wideband signal propagation. In *Circuits and Systems, 2004. MWSCAS '04. The 2004 47th Midwest Symposium on*, volume 2, pages II-645–II-648 vol.2, July 2004.
- [107] D.C.M. Yuen and S.H. Chan. UHF partial discharge monitoring of 400 kV GIS at castle peak substation. In *Advances in Power System Control, Operation and Management, 1991. APSCOM-91., 1991 International Conference on*, pages 415–419. IET, 1991.
- [108] H. Zhang. *Advanced techniques application of on-line partial discharge detection in power cables*. PHD thesis, University of New South Wales. School of Electrical Engineering and Telecommunications, <http://www.library.unsw.edu.au/thesis/adt-NUN/public/adt-NUN20070515.140829/>, 2006.
- [109] X. Zhang, J. Zhou, N. Li, and Y. Wang. Suppression of UHF partial discharge signals buried in white-noise interference based on block thresholding spatial correlation combinative de-noising method. *IET Generation, Transmission Distribution*, 6(5):353–362, 2012.
- [110] X. Zheng, H. Cao, J. Tang, and X. Zhang. Application of sleeve monopole antenna for partial discharge detection in transformer. In *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010 International Conference on*, pages 293–296, October 2010.

- [111] M.U. Zuberi, A. Masood, E. Husain, and A. Anwar. Estimation of partial discharge inception voltages due to voids in solid sheet insulation. In *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, pages 124–128, June 2013.

# Apêndice A

## Publicações

### Artigos publicados em anais de congressos com autoria própria:

1. de Souza Neto, J. M. R., de Macedo, E. C. T., da Rocha Neto, J. S., da Costa, E.G., Bhatti, S. A. and Glover, Ian (2012). Partial discharge location using an unsynchronized radiometer network for condition monitoring and operational optimization in the future smart grid. In: UK Festival of Radio Science, 19th April 2012, The University of Durham. (Unpublished - media digital only)
2. de Souza Neto, J. M. R., de Macedo, E. C. T., Cavalcanti, T. C. M., Guedes, E. C., da Rocha Neto, J. S. and Glover, Ian (2012). Development of a partial discharge emulator for calibration of a radiometric PD detection system. In: 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. 13-16th May 2012, Graz, Austria. IEEE, pp. 2398-2403. ISBN 9781457717734
3. de Souza Neto, J. M. R., de Macedo, E. C. T., Batista, M. L. N., Cavalcanti, T. C. M., Guedes, E. C., da Rocha Neto, J. S. and Glover, Ian (2012). Early progress in the development of a radiometric PD location system. In: 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. 13-16th May 2012, Graz, Austria. IEEE, pp. 129-133. ISBN 9781457717734
4. de Souza Neto, J. M. R., de Macedo, E. C. T., da Rocha Neto, J. S., da Costa, E.G., Glover, Ian and Bhatti, S. A. (2012). Partial Discharge Location using Unsynchronized Radiometer Network for Condition Monitoring in HV Substations – A Proposed Approach. In: COMADEM 2012, 18th-20th June 2012, University of Huddersfield, UK. (Unpublished- media digital only)

5. de Souza Neto, J. M. R., Cavalcanti, T. C. M., da Rocha Neto, J. S. and Glover, Ian (2012). Partial discharge detection and location in electricity substations for the self-diagnosing smart grid. In: XIX Congresso Brasileiro de Automatica (CBA 2012), 2-6th September 2012, Campina Grande, Brazil. (Unpublished)
6. de Souza Neto, J. M. R., da Rocha Neto, J. S., Chang, Long, Atkinson, Robert, Sasloglou, Konstantinos and Glover, Ian (2012). A Self-Calibrating Partial Discharge WSN for Condition Monitoring in the Future Smart Grid. In: 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 14-17th October 2012, Berlin Germany. (Unpublished- media digital only)
7. de Souza Neto, J.M.R.; de Macedo, E.C.T.; da Rocha Neto, J.S.; Queiroz Vieira, M.F.; Glover, I.A.; Judd, M.D.; Atkinson, R.; Soraghan, J., "Plausibility of incoherent detection for radiometric monitoring of insulation integrity in HV substations," Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2013 Loughborough , vol., no., pp.494,499, 11-12 Nov. 2013 doi: 10.1109/LAPC.2013.6711949
8. de Souza Neto, J. M. R., de Macedo, E. C. T., da Rocha Neto, J. S., Glover, Ian and Judd, Martin (2014). An Envelope Detector as a Trading Cost Technique for Radiometric Partial Discharge Detection. In: 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2014).12-15th May 2014, Montevideo, Uruguay. (Accepted)

#### **Artigos publicados em anais de congresso como co-autor:**

1. Glover, Ian, de Souza Neto, J.M.R., Bhatti, S. A., da Rocha Neto, J.S., Vieira, M., Atkinson, R., Judd, M. and Soraghan, J.J. (2012). Radio science and wireless communications for the smart grid. In: 5th International Conference on Computers and Devices for Communication, 17-19th December 2012, Kolkate, India. (Unpublished- media digital only)
2. Macedo, E.C.T., Araujo, D.B., da Costa, E.G., Freire, R.C.S., Lopes, W.T.A., Torres, I.S.M., de Souza Neto, J. M. R., Bhatti, S. A. and Glover, Ian (2012). Wavelet Transform Processing Applied to Partial Discharge Evaluation. In: COMADEM 2012, 18th-20th June 2012, University of Huddersfield, UK. (Unpublished-media digital only)

3. Macedo, E.C.T., Villanueva, Juan, Araujo, Diego, da Costa , Edson G., Freire , Raimundo, de Souza Neto, J. M. R. and Glover, Ian (2012). Assessment of dielectric degradation by measurement, processing and classification of partial discharges. In: IEEE international power modulator and high voltage conference, 3-7th June 2012, San Diego, USA. (Unpublished- media digital only)
4. de Macedo, E. C. T., de Souza Neto, J. M. R., da Costa, E.G., Freire, R.C.S., Bhatti, S. A. and Glover, Ian (2012). Comparison of radiometric and classical partial discharge measurements. In: UK Festival of Radio Science, 19th April 2012, The University of Durham. (Unpublished)
5. Macedo, Euler Tavares, Villanueva, Juan, da Costa , Edson G., Freire , Raimundo, Neto, José Maurício and Glover, Ian (2013). The influence of Void Configuration in Statistical Parameters of Partial Discharge Signals. In: International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 6-9th May 2013, Minneapolis, USA. (Unpublished- media digital only)
6. Macedo, E.C.T., Neto, José Maurício, Villanueva, Juan, Guedes, E. C., Freire , Raimundo and Glover, Ian (2012). Partial Discharge Estimation Based on Radiometric and Classical Measurements. In: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 13-16th May 2012, Graz, Austria. (Unpublished- media digital only)
7. Euler Cássio Tavares de Macedo, Juan Moises Mauricio Villanueva, Edson Guedes da Costa, Raimundo Carlos Silvério Freire, José Maurício R. de S. Neto, Ian A Glover. Implementação de uma Rede Neural MLP Otimizada Aplicada a Identificação de Sinais de Descargas Parciais. XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI e XI Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações - DINCON, período de 13 a 17 de outubro de 2013, em Fortaleza, Ceará, Brasil.

**Artigos em revista:**

1. J M R de Souza Neto (IEEE member), E C T de Macedo, J S da Rocha Neto (IEEE senior member), E G da Costa, S A Bhatti and I A Glover. 2012. Partial Discharge Location using Unsynchronized Radiometer Network for Condition Monitoring in HV Substations - A Proposed Approach. J. Phys.: Conf. Ser. 364 012053.

2. E C T Macedo, D B Araújo, E G da Costa, R C S Freire, W T A Lopes, I S M Torres, J M R de Souza Neto, S A Bhatti and I A Glover. 2012. Wavelet transform processing applied to partial discharge evaluation. *J. Phys.: Conf. Ser.* 364 012054.

# Appendix B

## Validação das Medições

Os experimentos 1 e 2 foram feitos com o mesmo defeito de isolamento no interior da célula BR1, o que explica a intensidade de DP ter o mesmo nível (1000 de pC). A fonte de alimentação de alta tensão foi ligada no início de cada experimento (1 e 2) e, em seguida, desligada. Para realizar o ensaio 7, com a mesma célula (BR1), uma nova falha de isolamento foi usada gerando uma diferença entre o nível de DP das experiências 1 e 2, em comparação com a experiência 7. Para o experimento 3 foi utilizada a célula UK1. Apesar de o uso de uma mesma célula DP (UK2) nos experimentos 4 e 5, a intensidade de DP é bastante diferente entre as experiências. Esta alteração foi observada após a nova posição assumida pela célula, que foi a única alteração significativa na configuração utilizada. Também neste caso, a tensão de alimentação foi desligada entre as experiências (4 e 5). O experimento 6 utilizou a célula UK3. As experiências 8, 9 e 10 foram feitas usando a célula geradora de DP estável. Cada teste foi feito separadamente, com o acionamento e desligamento da tensão de alimentação em cada experimento. Para os experimentos de 11 a 18 o fornecimento de energia foi ligado e desligado apenas uma vez. Estes experimentos foram realizados todos sobre uma linha radial em relação a fonte geradora, apenas mudando a distância da antena. O comportamento de cada experimento foi salvo e pode ser observado a partir das telas representadas nas figuras abaixo.

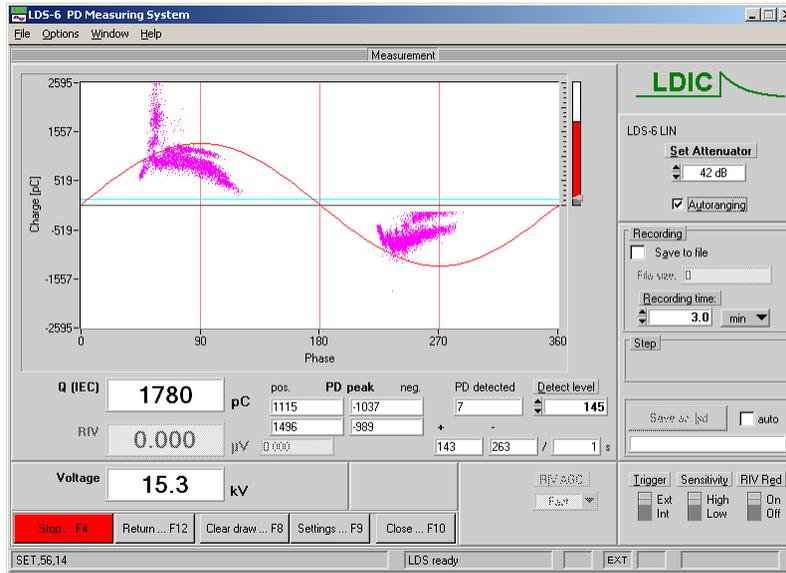


Figura B.1: Experimento 1, usando a célula BR1.

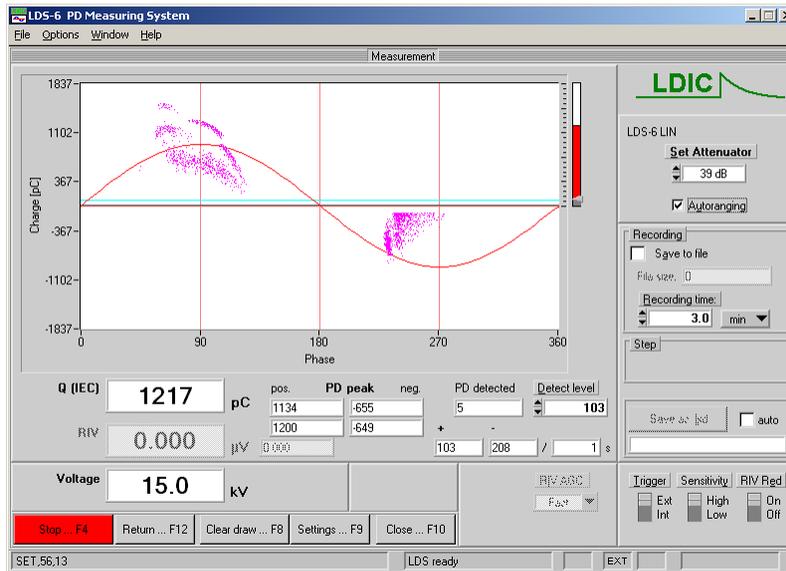


Figura B.2: Experimento 2, usando a célula BR1.

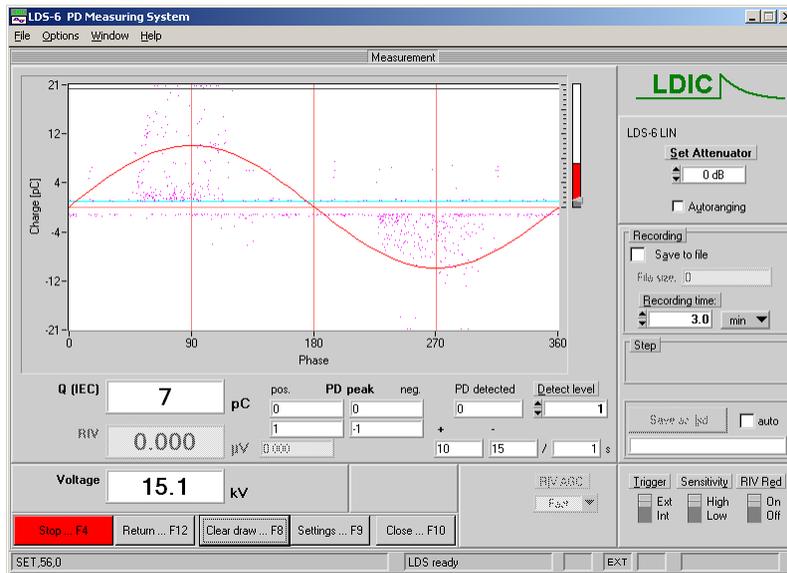


Figura B.3: Experimento 3, usando a célula UK1.

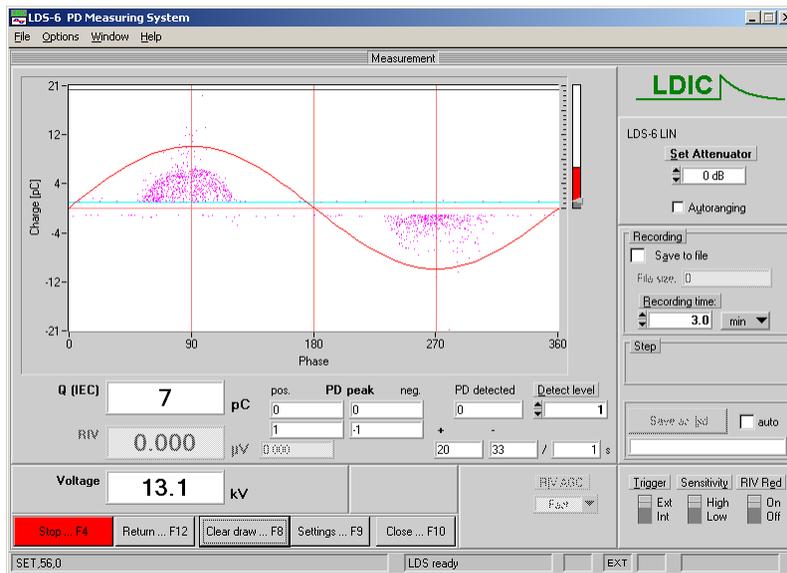


Figura B.4: Experimento 4, usando a célula UK2.

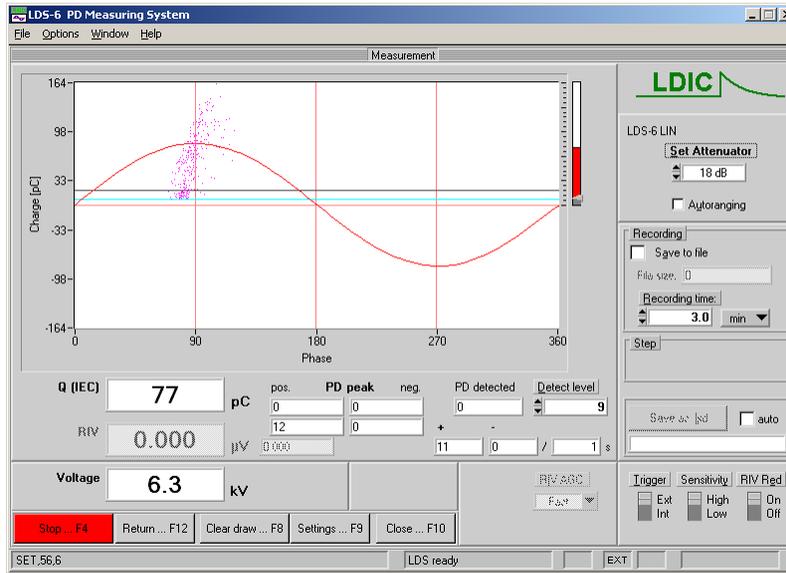


Figura B.5: Experimento 5, usando a célula UK2.

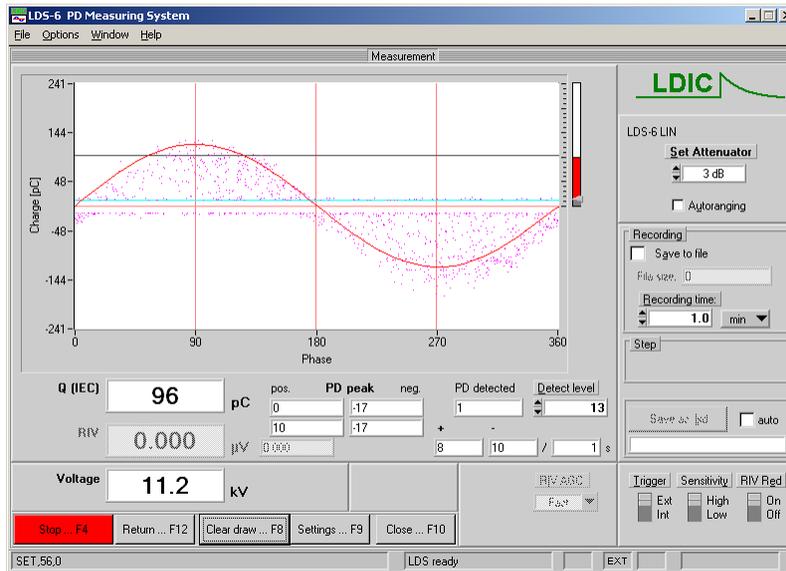


Figura B.6: Experimento 6, usando a célula UK3.

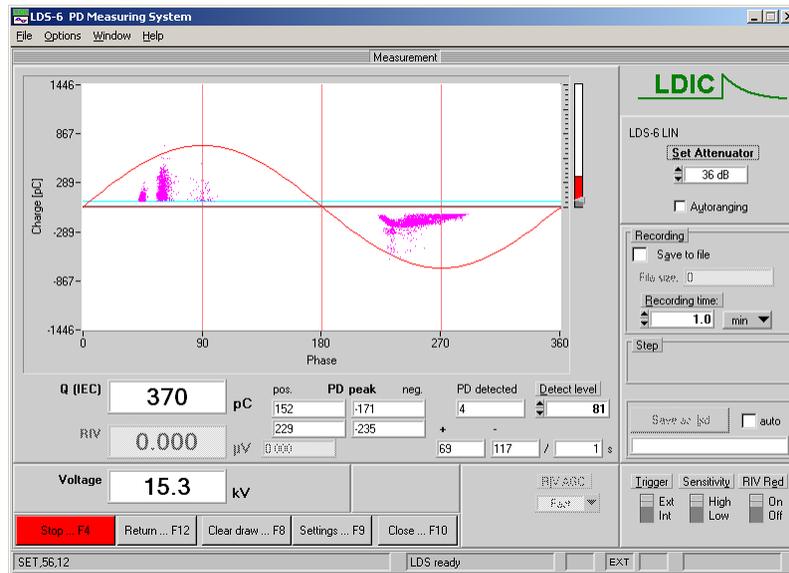


Figura B.7: Experimento 7, usando a célula BR1.

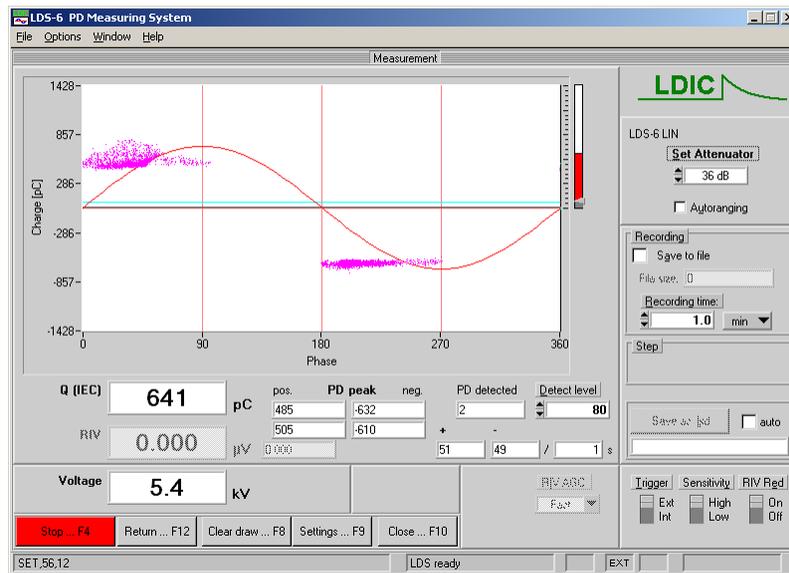


Figura B.8: Experimento 8, usando a célula UK4.

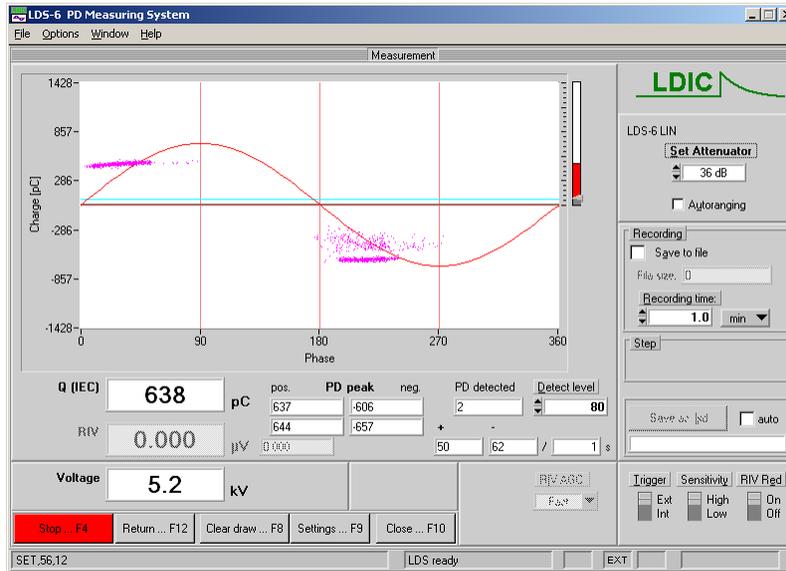


Figura B.9: Experimento 10, usando a célula UK4.

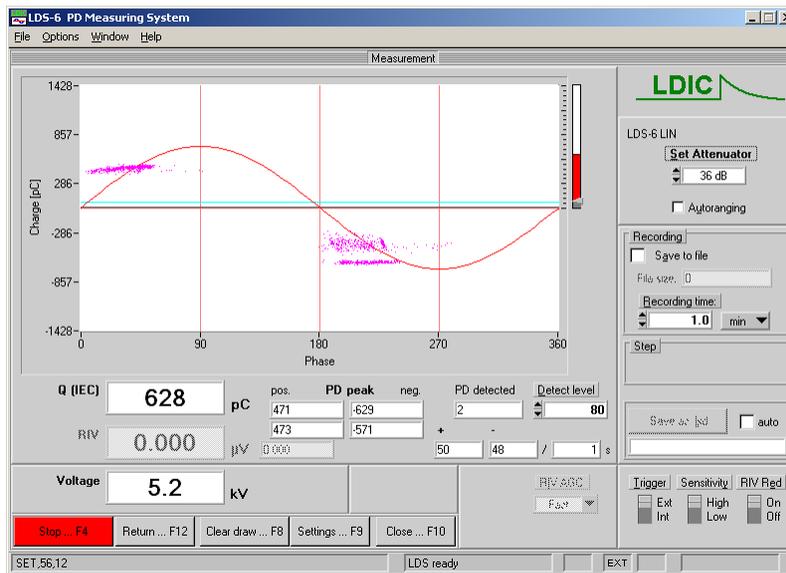


Figura B.10: Experimento 11, usando a célula UK4.

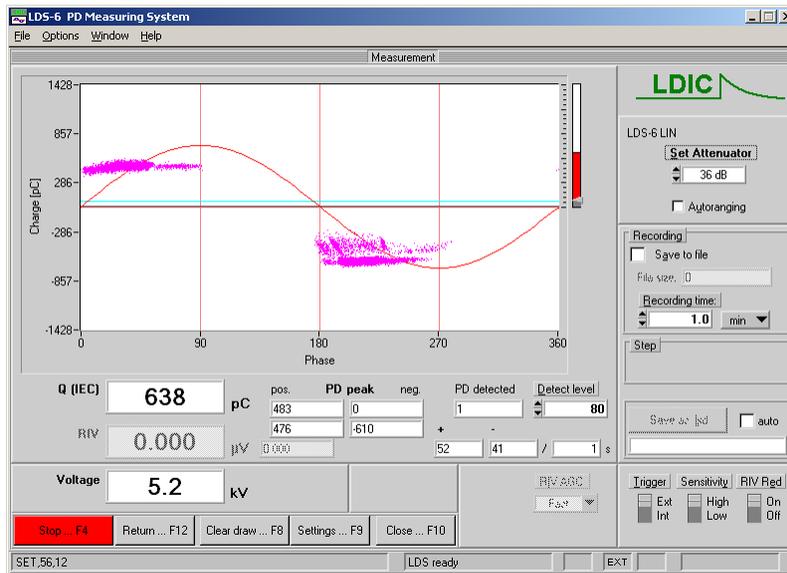


Figura B.11: Experimento 12 to 18, usando a célula UK4.