



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

**Allan David da Costa Silva**

## **Detecção e Localização de Descargas Parciais a Partir de Envelopes de Sinais Radiométricos**

Campina Grande – PB

Agosto – 2023

Allan David da Costa Silva

## **Detecção e Localização de Descargas Parciais a Partir de Envelopes de Sinais Radiométricos**

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração: Processamento da Informação**

Raimundo Carlos Silvério Freire, Dr.

Orientador

Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega, D.Sc.

Coorientador

Campina Grande – PB

Agosto – 2023

S586d

Silva, Allan David da Costa.

Detecção e localização de descargas parciais a partir de envelopes de sinais radiométricos / Allan David da Costa Silva. - Campina Grande, 2023.

67 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega."

Referências.

1. Ondas Eletromagnéticas. 2. Descargas Parciais. 3. Detecção de Envelope. 4. Localização de Fontes de Descargas Parciais. 5. Descargas Elétricas. 6. Equipamentos de Alta Tensão. 7. Processamento da Informação. 8. Sensores não Invasivos. 9. Localização Baseada em RSS. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Nobrega, Luiz Augusto Medeiros Martins. III. Título.

CDU 621.37(043)

**Detecção e Localização de Descargas Parciais a Partir de Envelopes de Sinais Radiométricos**

**ALLAN DAVID DA COSTA SILVA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 16/08/2023**

**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG**  
**Orientador(a)**

**LUIZ AUGUSTO MEDEIROS MARTINS NÓBREGA, D.Sc., UFCG**  
**Orientador(a)**

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

**FERNANDO RANGEL DE SOUSA, Dr., UFSC**  
**Examinador(a)**

**GEORGE VICTOR ROCHA XAVIER, Dr., UFS**  
**Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 16 DE AGOSTO DE 2023 (Nº754)

CANDIDATO: **ALLAN DAVID DA COSTA SILVA**. COMISSÃO EXAMINADORA: EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG., Presidente da Comissão e Examinador Interno, RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG, LUIZ AUGUSTO MEDEIROS MARTINS NÓBREGA, D.Sc., UFCG, Orientadores, FERNANDO RANGEL DE SOUSA, Dr., UFSC, GEORGE VICTOR ROCHA XAVIER, Dr., UFS., Examinadores Externos. TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Detecção e Localização de Descargas Parciais a Partir de Envelopes de Sinais Radiométricos. HORA DE INÍCIO: **15h00** – LOCAL: **Sala Virtual, conforme Art. 5º da PORTARIA SEI Nº 01/PRPG/UFCG/GPR, DE 09 DE MAIO DE 2022**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o candidato foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua dissertação, obtendo conceito APROVADO. Face a aprovação, declara o presidente da Comissão, achar-se o examinando, legalmente habilitado a receber o Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o mesmo faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Filipe Emmanuel Porfírio Correia, e os membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande, 16 de Agosto de 2023.

Filipe Emmanuel Porfírio Correia  
Secretário

EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG  
Presidente da Comissão e Examinador Interno

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG  
Orientador

LUIZ AUGUSTO MEDEIROS MARTINS NÓBREGA, D.Sc., UFCG  
Orientador

FERNANDO RANGEL DE SOUSA, Dr., UFSC  
Examinador Externo

GEORGE VICTOR ROCHA XAVIER, Dr., UFS  
Examinador Externo

ALLAN DAVID DA COSTA SILVA  
Candidato

## 2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato **ALLAN DAVID DA COSTA SILVA**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **FILIFE EMMANUEL PORFIRIO CORREIA, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 17/08/2023, às 14:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **EDSON GUEDES DA COSTA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 17/08/2023, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUIZ AUGUSTO MEDEIROS MARTINS NOBREGA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2023, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Allan David da Costa Silva, Usuário Externo**, em 21/08/2023, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RAIMUNDO CARLOS SILVERIO FREIRE, PROFESSOR 3 GRAU**, em 23/08/2023, às 07:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **George Victor Rocha Xavier, Usuário Externo**, em 23/08/2023, às 09:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3711129** e o código CRC **6C133887**.

---

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que tem estado comigo e tem alimentado a minha esperança nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Maria Selma! Mulher que mais admiro e não poupou esforços para contribuir com minha formação acadêmica, mesmo nos momentos de grande dificuldade e à minha irmã, Lara, por todo apoio.

Aos meus orientadores, professor Freire e professor Luiz Augusto, pela orientação e todo o conhecimento transmitido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Edson Guedes do LAT, pelo suporte fornecido ao longo desta pesquisa. Ao professor Edmar do Labmet, por gentilmente disponibilizar o espaço para a realização dos experimentos e ao professor George pela colaboração fornecida desde os meus projetos de iniciação científica.

Aos técnicos do LAT e do Labmet, Igor e Alisson, por todo o auxílio prestado durante a etapa experimental desta dissertação.

Aos meus amigos da pós-graduação, em especial, à Itaiara e Igor do LAT, Erica do LSP, Henrique e Izadora do LIMC e aos membros do grupo de inteligência artificial do LAT por todos os auxílios prestados no decorrer deste trabalho.

Por fim, agradeço ao CNPq e à Copele, pelo provimento da bolsa de estudos e do auxílio no âmbito desta dissertação.

*"O que sabemos é uma gota,  
o que ignoramos é um oceano"*

(Isaac Newton)



---

## Resumo

Descargas Parciais (DP) são descargas elétricas de baixa intensidade que podem degradar de forma gradual os sistemas de isolamento de equipamentos de alta tensão. A longo prazo isso pode danificar o equipamento, resultando na indisponibilidade do sistema elétrico. Portanto, o monitoramento dessas descargas pode se tornar uma ferramenta de manutenção preditiva útil. Na ocorrência desse fenômeno há a emissão de ondas eletromagnéticas na faixa de ultra alta frequência, possibilitando a utilização de sensores não invasivos, como antenas, no monitoramento dos equipamentos, mesmo em operação. A etapa de localização, em especial, é decisiva nesse processo, pois determinar a posição do equipamento com falhas dielétricas, ou mesmo a posição interna dessas falhas, pode reduzir o tempo de manutenção. No método radiométrico, tradicionalmente, as coordenadas dos equipamentos defeituosos são estimadas pelo método da diferença dos tempos de chegada. No entanto, a eficácia desse método requer um sistema de instrumentação com taxa de amostragem elevada, tornando o sistema de aquisição complexo. Uma das formas de simplificá-lo, é realizar a detecção da envoltória desses sinais. Neste trabalho, foram elaborados arranjos experimentais para avaliar essa abordagem, tanto do ponto de vista da detecção quanto da localização de fontes de descargas parciais, utilizando-se detectores de envelope comerciais. Acerca da detecção, realizaram-se medições em diferentes equipamentos, de forma a avaliar a eficácia do circuito detector de envelope para sinais radiométricos com diferentes valores de tensão, utilizando como referência o sinal de DP captado pela antena. Quanto à localização, realizaram-se medições radiométricas em diferentes arranjos experimentais. A partir daí duas abordagens foram investigadas para determinar a localização da fonte de DP: a primeira delas foi baseada no método da diferença dos instantes de chegada e a segunda baseada apenas na amplitude dos sinais. Concluiu-se a partir da análise dos sinais que a detecção do envelope é suficiente para avaliar a evolução da atividade de DP em um ciclo de medições. Quanto à localização, observou-se que os envelopes são suficientes para determinar a região onde o equipamento está localizado.

**Palavras-chave:** descargas parciais, detecção de envelope, localização.

---

# Abstract

Partial Discharges (PD) are low-intensity electrical discharges that can gradually degrade the insulation systems of high-voltage equipment. Over time, this can damage the equipment, resulting in the unavailability of the electrical system. Therefore, monitoring these discharges can become a useful tool for predictive maintenance. During the occurrence of this phenomenon, electromagnetic waves are emitted in the ultra high frequency range, enabling the use of non-invasive sensors such as antennas to monitor the equipment, even during operation. The localization step is particularly crucial in this process, as determining the position of the equipment with dielectric faults, or even the internal position of these faults, can reduce maintenance time. In the radiometric method, traditionally, the coordinates of faulty equipment are estimated using the time difference of arrival method. However, the effectiveness of this method requires a high sampling rate instrumentation system, making the acquisition system complex. One way to simplify it is to perform envelope detection of these signals. In this work, experimental setups were developed to evaluate this approach, both from the detection and localization perspectives of partial discharge sources, using commercial envelope detectors. Regarding detection, measurements were taken on different equipment to evaluate the effectiveness of the envelope detection circuit for radiometric signals with different voltage values, using the PD signal captured by the antenna as a reference. Concerning localization, radiometric measurements were performed on different experimental setups. From there, two approaches were investigated to determine the location of the PD source: the first one based on the time difference of arrival method, and the second based solely on the signal amplitude. It was concluded from the signal analysis that envelope detection is sufficient to assess the evolution of PD activity in a measurement cycle. Regarding localization, it was observed that envelopes are sufficient to determine the region where the equipment is located.

**Keywords:** partial discharges, envelope detection, localization.

---

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Sinal de DP típico com diferentes taxas de amostragem. . . . .	3
Figura 1.2 – Aplicação de uma rede de sensores em uma subestação de energia. . . . .	4
Figura 2.1 – Classes das DP. As setas azuis indicam o eletrodo de maior potencial. . . . .	7
Figura 2.2 – Esquemático de medição norma IEC 60270 . . . . .	8
Figura 2.3 – Sinal de DP típico contaminado por ruído branco. . . . .	10
Figura 2.4 – Regiões de irradiação de uma antena. . . . .	10
Figura 2.5 – Determinação da TDOA entre dois sinais pelo método da correlação cruzada. . . . .	13
Figura 2.6 – Determinação do ToA de um sinal de DP pelo método do primeiro pico. . . . .	13
Figura 2.7 – Determinação do ToA de um sinal de DP a partir da curva AIC. . . . .	14
Figura 2.8 – Determinação do ToA de um sinal de DP por meio da curva de energia cumulativa com inclinação negativa. . . . .	14
Figura 2.9 – Determinação da posição da fonte de DP por meio do método da razão de potências. . . . .	16
Figura 2.10 – Circuito detector de envoltória. . . . .	19
Figura 2.11 – Detecção de Envelope de um sinal em RF. . . . .	20
Figura 4.1 – Objetos de teste. (a) Barra de hidrogerador. (b) Cuba com eletrodos ponta- plano imersos em óleo mineral. (c) TP 36kV. . . . .	31
Figura 4.2 – Histograma de Frequência de Sinais de DP. . . . .	32
Figura 4.3 – Antena de bioinspirada. . . . .	32
Figura 4.4 – Detector comercial. . . . .	34
Figura 4.5 – Diagrama de blocos do ADL5511. . . . .	34
Figura 4.6 – Arranjo de medição para a detecção DP. . . . .	35
Figura 4.7 – Arranjo de medição: (a) TP 36 kV. (b) Barra de hidrogerador. . . . .	36
Figura 4.8 – Arranjo experimental em ambiente controlado 1: posição das antenas receptoras distribuídas ao redor da antena emissora. . . . .	37
Figura 4.9 – Arranjo experimental em ambiente controlado 2: posição das antenas e dos obstáculos metálicos distribuídos ao redor da antena emissora. . . . .	38

Figura 4.10–Arranjo experimental 1: visão das antenas distribuídas ao redor do objeto de teste. . . . .	39
Figura 4.11–Arranjo experimental 2: distância entre as antenas e o objeto teste. . . . .	39
Figura 4.12–Esquemático referente ao arranjo experimental 3: detecção, condicionamento e aquisição dos sinais de DP. . . . .	40
Figura 4.13–Sistema de aquisição: circuitos ADL5511 nas entradas do osciloscópio. . . . .	41
Figura 4.14–Arranjo experimental 3: (a) posição 1. (b) posição 2. (c) posição 3. . . . .	41
Figura 4.15–Fluxograma da etapa computacional. . . . .	42
Figura 5.1 – Magnitude dos coeficientes de reflexão ( $S_{11}$ ) medidos para as antenas bioinspiradas. . . . .	43
Figura 5.2 – Magnitude dos coeficientes de transmissão ( $S_{21}$ ) de dois FPA passivos distintos. . . . .	44
Figura 5.3 – Magnitude dos coeficientes de transmissão ( $S_{21}$ ) de quatro FPA CHPFL-0100. . . . .	45
Figura 5.4 – Circuito detector de envoltória. . . . .	45
Figura 5.5 – Resultado da simulação para o diodo SMS 7630 para um sinal de entrada proveniente da barra de um hidrogerador. . . . .	46
Figura 5.6 – $S_{11}$ do circuito ADL5511. . . . .	47
Figura 5.7 – Envelope resultante da barra do hidrogerador. . . . .	48
Figura 5.8 – Envelope resultante do TP de 36 kV. . . . .	48
Figura 5.9 – Espectro de frequência dos sinais resultantes da barra do hidrogerador. . . . .	49
Figura 5.10–Espectro de frequência dos sinais resultantes do TP de 36 kV. . . . .	49
Figura 5.11–Curva de evolução da energia referente a barra do hidrogerador. . . . .	50
Figura 5.12–Curva de evolução da energia referente ao TP de 36 kV. . . . .	50
Figura 5.13–Curva de decaimento da potência (dBm) pela distância (cm). . . . .	51
Figura 5.14–Envelope simulado do sinal de entrada. . . . .	52
Figura 5.15–Mapa de calor referente ao arranjo experimental 1. . . . .	53
Figura 5.16–Localização estimada: posição I. . . . .	53
Figura 5.17–Localização estimada: posição II. . . . .	54
Figura 5.18–Localização estimada: posição III. . . . .	54
Figura 5.19–Localização Estimada: posição IV. . . . .	54
Figura 5.20–Sinais de DP captados em diferentes distâncias. . . . .	55
Figura 5.21–Sinais adquiridos pelas três antenas para a posição 3. . . . .	56
Figura 5.22–Localização estimada - posição 1. . . . .	57
Figura 5.23–Localização estimada - posição 2. . . . .	58
Figura 5.24–Localização estimada - posição 3. . . . .	58

---

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Síntese Bibliográfica. . . . .	30
Tabela 5.2 – Disposição espacial dos arranjos. . . . .	41
Tabela 2.3 – Comparação dos diodos. . . . .	46
Tabela 3.4 – Resultados de localização para o arranjo 1. . . . .	52
Tabela 3.5 – Resultados de localização para o arranjo 2. . . . .	52
Tabela 3.6 – Resultados de localização. . . . .	55
Tabela 3.7 – Resultados de localização para as posições 1, 2 e 3. . . . .	56

---

## Lista de Siglas

FPA	Filtro Passa Altas
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
Matlab <sup>®</sup>	<i>Matrix Laboratory</i>
RSS	Força do Sinal Recebido ( <i>Received Signal Strength</i> )
TDOA	Diferença dos Tempos de Chegada ( <i>Time Difference of Arrival</i> )
PSO	Otimização por Enxame de Partículas ( <i>Particle Swarm Optimization</i> )
ToA	Tempo de Chegada ( <i>Time of Arrival</i> )
UHF	Ultra Alta Frequência ( <i>Ultra High Frequency</i> )

---

## Lista de Símbolos

<i>A</i>	Ampère
<i>dBm</i>	Decibel miliwatt
<i>W</i>	Watt
<i>Hz</i>	Hertz
<i>mV</i>	Milivolts
<i>μs</i>	Microsegundo
<i>pC</i>	Picocoulomb
<i>t</i>	Tempo
<i>V</i>	Volt

---

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos	4
1.2	Organização do Trabalho	5
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>6</b>
2.1	O Fenômenos das Descargas Parciais	6
2.2	Métodos de Medição de DP	7
2.2.1	Método IEC 60270	8
2.2.2	Método Radiométrico	9
2.3	Parâmetros Mais Relevantes de uma Antena	10
2.4	Localização Radiométrica de Fontes de DP	12
2.4.1	Algoritmos ToA	12
2.4.2	Método TDOA	15
2.4.3	Localização Baseada em Potência	16
2.5	Detecção de Envelope	18
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>23</b>
3.1	Retrospectiva Histórica	23
3.2	Trabalhos Mais Relevantes	25
3.2.1	Síntese Bibliográfica	29
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>31</b>
4.1	Seleção da Antena	31
4.2	Detector de Envelope	33
4.3	Avaliação do ADL5511 em Ensaios de DP	35
4.4	Ensaios de Localização com Fonte Controlada	36
4.5	Metodologia para a Localização de DP	38
4.5.1	Arranjo Experimental 1	38
4.5.2	Arranjo Experimental 2	39
4.5.3	Arranjo Experimental 3	40
4.5.4	Etapa Computacional	41
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>43</b>
5.1	Análise dos Componentes	43
5.2	Detecção	45



5.2.1	Aplicação do ADL5511 . . . . .	47
5.3	Localização . . . . .	50
5.3.1	Prova de Princípio . . . . .	51
5.3.2	Testes de Localização com Fonte Controlada . . . . .	51
5.3.3	Arranjo Experimental 1 . . . . .	52
5.3.4	Arranjo Experimental 2 . . . . .	55
5.3.5	Arranjo Experimental 3 . . . . .	56
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS PARA O FUTURO . . . . .</b>	<b>60</b>
6.1	Publicações . . . . .	61
6.2	Trabalhos para o Futuro . . . . .	61
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>63</b>

---

## Introdução

A dependência das atividades de cunho econômico-produtivo, em nível global, por energia elétrica exige um Sistema Elétrico de Potência (SEP) com um grau elevado de disponibilidade. Isso requer uma associação entre esquemas de proteção eficazes, melhoria nos índices de qualidade de energia e, em especial, a redução do número de interrupções no fornecimento de energia elétrica em razão de manutenções corretivas não planejadas, nas quais os equipamentos são retirados de operação por longos períodos.

O impacto econômico associado a essas manutenções, quando analisado de forma isolada, como um gasto operacional eventual, mascara os reais custos envolvidos nesse processo, tendo em vista que há uma depreciação do ativo ao longo do tempo (AMERICA, 2012). No entanto, a indisponibilidade desses equipamentos pode acarretar um ônus financeiro significativo, regido pela Resolução nº 846 de 11 de junho de 2019 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Portanto, há a necessidade de modelos estratégicos para realizar a gerência dos serviços de manutenção preditiva e preventiva em subestações de energia.

Um dos principais focos do setor de manutenção das subestações está na avaliação da integridade dos sistemas de isolamento desses equipamentos, uma vez que eles estão sujeitos a diversas condições de estresse durante sua operação, como, por exemplo, intensos campos elétricos, esforços mecânicos, sobretensões e curto-circuitos. Tal afirmação encontra respaldo em estudos realizados pelo Cigrè, nos quais foi constatado que falhas de origem dielétrica são responsáveis por ocorrências catastróficas em transformadores de instrumento (CIGRE, 2020) e representam 31% das falhas em transformadores de potência (CIGRE, 2013).

Essas falhas dielétricas, em geral, estão associadas ao surgimento de descargas elétricas de baixa intensidade que acometem as cavidades internas do dielétrico, mas que em um primeiro momento, não causam o colapso do sistema. Tais descargas, segundo Bartnikas (1991), são denominadas Descargas Parciais (DP). Embora, inicialmente, sejam

de pequena amplitude, a atividade de DP tende a ser um processo evolutivo que provoca decomposição química do material. Logo, se não for controlada, pode progredir para uma descarga disruptiva (NOBREGA, 2019). Portanto, o monitoramento dessas descargas pode ser utilizado pelas concessionárias de energia como uma ferramenta poderosa de manutenção preditiva, evitando longos desligamento no SEP.

Uma série de fenômenos físicos estão associados aos eventos de DP, incluindo descargas elétricas, a produção de gases, luz, calor localizado e a emissão de ondas acústicas eletromagnéticas de alta frequência (STEINER; WEEKS, 1989). Dessa forma, os métodos de medição se baseiam na avaliação de algum desses fenômenos. O método elétrico tradicional, por exemplo, é um procedimento já bem consolidado e descrito por algumas normas internacionais. No entanto, o teste padrão definido pela norma IEC60270 (2000) exige a conexão de um capacitor de acoplamento em paralelo com o equipamento monitorado, o que o torna altamente invasivo e, portanto, impraticável em ensaios de campo.

Essa limitação motivou a investigação de outras metodologias de monitoramento, dentre elas o método óptico (SCHWARZ; JUDENDORFER; MUHR, 2008), o método acústico (QIAN *et al.*, 2018; GONZALES *et al.*, 2013), a Análise de Gases Dissolvidos (AGD) (SUN; OHODNICKI; STEWART, 2017) e o método radiométrico (HAMPTON; MEATS, 1988), o qual tem se destacado por se tratar de uma alternativa não invasiva e robusta a uma série ruídos indesejados, especialmente as descargas do tipo corona (SILVA *et al.*, 2020).

Na ocorrência das DP, cargas elétricas se movimentam, produzindo uma radiação eletromagnética na faixa da Ultra Alta Frequência (UHF - do inglês: *Ultra High Frequency*), que se propaga a partir da posição de origem (SOUZA NETO, 2014). À vista disso, elas podem ser detectadas a partir de um conjunto de sensores não invasivos, como antenas, por exemplo, o que propicia que os equipamentos de potência sejam monitorados mesmo em operação. Quando esse processo é associado às técnicas de Processamento Digital de Sinais (PDS), as fontes de DP podem ser identificadas, classificadas e localizadas.

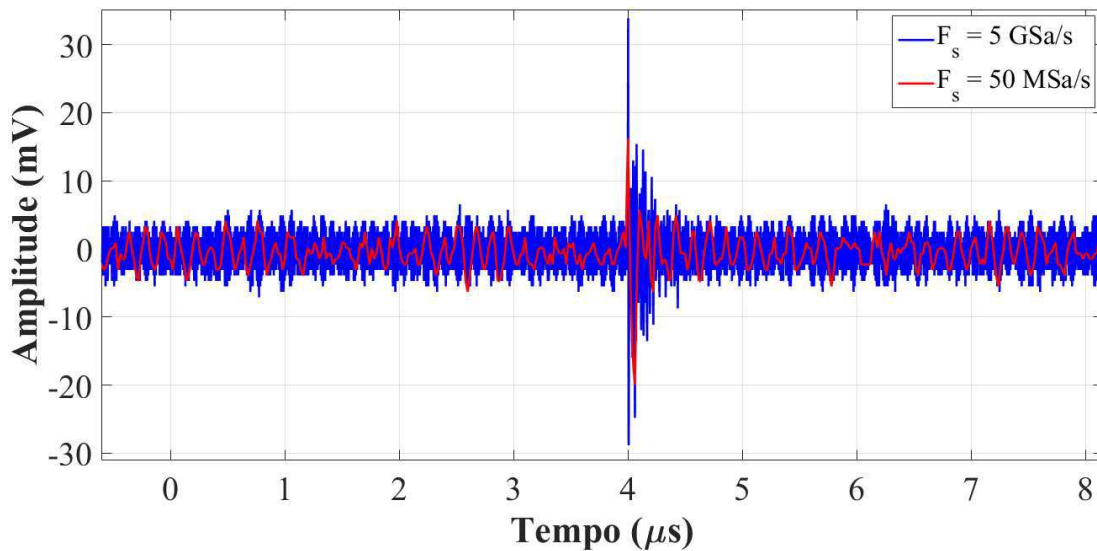
A etapa de localização, em especial, é decisiva dentro do monitoramento, uma vez que determinar a posição do equipamento defeituoso, ou mesmo a localização interna do defeito, acelera o processo de tomada de decisão e evita que os equipamentos sejam retirados de operação de forma não planejada, reduzindo assim os custos empregados pelos serviços de manutenção corretiva.

As metodologias de localização radiométrica de fontes de DP vem evoluindo desde a década de 80, sendo organizadas em três gerações (KHAN, 2018): na primeira delas, há uma abordagem manual, em que um técnico, periodicamente, vasculha uma determinada área para investigar a presença de DP (HAMPTON; MEATS, 1988); na segunda geração,

há o destaque para a aplicação da técnica da Diferença dos Tempos de Chegada (TDOA - do inglês: *Time Difference of Arrival*), a qual é caracterizada pelo elevado grau de exatidão, uma etapa de PDS, a necessidade de um perfeito sincronismo entre os sensores (XAVIER *et al.*, 2021) e a aplicação de equipamentos de aquisição de dados com taxa de amostragem elevada (SINAGA; PHUNG; BLACKBURN, 2012), de forma a não suprimir a informação de interesse.

Essa elevada taxa de amostragem requerida para detectar um sinal de DP implica na utilização de um conversor Analógico-Digital (A/D) rápido. Conforme o critério de Nyquist, um sinal só poderá ser adequadamente reconstruído caso seja amostrado com, no mínimo, duas vezes a frequência máxima do sinal, caso contrário haverá uma perda de informação considerável. Uma prova disso é a aquisição de um sinal de DP na faixa UHF com taxas de amostragem de 5 GSa/s e 50 MSa/s, conforme é mostrado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Sinal de DP típico com diferentes taxas de amostragem.



Fonte: autoria própria.

Evidencia-se, na Figura 1.1, que o sinal de DP com taxa de amostragem de 50 MSa/s perdeu parcialmente as suas características. Não é possível afirmar qual a energia ou a amplitude máxima desse pulso de DP, uma vez que o pico e o instante de chegada foram suprimidos. Outro ponto a ser observado é que esse sinal subamostrado apresenta uma maior similaridade com o ruído de fundo, o que torna o processo de identificação mais complexo e pouco eficiente, ainda que ele seja realizado por meio de um filtro digital, como, por exemplo, a filtragem baseada na transformada Wavelet (XAVIER *et al.*, 2021).

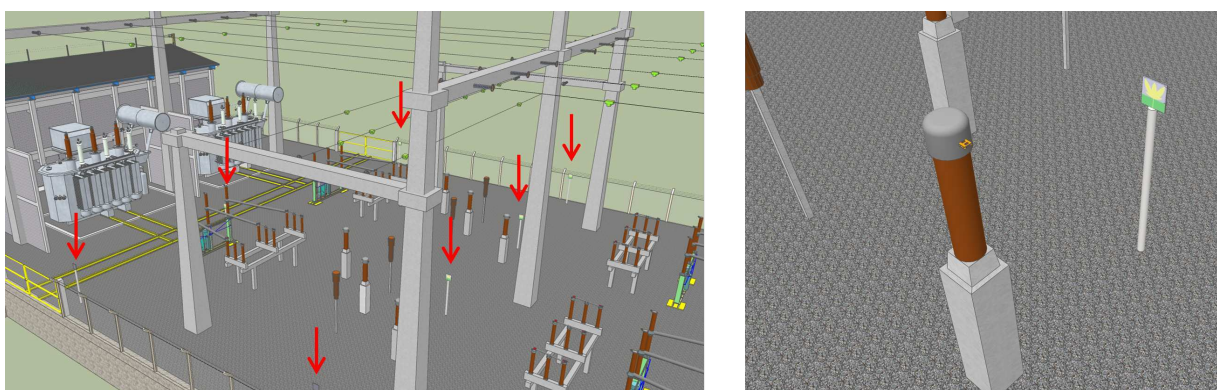
Isso posto, na atual ou terceira geração o objetivo é contornar essas limitações, baseando-se apenas na Intensidade do Sinal Recebido (RSS - do inglês: *Received Signal Strength*) (KHAN, 2018). Nesse processo, há a necessidade de poucas informações do sinal de DP, por isso, há a aplicação de detectores de envoltória (UPTON *et al.*, 2017),

equipamentos de aquisição de dados com taxa de amostragem mais baixa, a ausência do sincronismo entre os sensores (SOUZA NETO, 2014) e a diminuição substancial do PDS.

Portanto, esta dissertação se insere a esse contexto a partir de uma investigação sobre a detecção e a localização radiométrica de fontes de DP por meio da detecção analógica da envoltória de sinais radiométricos, como forma de simplificar o *hardware* empregado na etapa de medição e eliminar o problema da subamostragem.

Na Figura 1.2 é apresentada a aplicação deste trabalho, via a simulação de uma subestação abaixadora de tensão de 69 kV.

Figura 1.2 – Aplicação de uma rede de sensores em uma subestação de energia.



Fonte: autoria própria.

Nota-se, na Figura 1.2, que as antenas de Nobrega (2019) foram espalhadas por toda a subestação, formando uma matriz quadrada com vários nós, a qual permite o monitoramento contínuo dos equipamentos da subestação. Na presença de DP, as antenas mais próximas ao equipamento irão detectar sinais com intensidade acima do nível de ruído. Aplicando-se um algoritmo baseado em RSS e, em seguida, realizando-se uma associação com o mapeamento das instalações da subestação, é possível estimar a posição do equipamento com defeito.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é avaliar a detecção e a localização de fontes de DP por meio de envelopes de sinais radiométricos e, como objetivos específicos:

1. Especificar um circuito detector de envelope capaz de detectar a atividade de DP;
2. Avaliar a resposta em frequência do envelope de DP e do sinal original;
3. Comparar a resposta dos algoritmos de localização baseados em TDOA e RSS utilizando envelopes simulados e reais.

## **1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica com o conteúdo necessário à compreensão do trabalho desenvolvido, incluindo conceitos sobre DP, métodos de medição e localização, bem como informações sobre a detecção não-coerente.

Em seguida, no Capítulo 3, é apresentada uma revisão bibliográfica dos trabalhos mais relevantes ao tema deste trabalho, iniciando com uma retrospectiva histórica sobre o método UHF, com foco na localização de DP.

No Capítulo 4 são descritos os procedimentos computacionais e experimentais, bem como os equipamentos aplicados para atingir os objetivos específicos estabelecidos nesta dissertação.

Em seguida, no Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos e as análises realizadas neste trabalho. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e os trabalhos para o futuro.

---

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados os assuntos mais relevantes ao entendimento desta dissertação, são eles: uma introdução ao fenômeno das DP; apresentação dos métodos de medição e localização de DP e um resumo sobre a detecção de envelope de sinais em rádio frequência.

### 2.1 O FENÔMENOS DAS DESCARGAS PARCIAIS

Conforme Steiner e Weeks (1989), DP podem ser definidas como descargas elétricas de baixíssima intensidade (da ordem de pC), curta duração (da ordem nanosegundos) e emissão aleatória, que curto circuitam pequenos trechos dos sistemas de isolamento de alta tensão e, podem ser medidas por meio de artifícios elétricos, acústicos, radiométricos e outros. Ainda que sejam um fenômeno físico caracterizado pela baixa intensidade, a atividade contínua de DP pode deteriorar o isolamento de um equipamento de alta tensão, provocando assim, sua falha.

Em termos práticos, para haver a ocorrência de DP, duas condições devem ser satisfeitas: a primeira delas é a presença de um campo elétrico intenso no dielétrico, ou seja, a sua ocorrência depende do nível de tensão aplicado ao equipamento; a segunda condição atribuí ao fenômeno um caráter estocástico, uma vez que o processo de avalanche eletrônica depende do arranjo de elétrons disponíveis no instante da ocorrência (NOBREGA, 2019).

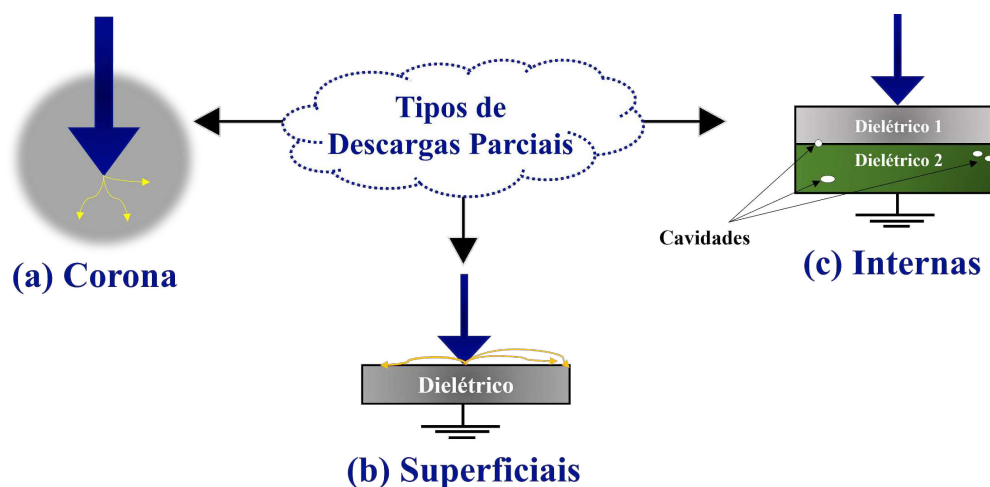
As DP estão divididas em três classes, a depender da sua localização no dielétrico (NATTRASS, 1988):

- **Descargas corona:** ocorrem em meios gasosos quando há uma intensificação do campo elétrico nas proximidades do eletrodo de alta tensão, conforme a Figura 2.1 (a) e são comuns nas conexões dos equipamentos de alta tensão.
- **Descargas superficiais:** ocorrem na superfície do dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície, como é mostrado na Figura 2.1 (b). Em geral, essas

DP ocorrem em barras de hidrogeradores, no trilhamento elétrico de isoladores poliméricos e nas terminações de cabos isolados.

- **Descargas internas:** ocorrem em pequenas cavidades gasosas nos materiais dielétricos sólidos ou líquidos. Uma das razões é a menor permissividade dielétrica no meio gasoso, quando comparada à de outros isolantes, podendo ocorrer na junção de dois materiais ou nas regiões adjacentes, conforme a Figura 2.1 (c).

Figura 2.1 – Classes das DP. As setas azuis indicam o eletrodo de maior potencial.



Fonte: adaptado de Macêdo *et al.* (2014).

Portanto, o fenômeno das DP acomete diferentes regiões do isolamento e, em cada uma delas, apresenta diferenças sutis no formato do pulso, fase, duração, frequência de ocorrência e intensidade. Assim, alguns parâmetros para a caracterização das DP foram introduzidos nos últimos anos, são eles (MACÊDO *et al.*, 2014): parâmetros básicos, deduzidos e estatísticos, a partir dos quais alguns estudos mostraram ser possível identificar os tipos de DP via aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina (SILVA *et al.*, 2021).

## 2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DP

Durante a ocorrência das DP há pulsos de corrente elétrica, a emissão de ruídos audíveis e a propagação de ondas eletromagnéticas, portanto, a medição desse fenômeno pode ser realizada por meio de uma série de métodos já bem consolidados no meio científico: o método elétrico via Transformador de Corrente de Alta Frequência (HFCT - do inglês: *High Frequency Current Transformer*) (NOBREGA, 2016), o método acústico (GONZALES *et al.*, 2013), o método radiométrico (JABER *et al.*, 2017; HAMPTON; MEATS, 1988; NOBREGA, 2019) e o método elétrico convencional (IEC60270, 2000). Dentre eles, destacam-se o método elétrico convencional, uma vez que se trata de um

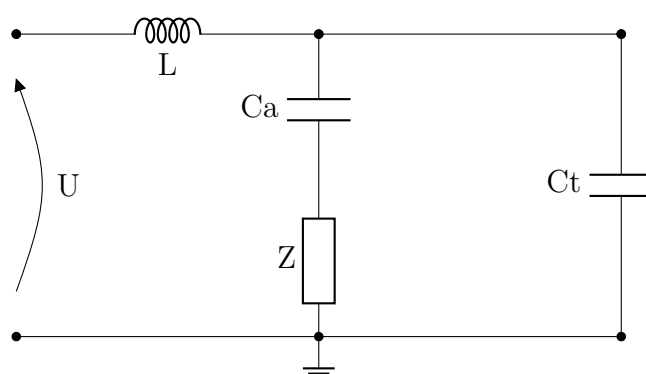


ensaio padronizado, comparável, calibrável e confiável e, o método radiométrico, que tem a grande vantagem de ser não invasivo e bastante robusto aos ruídos presentes no ambiente da subestação.

### 2.2.1 Método IEC 60270

O método elétrico proposto pela norma IEC60270 (2000) utiliza um capacitor de acoplamento, uma impedância externa para medição e um indutor como bobina de bloqueio para os ruídos provenientes da fonte de tensão. O esquemático do arranjo de medição descrito pela norma é mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Esquemático de medição norma IEC 60270



Fonte: adaptado de Xavier *et al.* (2018).

Na Figura 2.2 a variável  $U$  representa a tensão alternada de entrada;  $C_t$  representa a capacitância do objeto sob teste;  $L$  é o indutor para a filtragem de ruídos de alta frequência;  $C_a$  é o capacitor de acoplamento e,  $Z$  é a impedância externa para medição.

Em resumo, o pulso de corrente gerado no equipamento provém da carga injetada resultante da soma das capacitâncias internas ao material isolante e da capacitância de acoplamento (IEC60270, 2000), conforme a Equação (1):

$$Q = (C_t + C_a) \cdot \Delta U. \quad (1)$$

As cargas medidas pelo instrumento de medição correspondem à contribuição de carga fornecida pelo capacitor de acoplamento. Assim, a carga das DP equivale à Equação (2):

$$Q_m = C_a \cdot \Delta U, \quad (2)$$

dessa forma, a relação entre a carga medida  $Q_m$  e a carga real  $Q$  gerada pelas DP é dada pela Equação (3):

$$\frac{Q_m}{Q} = \frac{C_a}{C_t + C_a}. \quad (3)$$

Assim, conforme IEC60270 (2000), para obter valores de carga próximos do valor real, deve-se utilizar uma capacitância de acoplamento com valores superiores à capacitância do equipamento sob teste.

Destaca-se que o arranjo proposto pela norma não corresponde a uma medição direta, assim, é necessário traçar uma curva de calibração que relacione os valores de tensão medidos com a carga efetiva injetada pelo capacitor de acoplamento. Tal processo deverá ser realizado a cada ciclo de medições ou caso o equipamento sob teste seja alterado, tendo em vista as diferentes capacitâncias.

O método descrito pela norma IEC60270 (2000) é aplicado em testes de aceitação em equipamentos de alta tensão, portanto, ele é majoritariamente explorado em laboratório, uma vez que se trata de um ensaio altamente invasivo, impondo assim, restrições para a sua aplicação em campo.

### 2.2.2 Método Radiométrico

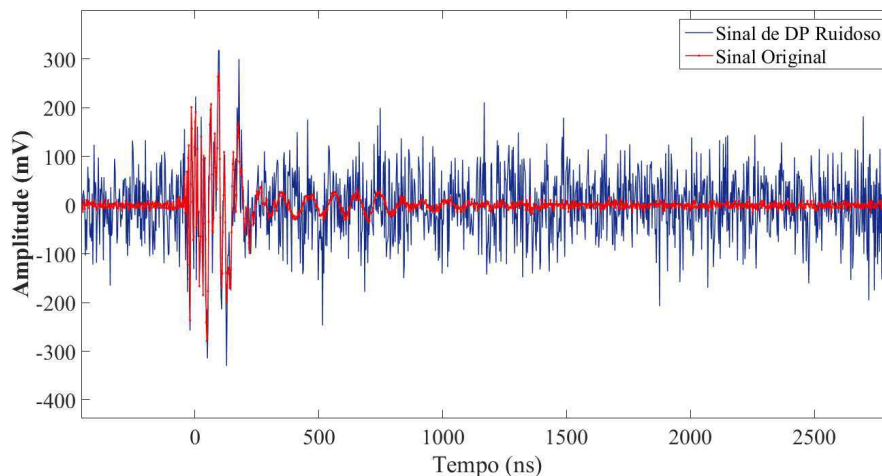
O método radiométrico consiste na detecção da irradiação produzida pelos pulsos de DP na faixa UHF, ou seja, de 300 a 3000 MHz. As bandas de frequência associadas a esse fenômeno variam conforme a classe do defeito, no entanto, as pesquisas tem mostrado que as componentes mais significativas se encontram entre 300 e 1500 MHz (RUTGERS; FU, 1997). Há de se destacar, que o método permite o diagnóstico completo dos sistemas de isolamento, sendo possível: detectar, classificar e localizar fontes de DP.

A aplicação desse método não requer qualquer conexão elétrica com o equipamento sob teste, portanto, se trata de uma alternativa não invasiva, que pode ser facilmente aplicada a qualquer ambiente.

Em campo, o método radiométrico possui a notável vantagem de ser imune a uma série de interferências, em especial, as descargas do tipo corona, que possuem componentes de frequência na faixa de 8 e 300 MHz (TENBOHLEN *et al.*, 2008; SANTOS; LINARES; ESPINO-CORTES, 2021). No entanto, as medições ainda são suscetíveis a uma série de interferências, dentre elas, os ruídos do próprio equipamento de aquisição de dados, dada a sua largura de banda elevada (SILVA *et al.*, 2020). Esses ruídos, em geral, podem ser modelados como ruído branco, o qual apresenta densidade espectral de potência constante para todas as frequências.

Na Figura 2.3, apresenta-se um sinal de DP típico, com e sem ruído de fundo, adquirido por meio de um osciloscópio com taxa de amostragem de 5 GSa/s.

Figura 2.3 – Sinal de DP típico contaminado por ruído branco.



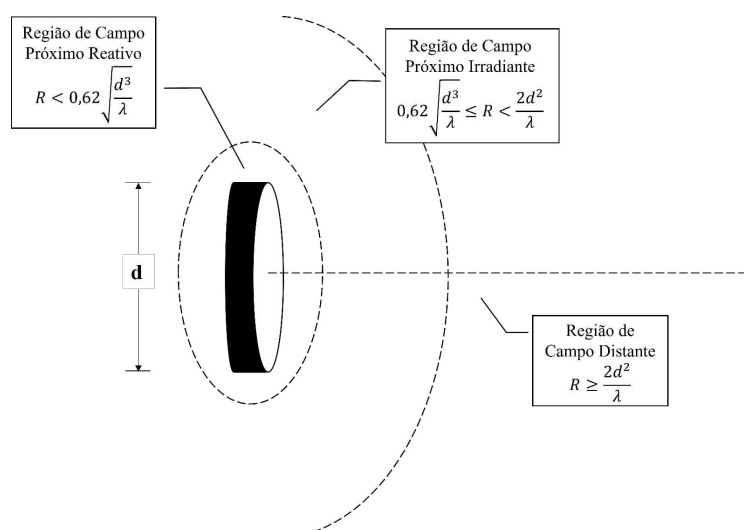
Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2020).

### 2.3 PARÂMETROS MAIS RELEVANTES DE UMA ANTENA

Conforme Paul (2006), uma antena é uma estrutura que representa a transição entre uma onda viajante no espaço livre e uma linha de transmissão. Assim, entender alguns parâmetros é necessário para verificar o desempenho de uma antena.

O primeiro deles trata das regiões de irradiação de uma antena. Os campos eletromagnéticos captados por uma antena são dependentes da sua distância à fonte, assim, o espaço ao seu redor é dividido em três regiões, conforme é mostrado na Figura 2.4 (BALANIS, 2005):

Figura 2.4 – Regiões de irradiação de uma antena.



Fonte: adaptado de BALANIS (2005).

- **Região de Campo Próximo Reativo:** região mais próxima à antena, em que, o campo é predominantemente reativo e a densidade de potência é praticamente

constante. Essa região é limitada pela superfície da antena e por um raio  $R$  dependente do comprimento de onda  $\lambda$  e da maior dimensão da antena  $d$ , conforme a equação (4):

$$R < 0,62\sqrt{\frac{d^3}{\lambda}}. \quad (4)$$

- **Região de Campo Próximo Irradiante:** região caracterizada pela presença de campos predominantemente irradiantes, em que a densidade de potência aumenta com a distância. Essa região é definida pela Equação (5):

$$0,62\sqrt{\frac{d^3}{\lambda}} \leq R < \frac{2d^2}{\lambda}. \quad (5)$$

- **Região de Campo Distante:** região delimitada pela equação (6), onde a densidade de potência será inversamente proporcional ao quadrado da distância da antena, ou seja, obedecerá as Leis de Maxwell.

$$R \geq \frac{2d^2}{\lambda}. \quad (6)$$

Bansal (1999) e Huang e Boyle (2008) destacam, no entanto, que antenas desenvolvidas para aplicações em RF com dimensões miniaturizadas podem invalidar a Equação (6), tornando-a insuficiente para determinar a região de campo distante. Por conseguinte, só há garantia de que a antena estará operando nessa região quando as seguintes condições forem respeitadas (BANSAL, 1999):

1.  $R \geq \frac{2d^2}{\lambda}$ ,
2.  $R \gg d$ ,
3.  $R \gg \lambda$ .

Considerando que a antena está operando na região de campo distante, é possível definir os seguintes parâmetros (BALANIS, 2005):

- **Diretividade (D):** trata-se de uma relação entre a intensidade da irradiação em uma determinada direção da antena e a intensidade média nas demais direções. Para a localização de fontes de DP em subestações abertas, antenas com diagrama de irradiação omnidirecional são desejáveis, visto que elas são sensíveis a sinais oriundos de várias direções, permitindo a localização de equipamentos defeituosos.
- **Ganho (G):** é razão entre a intensidade máxima de irradiação obtida pela antena e a intensidade de irradiação que seria obtida se a potência de entrada fosse irradiada isotropicamente. É evidente, portanto, que ganho e diretividade se relacionam por um fator de eficiência, então, em caso de não haver perdas, os termos são equivalentes.

- **Coefficiente de Reflexão ( $S_{11}$ ):** trata-se de um parâmetro utilizado para mensurar o casamento de impedância. Ele representa a razão entre a potência refletida da antena e a potência entregue à linha de transmissão. Matematicamente, ele é dado pela Equação (7):

$$S_{11} = 20 \cdot \log \left( \frac{VSWR + 1}{VSWR - 1} \right), \quad (7)$$

em que,  $VSWR$  (*Voltage Standing Wave Ratio*) é a razão entre a amplitude máxima e mínima da tensão de um sinal.

- **Largura de banda:** trata-se da faixa de frequências em que as características de determinada antena, como, por exemplo: impedância de entrada, padrão, largura de feixe, polarização, ganho, diretividade e eficiência da radiação estão dentro de um valor aceitável daqueles que estão na frequência central. No contexto de antenas, ela será definida pela faixa de frequência com  $S_{11}$  menor que -10 dB.

## 2.4 LOCALIZAÇÃO RADIOMÉTRICA DE FONTES DE DP

O Instante de Chegada (ToA - do inglês: *Time of Arrival*) e a intensidade de um pulso de DP podem ser utilizados como informação para determinar a localização da fonte de DP em uma subestação. Quando os sensores operam em perfeito sincronismo, pode-se utilizar o método tradicional da Diferença do Tempo de Chegada (TDOA - do inglês: *Time Difference of Arrival*) das ondas eletromagnéticas (XAVIER *et al.*, 2021). Por outro lado, quando se utiliza apenas a intensidade dos sinais de DP, há o destaque para o método RSS (*Received Signal Strength*) (LI *et al.*, 2017; UPTON *et al.*, 2017; DUARTE, 2015).

### 2.4.1 Algoritmos ToA

O ToA de um sinal de DP pode ser determinado pela aplicação de algoritmos específicos, dentre os quais, quatro deles são largamente difundidos na literatura técnica:

- **Correlação Cruzada ( $R_{ij}$ ):** método clássico para determinar o atraso entre dois sinais  $s_i$  e  $s_j$ , formados por um total de  $N$  amostras, a partir Equação (8):

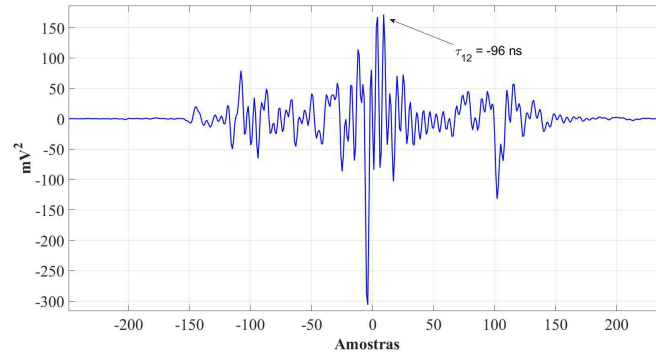
$$R_{ij}(n) = \sum_{-N/2}^{N/2-1} s_i(m+1)s_2(m). \quad (8)$$

Matematicamente, o atraso entre os dois sinais será determinado pela Equação (9) (JING-GANG *et al.*, 2008):

$$\tau_{ij} = [S_{mx} - (N - 1)] \cdot dt, \quad (9)$$

em que  $\tau_{ij}$  é a TDOA entre os sinais  $s_i$  e  $s_j$ ,  $S_{mx}$  é a amostra em que há maior coeficiente de correlação e  $dt$  é o tempo entre uma amostra e outra. Um exemplo da aplicação desse método é mostrado na Figura 2.5.

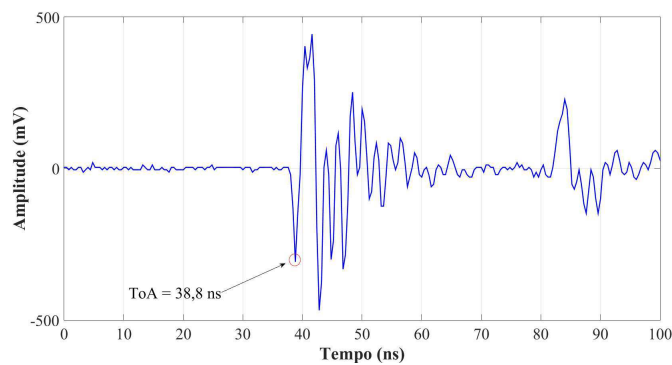
Figura 2.5 – Determinação da TDOA entre dois sinais pelo método da correlação cruzada.



Fonte: autoria própria.

- **Primeiro pico:** assumindo-se que os sinais de DP se propagam omnidirecionalmente, sem reflexões ou refrações, os pulsos de DP atingem diferentes antenas em instantes de tempo proporcionais à distância entre a fonte de DP e a antena. Portanto, o primeiro pico é definido como o primeiro instante em que o sinal excede um limiar predefinido (SINAGA; PHUNG; BLACKBURN, 2012), conforme é mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Determinação do ToA de um sinal de DP pelo método do primeiro pico.



Fonte: autoria própria.

- **Critério da Informação Akaike (AIC, do inglês: Akaike Information Criterion):** ao considerar os sinais como processos autorregressivos, em que cada amostra é uma combinação linear de valores passados, o AIC mede o quão bem um modelo estatístico se ajusta a um conjunto de observações e é dado pela Equação (10):

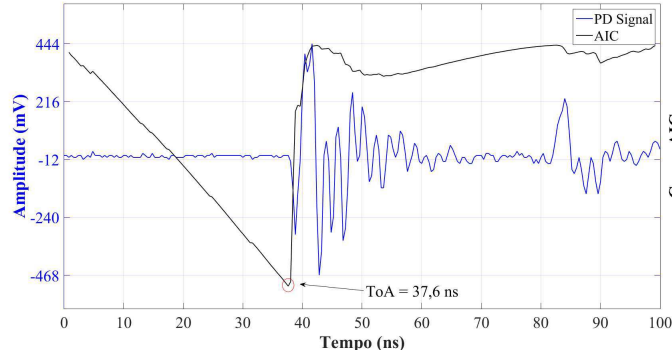
$$AIC(n) = n \cdot \ln[\sigma^2(1, n)] + (N - 1 - n) \cdot \ln[\sigma^2(n + 1, N)], \quad (10)$$

em que

$$\sigma^2(1, n) = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^n [s(m) - \bar{s}(1, n)]. \quad (11)$$

Na Figura 2.7, é possível observar o sinal de DP, em azul e, em preto, a curva AIC, em que o mínimo global corresponde ao ToA.

Figura 2.7 – Determinação do ToA de um sinal de DP a partir da curva AIC.



Fonte: autoria própria.

- **Energia Cumulativa:** a Energia Cumulativa ( $E_c$ ) de um sinal  $s_1$  até a amostra  $n$  pode ser calculada pela Equação (12) (ROBLES; FRESNO; MARTÍNEZ-TARIFA, 2015):

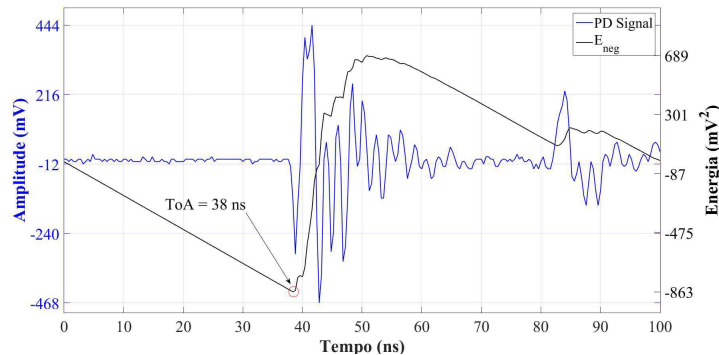
$$E_c(n) = \sum_{m=0}^n s^2(m), \quad (12)$$

o ToA da DP é o ponto de inflexão mais acentuado, denominado ponto de joelho. Ao incluir na Equação (12) uma linha com inclinação negativa, pode-se simplificar significativamente o cálculo do ToA:

$$E_{neg}(n) = \sum_{m=0}^n (s^2(m) - n \frac{E_N}{N}), \quad (13)$$

em que  $E_N$  é a energia total do sinal.

Figura 2.8 – Determinação do ToA de um sinal de DP por meio da curva de energia cumulativa com inclinação negativa.



Fonte: autoria própria.

### 2.4.2 Método TDOA

A localização radiométrica de fontes de DP em subestações e equipamentos de alta tensão vem sendo realizada pelo método TDOA (PORTUGUES *et al.*, 2009; NOBREGA, 2019; XAVIER *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2020). Nesse método, pressupõem-se algumas simplificações: em primeiro lugar, considera-se que a onda eletromagnética se propaga a uma velocidade constante  $v_e$ , em segundo lugar, que o caminho não possui obstáculos.

Claramente isso não ocorre, devido às reflexões e difrações presentes no ambiente, assim, o sinal captado por um sensor é o resultado de uma composição de múltiplas frentes de onda. No entanto, conforme o princípio de Fermat, o tempo de propagação é efetivamente definido pela primeira frente de onda, a qual irá percorrer o caminho mais curto (NOBREGA *et al.*, 2019).

O tempo de propagação do sinal é calculado a partir da Equação (14) (NOBREGA, 2019):

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = (v_e \cdot t_i)^2, \quad (14)$$

em que  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as coordenadas da fonte de DP;  $v_e$  é a velocidade de propagação do sinal no meio;  $t_i$  é o tempo de chegada do sinal ao sensor  $i$ , o qual possui as coordenadas  $(x_i, y_i, z_i)$ . Adaptando a Equação (14) para quatro antenas, há o seguinte sistema de equações não-lineares:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = (v_e \cdot t_1)^2, \quad (15)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (v_e \cdot (\tau_{12} + t_1))^2, \quad (16)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = (v_e \cdot (\tau_{13} + t_1))^2, \quad (17)$$

$$(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = (v_e \cdot (\tau_{14} + t_1))^2. \quad (18)$$

Em que  $\tau_{ij}$  representa a TDOA entre dois sinais, podendo ser determinada pela aplicação dos algoritmos ToA apresentadas na subseção 2.4.1.

O sistema de Equações (15) a (18) possui quatro variáveis independentes, portanto, utilizando-se quatro antenas com posições conhecidas e, sabendo a diferença dos tempos de chegada dos sinais captados por essas antenas, é possível obter a localização espacial da fonte de DP a partir da aplicação de uma solução numérica. Dentre elas, as mais conhecidas são: o método de Newton-Raphson (XAVIER *et al.*, 2021) e o algoritmo do Enxame de Partículas (SILVA *et al.*, 2020).



### 2.4.3 Localização Baseada em Potência

A localização de fontes de DP baseada apenas na amplitude dos sinais se trata de uma abordagem mais simples, barata e escalável, em que não há a necessidade de sincronismo entre os sensores (UPTON *et al.*, 2017). Aqui, portanto, os algoritmos de localização têm como princípio fundamental as perdas de propagação de uma onda de rádio, as quais podem ser definidas como sendo a diferença entre a potência transmitida e a potência recebida no destino.

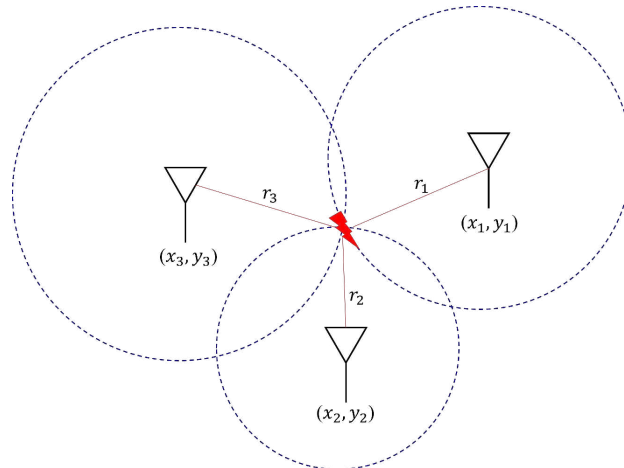
O modelo de propagação mais difundido na literatura técnica é o modelo de Friis, apresentado na Equação (19), que relaciona a potência transmitida ( $P_t$ ) e a potência recebida ( $P_r$ ) por duas antenas que operam na região de campo distante (BALANIS, 2005; DUARTE, 2015; HUANG; BOYLE, 2008).

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (19)$$

em que  $\lambda$  é a frequência central da antena,  $G_t$  é o ganho da antena transmissora,  $G_r$  é o ganho da antena receptora e  $R$  é a distância percorrida pelo sinal.

Para realizar o cálculo da localização de uma fonte de DP, o modelo mais simples pressupõe que cada antena está situada no centro de uma circunferência e que o raio é a distância entre o receptor e a fonte transmissora, conforme é mostrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Determinação da posição da fonte de DP por meio do método da razão de potências.



Fonte: autoria própria.

Para quatro antenas, as circunferências são descritas pelas equações (20) a (23) (DUARTE, 2015):

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = R_1^2, \quad (20)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = R_2^2, \quad (21)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = R_3^2, \quad (22)$$

$$(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 = R_4^2, \quad (23)$$

desenvolvendo as equações (21) a (23) e subtraindo a equação (20), tem-se:

$$2xx_1 - 2xx_2 + x_2^2 - 2yy_2 + 2yy_1 + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2 = R_2^2 - R_1^2, \quad (24)$$

$$2xx_1 - 2xx_3 + x_3^2 - 2yy_3 + 2yy_1 + y_3^2 - y_1^2 - x_1^2 = R_3^2 - R_1^2, \quad (25)$$

$$2xx_1 - 2xx_4 + x_4^2 - 2yy_4 + 2yy_1 + y_4^2 - y_1^2 - x_1^2 = R_4^2 - R_1^2, \quad (26)$$

a partir do modelo de Friss, os raios podem se relacionar pelas equações a seguir:

$$R_2 = R_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R2}}}, \quad (27)$$

$$R_3 = R_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R3}}}, \quad (28)$$

$$R_4 = R_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R4}}}, \quad (29)$$

em que  $n$  é o índice de perdas de caminho e  $P_{Ri}$  é a potência recebida pela antena  $i$ . Substituindo-se os raios nas Equações (24) a (26), tem-se:

$$R_1^2(R_2^2 - 1) + x(2x_2 - 2x_1) + y(2y_2 - 2y_1) = \alpha_2, \quad (30)$$

$$R_1^2(R_3^2 - 1) + x(2x_3 - 2x_1) + y(2y_3 - 2y_1) = \alpha_3, \quad (31)$$

$$R_1^2(R_4^2 - 1) + x(2x_4 - 2x_1) + y(2y_4 - 2y_1) = \alpha_4. \quad (32)$$

Note que as coordenadas de cada antena são conhecidas, logo, há três equações e três variáveis desconhecidas:  $x$ ,  $y$  e  $R_1$ . Portanto, é possível solucionar esse sistema de equações analiticamente.

Caso existam apenas 3 sensores disponíveis, é possível adaptar as equações e solucionar o sistema a partir de um método numérico. No entanto, esse algoritmo não

apresenta uma alta exatidão quando aplicado a ambientes reais (KHAN, 2018), já tendo sido considerado inadequado quando se utilizam poucos sensores (NETO *et al.*, 2010).

Frente a essa limitação, há o algoritmo do centróide ponderado, no qual a precisão da localização da fonte é fortalecida pela aplicação de um fator de ponderação. Para determiná-lo, o algoritmo calcula o inverso da soma das distâncias entre um nó e os outros nós envolvidos na localização (SHI, 2012), ou seja, quanto menor a distância entre a fonte e um sensor, maior é o peso atribuído a esse sensor.

Ele está baseado na aplicação do modelo de propagação apresentado na Equação (33) (UPTON *et al.*, 2017):

$$P_R = P_0 - 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d_i), \quad (33)$$

em que  $P_R$ ,  $P_0$ ,  $d_i$  e  $n$  são, respectivamente, a potência recebida, a potência transmitida, a distância da fonte e o índice de perda de caminho.

Ao assumir que há quatro nós  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  e  $(x_4, y_4)$  envolvidos na localização, as distâncias da fonte serão  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  e  $d_4$ , respectivamente. A partir daí, a aplicação desse algoritmo segue os seguintes passos (SHI, 2012):

1. Converter todos os valores para potência;
2. Assumir um valor de  $n$  para todos os sensores (DHARMADHIKARI; PUSALKAR; GHARE, 2018);
3. Aplicar a equação (33);
4. Adicionar o fator de ponderação;
5. Estimar as coordenadas  $(x, y)$  da fonte pelas Equações (34) e (35):

$$x = \frac{\frac{x_1}{d_1+d_2+d_3} + \frac{x_2}{d_1+d_3+d_4} + \frac{x_3}{d_1+d_2+d_4} + \frac{x_4}{d_2+d_3+d_4}}{\frac{1}{d_1+d_2+d_3} + \frac{1}{d_1+d_3+d_4} + \frac{1}{d_1+d_2+d_4} + \frac{1}{d_2+d_3+d_4}}, \quad (34)$$

$$y = \frac{\frac{y_1}{d_1+d_2+d_3} + \frac{y_2}{d_1+d_3+d_4} + \frac{y_3}{d_1+d_2+d_4} + \frac{y_4}{d_2+d_3+d_4}}{\frac{1}{d_1+d_2+d_3} + \frac{1}{d_1+d_3+d_4} + \frac{1}{d_1+d_2+d_4} + \frac{1}{d_2+d_3+d_4}}. \quad (35)$$

## 2.5 DETECÇÃO DE ENVELOPE

Em um sistema de transmissão digital, o sinal sofre mudanças de fase e frequência quando percorre o canal de comunicação, seja pelo desvanecimento ou pelo atraso de propagação. Assim, para detectar esse sinal, o receptor deverá estar associado a um circuito de recuperação de portadora, de forma a acompanhar os desvios causados pelo canal. Em outras palavras, deve-se garantir o sincronismo entre o transmissor e o receptor, o que, em geral, causa aumento do custo, da complexidade e do consumo de energia do sistema (GUIMARÃES; SOUZA, 2015). Por outro lado, quando não existe uma portadora de

sincronização para garantir a perfeita coerência de fase, essa detecção é chamada incoerente ou não coerente.

Na detecção não coerente, uma redução no desempenho do sistema é inevitável, entretanto, tal abordagem pode ser aplicada a sistemas que não necessitam de sincronismo com a portadora, possibilitando a redução da sua complexidade (DIONISIO, 2000). Além disso, em razão do ruído e da distorção presentes no canal, o sinal recebido é, em geral, complexo, assim, a operação de detecção do envelope leva em conta apenas o valor absoluto.

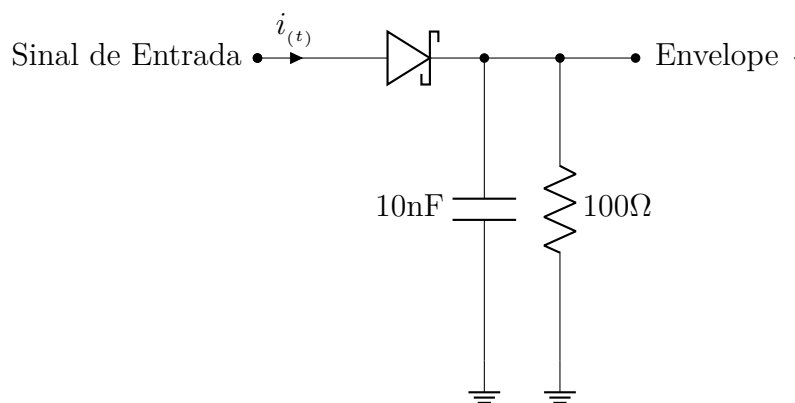
Em termos práticos, a detecção do sinal pode ser realizada via a aplicação de alguns circuitos analógicos simples. O primeiro deles se trata de um detector de nível médio, no qual se utiliza um multiplicador de tensão para elevar o sinal ao quadrado, em série com um filtro passa-baixas. Destaca-se, no entanto, que para aplicações em RF, a multiplicação do sinal deverá ser performada por um transistor de RF, dadas as limitações dos amplificadores operacionais para essa faixa de frequência.

Outra alternativa para realizar essa detecção é a aplicação de um circuito detector de envelope analógico, o qual se trata, essencialmente, de um retificador de meia onda com constante de tempo  $RC$ , ou seja, um circuito formado por um diodo, um capacitor e um resistor (SOUZA NETO, 2014).

Vale destacar que para aplicações em RF, deve-se dar uma atenção especial ao dimensionamento desses componentes, em especial, ao diodo, devido à perda da eficiência em faixas de frequência elevadas. Para aplicações em UHF e sinais de pequena intensidade, por exemplo, o componente mais adequado é o Diodo Schottky, dada a pequena queda tensão no componente (GONÇALVES, 2016).

Na Figura 2.10, apresenta-se um exemplo, adaptado de Mista *et al.* (2016), da aplicação de um circuito detector de envoltória, no qual foi utilizado um diodo Schottky, um resistor de  $100\ \Omega$  e um capacitor ideal com capacitância igual a  $10\ \text{nF}$ .

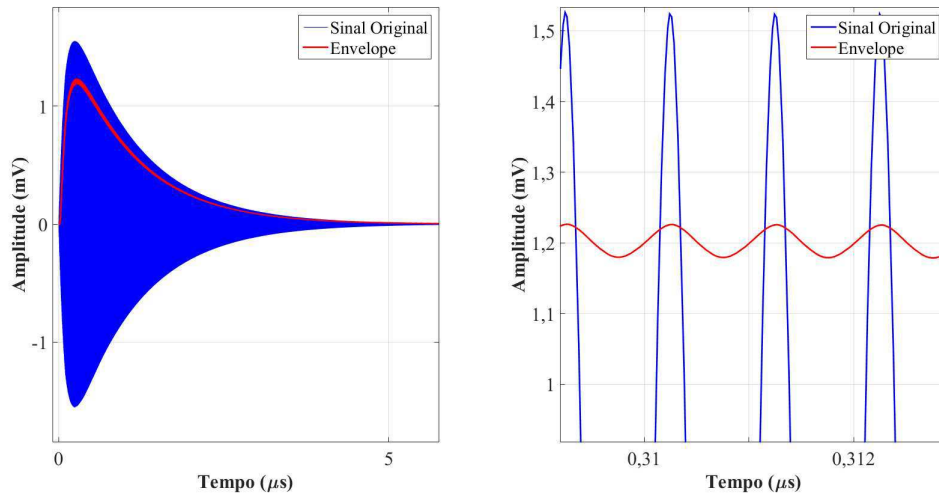
Figura 2.10 – Circuito detector de envoltória.



Fonte: adaptado de Mista *et al.* (2016).

Nesse exemplo foi utilizado como entrada um sinal modulado com frequência de 1 GHz, conforme é apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Detecção de Envelope de um sinal em RF.



Fonte: autoria própria.

Nota-se que o envelope mostrado na Figura 2.11, em vermelho, possui uma frequência inferior à do sinal de entrada, em azul. Evidencia-se, portanto, que nesse processo de detecção há uma atenuação na amplitude do sinal, tendo em vista que a queda de tensão no diodo é inevitável. Entretanto, o envelope ainda preserva características relevantes, como, por exemplo, a duração do sinal e uma parcela significativa da energia.

Destaca-se ainda que a detecção analógica do envelope permite suprimir os ruídos presentes em altas frequências (CHEN *et al.*, 2003), bem como, diminuir a taxa de amostragem requerida pelos sistemas de aquisição de dados, uma vez o envelope do sinal requer um número menor de amostras para transmitir a informação de interesse. Assim, tornando-se uma ferramenta conveniente para reduzir os custos associados aos *hardwares* empregados nos sistemas de instrumentação que operam em faixas de frequência elevadas.

Além disso, realizar a detecção do envelope de sinais de RF não apenas diminui os requisitos de *hardware* requeridos por um sistema de instrumentação, como também, diminui o esforço computacional na etapa do processamento digital e facilita a transmissão da informação.

Assim, gerar a envoltória dos sinais via *software* é uma etapa útil para avaliar a resposta de circuitos analógicos que serão utilizados com esse propósito (CHEN *et al.*, 2003) ou a eficácia de algoritmos de *machine learning* que utilizam atributos extraídos de envelopes (SILVA *et al.*, 2021). Para tanto, a literatura apresenta quatro maneiras de gerar o envelope de um sinal de RF:

1. **Interpolação Direta:** A interpolação direta é o método mais simples para obter o

envelope de um sinal em RF. Nesse método, o algoritmo identifica os pontos extremos positivos do sinal e os conecta, gerando um envelope (ZAENI; KHAYAM, 2015).

2. **Transformada de Hilbert:** Na aplicação da Transformada de Hilbert (TH), um sinal analítico é gerado a partir do sinal de entrada. Tal sinal é complexo, em que a parte real é o sinal original e a parte imaginária é a TH (ZAENI; KHAYAM, 2015). Por exemplo: para um sinal real  $x(t) = \cos(\omega t)$ , a TH desse sinal é  $\text{sen}(\omega t)$ , assim, o sinal analítico discreto  $y(k)$  correspondente é:

$$y(k) = x(k) + x_{TH}(k), \quad (36)$$

e o envelope  $e(k)$  é definido pelo módulo de  $y(k)$  (FEILAT, 2006):

$$e(k) = \sqrt{\left[ \sum_{i=0}^n A'_i \cos(\omega i k \Delta t + \phi_i) \right]^2 + \left[ \sum_{i=0}^n A'_i \text{sen}(\omega i k \Delta t + \phi_i) \right]^2} \quad (37)$$

3. **Smoothing Kernel:** este método tem como objetivo representar sinais transitórios como envelopes por meio da suavização de Kernel (PINPART, 2010). A aplicação dessa técnica reduz significativamente a largura de banda de um sinal, entretanto preserva detalhes transitórios. Para gerar o envelope do sinal, utiliza-se a seguinte metodologia:

- a) Remove-se o nível DC do sinal a partir do cálculo do valor médio ( $V_{med}$ ):

$$V_{med} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} V_i, \quad (38)$$

- b) Subtrai-se esse resultado de cada amostra individual:

$$V_j = V_i - V_{med}, \quad (39)$$

- c) Eleva-se os pontos de tensão amostrados ao quadrado:

$$V_{quad} = V_j^2, \quad (40)$$

- d) Utiliza-se o método de suavização de Kernel para a criação do envelope:

$$EN_i = \frac{\sum_{j=1}^n K \cdot \left(\frac{t_i - t_j}{W}\right) \cdot VS_j}{\sum_{j=1}^n K \cdot \left(\frac{t_i - t_j}{W}\right)}, \quad (41)$$

em que  $EN_i$  é o componente suavizado da envoltória na  $i$ -ésima amostra,  $VS_j$  é a tensão instantânea ao quadrado na  $j$ -ésima amostra;  $t_i$  e  $t_j$  são amostras de tempo no  $i$ -ésimo e  $j$ -ésimo ponto;  $W$  representa o parâmetro de suavização de Kernel;  $K$  é a função de suavização Kernel Gaussiana.

4. **Simulação do Circuito:** A simulação do circuito precede a concepção do *hardware* detector de envelope propriamente dito, tendo em vista que é possível avaliar a topologia do circuito por meio de algum *software*, como, por exemplo, o LTspice<sup>®</sup> ou o Matlab<sup>®</sup>.

---

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma análise do estado da arte referente à detecção e localização de DP, com foco no método radiométrico. Este capítulo está organizado em duas seções. Na primeira seção, apresenta-se uma retrospectiva histórica da aplicação do método UHF na detecção e na localização de DP. Na segunda seção, apresenta-se uma análise minuciosa dos trabalhos mais relevantes ao desenvolvimento da dissertação, a qual é finalizada com um quadro sinóptico resumindo as principais contribuições dos trabalhos analisados na etapa da revisão bibliográfica.

### 3.1 RETROSPECTIVA HISTÓRICA

As pesquisas envolvendo DP vêm se desenvolvendo desde 1988, quando Natrass (1988) criou os primeiros mecanismos para a identificação de DP por meio da interpretação dos padrões visuais provenientes de gráficos elípticos, a partir dos quais o autor elencou diversas configurações de isolamentos e às correlacionou com diferentes defeitos.

Ainda nesse ano, Hampton e Meats (1988) foram os pioneiros na aplicação do método radiométrico para a detecção e a localização de DP em uma GIS (do inglês, *Gas Isolated Substation*) de 420 kV e 40 m de comprimento. Os resultados de detecção mostraram que os sinais radiométricos de DP predominam na faixa de frequência de 600 a 900 MHz e, o erro de localização da fonte de DP foi de apenas 1 metro. Tais resultados impulsionaram pesquisas subsequentes, como em Yuen e Chan (1991) e Pearson *et al.* (1995), as quais contribuíram para a consolidação do uso de sensores UHF no monitoramento de DP.

Mais tarde, Judd *et al.* (2001) observaram que o uso de janelas dielétricas em equipamentos de alta tensão aumentava a sensibilidade da detecção de DP. Essa melhora na sensibilidade se deve ao aumento da constante dielétrica do meio de propagação, ocasionada pelo uso da janela dielétrica como superstrato. Observa-se, no entanto, que a localização de fontes de DP em transformadores de potência se torna um problema tridimensional, em que a fonte é definida em coordenadas espaciais, aumentando a complexidade do



problema. Destaca-se ainda, que a presença de obstáculos entre os sensores e a fonte das DP resultam em reflexões e refrações das ondas eletromagnéticas emitidas pelos pulsos de DP, ocasionando erros significativos nos resultados dos algoritmos de localização.

Diante desse problema, Yang e Judd (2003) propuseram a utilização de três sensores UHF para a localização de fontes de DP em transformadores, a partir de um modelo numérico em que o transformador é representado por uma matriz 3D composta por células com a mesma dimensão. A cada uma dessas células foi atribuído um código que define se o sinal poderá se propagar. Posto isso, conforme o princípio de Huygens-Fresnel, o sinal medido no sensor UHF irá corresponder à composição de todas as frentes de ondas percorridas pelos diferentes caminhos de propagação no transformador. O início do sinal é obtido pela primeira frente de onda, que percorre o caminho mais curto entre o defeito e o sensor, sofrendo um atraso de propagação mínimo. Desse modo, o tempo de propagação do sinal é calculado a partir de cada célula, verificando-se geometricamente o menor caminho de propagação até os diferentes sensores UHF. O método de localização consiste na busca pela célula no espaço em que os atrasos no tempo correspondem aos dados medidos dentro de uma tolerância especificada.

A partir daí, uma série de pesquisadores passou a investigar métodos para a determinação da localização de fontes de DP a partir da Diferença dos Tempos de Chegada (TDOA, do inglês: *Time Difference of Arrival*) de sinais de DP, a saber: energia cumulativa (NOBREGA, 2019; XAVIER *et al.*, 2021), energia cumulativa com *slope* negativo (SILVA *et al.*, 2021), correlação cruzada (HAMPTON; MEATS, 1988; JING-GANG *et al.*, 2008; TANG *et al.*, 2006), critério de Akaike (DUARTE, 2015; ROBLES; FRESNO; MARTÍNEZ-TARIFA, 2015) e primeiro pico (KAKEETO *et al.*, 2008; SINAGA; PHUNG; BLACKBURN, 2012), demonstrando a boa exatidão proporcionada por esse método, que, em contrapartida, requer equipamentos de medição com taxa de amostragem elevada.

Logo, a preocupação com a taxa de amostragem passou a ser o objeto de estudos de alguns trabalhos, como Pinpart e Judd (2010) e Souza Neto (2014). No primeiro, foi proposto um método para identificar múltiplas fontes de DP a partir da comparação dos envelopes dos sinais DP. No segundo, propõe-se um sistema de baixo custo para o monitoramento de DP em subestações de energia elétrica a partir de uma abordagem baseada na proporção de energia, removendo-se assim, a necessidade de sincronização entre os sensores, bem como, a alta taxa de amostragem requerida pelos equipamentos de aquisição de dados.

Em seguida, colaborando com o estado da arte a partir de uma abordagem mais concentrada nas características das envoltórias de sinais de DP, Zaeni e Khayam (2015) investigaram os parâmetros: tempo de subida, tempo de descida e tempo de duração de envoltórias produzidas via *hardware* e *software*, de forma a avaliar a alternativa que

resultaria nos parâmetros mais similares aos extraídos dos sinais originais, dentre elas: o método da interpolação, a transformada de Hilbert e a simulação do circuito detector de envoltória.

Nos anos seguintes, as pesquisas envolvendo a localização radiométrica de DP passaram a investigar alternativas para o problema do sincronismo entre os sensores, que, em geral torna o sistema de instrumentação comercialmente mais custoso. Assim, os erros de localização que anteriormente eram da ordem de centímetros, agora passam a ser reportados na ordem de metros. No entanto, os arranjos passam a cobrir áreas maiores, com uma aplicação focada na localização do equipamento (LI *et al.*, 2017; KHAN, 2018; DHARA; KOLEY; CHAKRAVORTI, 2023).

Nessa mesma época, Jaber *et al.* (2017) apresentaram resultados mais concretos de uma pesquisa ainda incipiente na literatura técnica, na qual foram realizados diferentes arranjos para emular a atividade de DP, de forma a investigar a relação entre a carga aparente dos pulsos de DP, medida a partir do método elétrico proposto pela norma IEC 60270, e a potência irradiada efetiva, captada por meio de antenas. O estudo mostrou uma relação linear entre as medições realizadas pelos dois métodos, mostrando que a estimativa do nível de DP via o método radiométrico é possível, o que torna as pesquisas acerca do monitoramento da atividade de DP utilizando as informações presentes no envelope ainda mais promissoras.

### 3.2 TRABALHOS MAIS RELEVANTES

Jing-gang *et al.* (2008) avaliaram o desempenho de três métodos para a determinação do Tempo de Chegada (ToA, do inglês: *Time of Arrival*) de sinais radiométricos de DP. O primeiro deles foi o método do primeiro pico, o qual foi associado à Transformada *Wavelet* para filtrar o ruído de fundo presente no sinal; o segundo foi o método da energia cumulativa, o qual apresentou erros de localização consideráveis para sinais com  $SNR < 30\text{dB}$ ; o terceiro método foi o da correlação cruzada, o qual apresentou os melhores resultados de localização. No entanto, os autores constataram que esse método só deve ser aplicado a sinais com coeficiente de correlação superior a 0,8, o que o torna bastante limitado para aplicações em campo, uma vez que os sinais estão sujeitos a atenuações, reflexões e refrações durante sua propagação, o que resulta em sinais com baixa similaridade.

Portugues *et al.* (2009) desenvolveram um método de monitoramento para o isolamento de equipamentos de alta tensão baseado na detecção de sinais radiométricos de DP. O sistema de monitoramento foi associado a um algoritmo de localização que utiliza o método da correlação cruzada para a determinação dos ToA. O sistema é composto por um osciloscópio e 4 antenas dispostas em uma área de 14 x 7 metros quadrados. Ele é capaz de realizar registros contínuos de dados e determinar a localização bidimensional da

fonte de DP. O trabalho foi aplicado em subestações isoladas a ar nos Estados Unidos e no Reino Unido, sob condições operacionais normais. Como resultado, o sistema registrou uma atividade de DP incomum na área delimitada pelas antenas três semanas antes de um transformador ficar fora de operação. Após a retirada do equipamento defeituoso, não houve a detecção de sinais similares aos obtidos anteriormente à falha, o que evidenciou a eficácia desse método de monitoramento preditivo. Destaca-se aqui, que técnicas de interpolação foram aplicadas aos sinais de DP para melhorar a precisão do algoritmo de localização, assim como em Jing-gang *et al.* (2008).

Pinpart (2010) propôs um método para a identificação de múltiplas fontes de DP a partir da comparação dos envelopes dos sinais obtidos por sensores UHF. Para tanto, os autores realizaram a detecção analógica do envelope, reduzindo de maneira significativa a largura de banda e a taxa de amostragem requerida para realizar a aquisição do sinal. Em contrapartida, tal processo provocou uma perda de informação do instante de tempo de chegada do sinal UHF, o que tornaria a localização de fontes de DP pelo método TDOA imprecisa.

Sinaga, Phung e Blackburn (2012) analisaram 3 métodos para a determinação dos ToA para a Localização de DP em transformadores: método do primeiro pico, energia cumulativa e correlação cruzada. Para tanto, foi utilizado o tanque de um transformador com 71,5 cm de largura, 118 cm de comprimento e 95 cm de altura. Após uma análise comparativa das três técnicas, utilizando sinais de DP com e sem ruído, o método do primeiro pico se mostrou o mais exato, com erro de localização de apenas 14,33 cm em contraste com 22,11 cm do método da correlação cruzada e 28,84 cm obtidos a partir dos métodos da energia cumulativa do sinal.

Souza Neto (2014) propôs um sistema de monitoramento de DP baseado na proporção da energia dos envelopes dos sinais de DP. Neste trabalho, os sinais foram emulados por meio uma célula de óleo e detectados por meio de uma antena do tipo diskcone associada ao detector de envelope ADL5511. Esse detector possui uma largura de banda de saída de até 130 MHz e opera com sinais de entrada de até 6 GHz. O envelope, conforme foi constatado nessa pesquisa, preservou uma parcela significativa da energia do sinal. Na aplicação do sistema de monitoramento houve um erro de localização de 5,94 metros, em um arranjo dimensional de 9 x 12 metros quadrados e a aplicação de 5 antenas, o que demonstrou que a localização de DP sem sincronismo entre os sensores é possível.

Zaeni e Khayam (2015) propuseram uma alternativa para facilitar a determinação dos tempos de subida e tempo de descida de sinais de DP via envoltórias. Para tanto, os autores realizaram uma avaliação comparativa dos envelopes gerados via diferentes métodos: circuito detector de envelope na forma de *hardware* e *software*, algoritmo de interpolação, transformada de Hilbert e filtro passa baixa digital e, como entradas, aplicaram-se os sinais provenientes de diferentes sensores: antena, detector de impedância e Transformador de

Corrente de Alta Frequência (HFCT, do inglês: *High Frequency Current Transformer*). A avaliação mostrou que, dentre os métodos analisados, a interpolação resultou em tempos de subida e descida mais próximos dos valores correspondentes aos sinais originais. O circuito detector de envoltória na forma de *hardware*, por outro lado, não foi capaz de produzir um envelope, uma vez que os componentes empregados não foram dimensionados de forma adequada à faixa de frequência das DP.

Duarte (2015) realizou a análise do desempenho de uma série de técnicas de localização baseadas no método radiométrico: TDOA Não-Linear, TDOA Linear, Razão das Potências e o método Híbrido, proposto no trabalho. Na análise, o autor realizou a aplicação de tais técnicas em um ambiente simulado baseado no modelo do traçado de raios, de forma a aproximar os resultados da propagação das ondas aos obtidos em uma subestação. Outrossim, criaram-se 4 cenários para a aplicação das técnicas de localização: (i) espaço livre com ruído, (ii) ambiente com multipercurso e (iii-iv) subestação de alta tensão com multipercurso com e sem ruído. O autor observou que a localização das fontes de DP estimada pelo método da razão de potências foi pouco afetada pelo nível de ruído, tendo em vista que a energia dos pulsos de DP é superior à do ruído, no entanto, o método se mostrou sensível ao multipercurso, apresentando o maior erro de localização para o último cenário. Os resultados de localização estimados a partir das técnicas baseadas em TDOA, por outro lado, mostraram-se mais robustos ao multipercurso e sensíveis ao ruído presente no ambiente, apresentando um erro localização de apenas 0,1 m em subestações abertas de alta tensão com multipercurso e ruído. Por fim, no que concerne o método híbrido, observou-se a possibilidade de aplicação do método em todos os cenários, no entanto, ele é afetado por todas as condições avaliadas.

Robles *et al.* (2016) realizaram análises a partir de dados experimentais de diferentes configurações de arranjos para o posicionamento de antenas em uma subestação aberta, a fim de minimizar o erro na localização das fontes da DP. Neste estudo, os autores incluíram no algoritmo de localização o erro relativo à baixa resolução do osciloscópio utilizado. Um outro fator a ser considerado é que a pesquisa não fez a análise espacial da localização, contudo, para a aplicação em uma subestação desse tipo, as coordenadas (x,y) fornecem um bom indicativo de qual equipamento está sob a ocorrência de DP.

Li *et al.* (2017) propõem um método de localização de DP baseado na intensidade do sinal recebido. O método proposto consiste em duas etapas: na primeira, os sinais são detectados a partir de uma matriz de sensores UHF sem fio e processados por um algoritmo de agrupamento que tem o objetivo de fornecer uma localização preliminar a partir do reconhecimento do agrupamento, reduzindo a região de busca. Em sequência, outro algoritmo é aplicado para realizar a localização precisa da DP. Nesse trabalho, os erros de localização foram inferiores a 3 m em uma área de 24 por 24 metros quadrados.

Khan (2018) investigou com mais afinco uma alternativa de localização de fontes de

DP sem sincronização entre sensores, baseando-se apenas na intensidade do sinal recebido. Para tanto, o autor realizou simulações e testes experimentais para avaliar a eficácia do algoritmo sob diversos níveis de ruído. Ao final, é possível observar a prova do princípio de que é possível realizar a localização baseada em RSS, a qual é promissora e pode ser usada de forma independente.

Nobrega (2019) propôs um algoritmo que considera os efeitos das refrações e reflexões dentro do tanque de um transformadores de potência. O método realiza a simulação dos efeitos das ondas eletromagnéticas geradas pelas DP e obtém o tempo de propagação do sinal entre cada ponto do espaço tridimensional do transformador e os sensores UHF, constituindo-se como uma evolução do trabalho desenvolvido por Yang e Judd (2003).

Silva *et al.* (2020) utilizaram quatro antenas bioinspiradas distribuídas ao redor de uma cuba com óleo (Fonte de DP), constituindo um arranjo tridimensional com  $2 \times 2 \times 0,97$  metros cúbicos. O objetivo dos pesquisadores foi a avaliar a precisão do método TDOA mediante a aplicação de três algoritmos distintos para a determinação do ToA: Energia Cumulativa com *Slope* Negativo, Critério de Akaike e Correlção Cruzada, em sinais sob diferentes níveis de ruído, em uma faixa variando de 25 dB a 5 dB. Após a aplicação dos três algoritmos, evidenciou-se que a alteração da SNR afetou a precisão da localização resultante da aplicação de todos os métodos, entretanto, o método da Energia Cumulativa com *Slope* Negativo se apresentou menos sensível ao ruído. O critério de Akaike, por outro lado, mostrou-se bastante dependente do nível de ruído, apresentando diferentes posições para cada um dos cenários avaliados. A correlação cruzada, por fim, apresentou os maiores erros de localização, mostrando-se muito dependente da semelhança entre os sinais, o que dificulta a sua aplicação em cenários realísticos, uma vez que o multipercorso causa alterações significativas em cada sinal.

Silva *et al.* (2021) aplicaram técnicas de *machine learning* para realizar o reconhecimento automático de envelopes de sinais radiométricos de DP provenientes de diferentes equipamentos de alta tensão: cuba de óleo com eletrodos ponta-plano, a barra de um hidrogerador e um transformador de potencial. A partir dos envelopes desses sinais foi realizada a extração de atributos no domínio do tempo, tais como: curtose, amplitude máxima e tempo de subida. Em seguida, realizou-se a seleção dos atributos por meio de uma associação de algoritmos de forma a reduzir a dimensionalidade dos dados e aumentar a eficiência do algoritmo classificador. Por fim, realizou-se a classificação dos sinais de DP a partir das seguintes técnicas: rede neural artificial, decision tree e random forest. Os resultados mostraram que os atributos extraídos dos envelopes foram suficientes para realizar a classificação das fontes de DP, com valores de acurácia média superiores a 95%.

### 3.2.1 Síntese Bibliográfica

Jing-gang *et al.* (2008) evidenciaram que sinais com coeficiente de correlação abaixo de 0,8 inviabilizam a aplicação direta do método da correlação cruzada na determinação da TDOA, o que também foi observado por Portugues *et al.* (2009), portanto, essa limitação torna o método inadequado para aplicações em tempo real, tendo em vista que há a necessidade de uma etapa de pré-processamento.

Pinpart (2010) propôs um método na forma de *hardware* e *software* baseado na detecção do envelope de sinais de DP, com o objetivo de aplicar um equipamento de aquisição de dados com menor taxa de amostragem. O método se mostrou eficaz, preservando características importantes dos sinais e foi utilizado por Silva *et al.* (2021) para avaliar a aplicação de técnicas de IA na classificação de fontes de DP. No entanto, o método proposto ainda carece de análises acerca da sua precisão na determinação dos ToA, o que o tornaria aplicável em metodologias de localização. Alternativamente, a detecção do envelope dos sinais de DP já se mostrou viável em métodos baseados na proporção de energia (SOUZA NETO, 2014; LI *et al.*, 2017; KHAN, 2018), no entanto, ainda apresentados como uma de prova do princípio, utilizando fontes controladas, as quais não são capazes de reproduzir os efeitos das reflexões e refrações internas aos equipamentos, bem como o caráter aleatório dos sinais de DP.

Sinaga, Phung e Blackburn (2012) avaliaram a eficiência de três métodos para a determinação dos ToA de sinais de DP em um arranjo experimental com pequenas dimensões. Os métodos se mostraram eficazes na determinação das coordenadas espaciais da fonte, no entanto, na etapa experimental foi utilizado um osciloscópio com taxa de amostragem de 40 GSa/s, o que constitui um fator indesejado no quesito custo. Uma análise semelhante foi realizada anos mais tarde por Silva *et al.* (2020), na qual foi utilizado um osciloscópio com taxa de amostragem de apenas 2,5 GSa/s e foram obtidos resultados de localização aceitáveis.

Zaeni e Khayam (2015) analisaram diversos métodos para detectar o envelope de sinais de DP, no entanto, apenas as técnicas na forma de *software* tiveram êxito. Nesse mesmo ano, Duarte (2015) avaliou o desempenho de diversos métodos de localização de fontes de DP considerando o efeito do ruído e do multipercurso, no entanto, a análise se restringiu ao ambiente computacional, assim como o estudo realizado por Nobrega (2019).

Robles *et al.* (2016) avaliaram diversos arranjos de antenas para localizar fontes de DP em subestações, com um destaque para a inclusão do erro do osciloscópio no algoritmo de localização, o que garante uma certa precisão quando se utiliza equipamentos com uma taxa amostragem insuficiente.

Um fato comum observado até aqui foi a elevada taxa de amostragem dos equipamentos de aquisição de dados empregados na etapa de medição das DP, em geral

um osciloscópio, o que se trata de um fator indesejável para realizar o monitoramento dos equipamentos de alta tensão em uma subestação, tendo em vista as condições em que o equipamento estaria exposto, a saber: campos elétricos intensos, variações no clima, bem como a necessidade de um ponto de conexão de energia para a alimentação do equipamento.

Logo, faz-se necessário avaliar técnicas para simplificar o *hardware* empregado nessas medições, bem como, avaliar os impactos que tais técnicas trazem às metodologias de localização de DP. Nesse contexto, propõe-se nesta dissertação uma metodologia para detectar e localizar fontes de DP a partir de envelopes de sinais radiométricos, de forma a contribuir com o estado da arte. Isso posto, um resumo desses trabalhos é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Síntese Bibliográfica.

Autor	Método	Aplicação	Sinal				
			Real	Artificial	Simulado	Íntegro	Envelope
Jing-gang <i>et al.</i> (2008)	TDOA	Localização em Transformador	x			x	
Portugues <i>et al.</i> (2009)	TDOA	Localização em Subestação	x			x	
Pinpart (2010)	SK	Classificação de DP em Transformador	x				x
Sinaga, Phung e Blackburn (2012)	TDOA	Localização de DP em Transformador	x			x	
Souza Neto (2014)	RSS	Localização em Subestação	x				x
Zaeni e Khayam (2015)	TDOA	Avaliação de Envelopes de DP	x				x
Duarte (2015)	TDOA + RSS + Híbrido	Localização de DP em Subestação			x	x	
Li <i>et al.</i> (2017)	TDOA	Localização em Subestação		x			x
Khan (2018)	RSS	Localização em Subestação		x			x
Robles <i>et al.</i> (2016)	TDOA	Deteção e Localização em Subestação	x			x	
Nobrega (2019)	TDOA	Localização de DP em Transformador			x	x	
Silva <i>et al.</i> (2020)	TDOA	Localização de DP em Subestação	x			x	
Silva <i>et al.</i> (2021)	SK	Classificação de DP em Subestação	x				x
Este trabalho	TDOA & RSS	Localização em Subestação	x				x

Fonte: autoria própria.

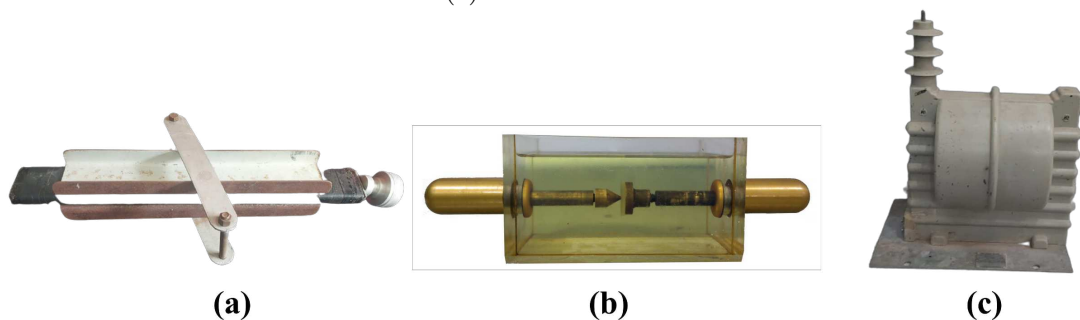
## Metodologia

Apresenta-se neste capítulo a metodologia aplicada no desenvolvimento desta dissertação, a qual está dividida em cinco Seções, conforme a seguir.

### 4.1 SELEÇÃO DA ANTENA

A determinação da antena a ser utilizada na etapa de detecção das DP considerou as medições realizadas por Silva *et al.* (2021), as quais compõem um banco de dados formado por 30 sinais de DP medidos com um osciloscópio com largura de banda de 1 GHz e taxa de amostragem de 5 GSa/s, originários de equipamentos distintos: barra de hidrogerador, cuba de óleo com eletrodos ponta-plano e Transformador de Potencial (TP), conforme é apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Objetos de teste. (a) Barra de hidrogerador. (b) Cuba com eletrodos ponta-plano imersos em óleo mineral. (c) TP 36kV.

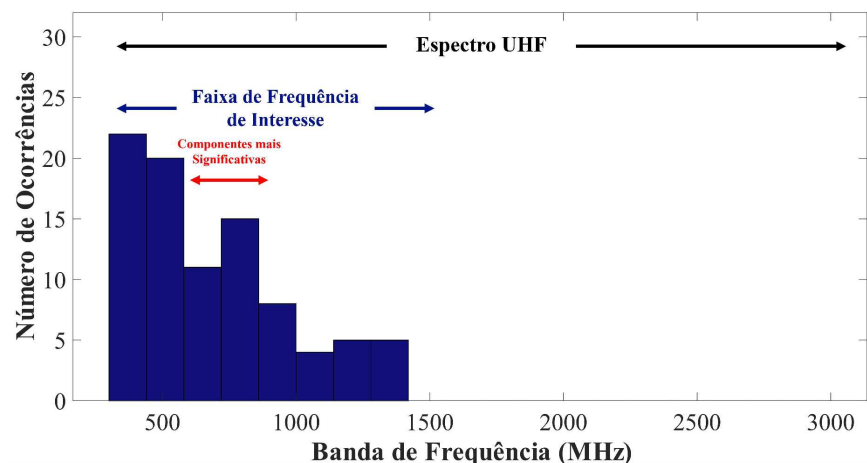


Fonte: autoria própria.

A partir desse banco de dados foi realizado o histograma de frequências apresentado na Figura 4.2, de forma a analisar as componentes de frequência mais significativas.



Figura 4.2 – Histograma de Frequência de Sinais de DP.

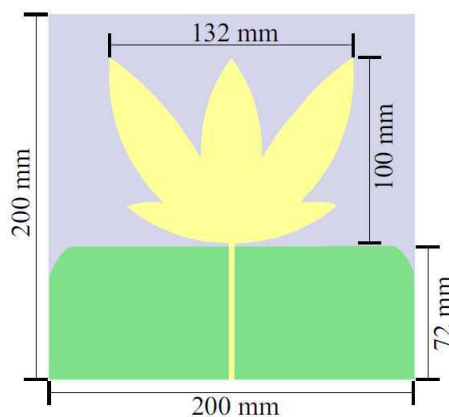


Fonte: autoria própria.

Nota-se, a partir do histograma apresentado na Figura 4.2, as bandas de frequência em que há a maior ocorrência do fenômeno: 300 a 580 MHz (maior número absoluto de ocorrências) e 720 a 860 MHz (maior intensidade). Isso posto, analisaram-se algumas antenas apresentadas no estado da arte com: (i) operação na faixa de frequência de interesse e (ii) ganho superior ao valor de 2 dBi, recomendado para a detecção de DP (LUO *et al.*, 2016).

A antena bioinspirada desenvolvida por Nobrega (2019), apresentada na Figura 4.3, atende a ambos os requisitos listados, apresentando uma faixa de frequência de 487 a 1497 MHz, um ganho médio 2,92 dBi e sensibilidade de detecção para DP com níveis de carga aparente superiores a 35 pC.

Figura 4.3 – Antena de bioinspirada.



Fonte: retirado de (NOBREGA, 2019).

Para a aplicação em localização, é importante que todas as antenas empregadas na medição apresentem características idênticas, tendo em vista que isso pode alterar a estimativa da posição da fonte. Para tanto, realizou-se a caracterização de cada uma das

antenas utilizando um Nano *Vector Network Analyser* (NanoVNA), com o objetivo de avaliar as semelhanças entre as antenas. Neste processo foi realizada a calibração SOLT.

## 4.2 DETECTOR DE ENVELOPE

A partir da mesma base de dados foi realizado o dimensionamento de um detector de envelope. O objetivo foi determinar a banda de frequência mínima para detectar a informação de interesse. Tal processo está baseado no carregamento e descarregamento do capacitor que compõe o detector de envelope, ou seja, determina-se a constante  $RC$  de modo que o sinal retificado siga o envelope e não a variação do pulso de DP. Destaca-se que o formato dos pulsos e, portanto, os valores selecionados para  $RC$  podem variar com a rigidez dielétrica do material, tipo de falha e tensão aplicada (SOUZA NETO, 2014).

A determinação da constante de tempo  $RC$  tem como ponto de partida o critério dos 63% da energia acumulada de cada sinal de DP. A constante de tempo escolhida deverá ser a menor dentre toda a base de dados. Esse processo está resumido no Algoritmo 1 (SOUZA NETO, 2014).

### Algoritmo 1: Determinação da Constante RC

```

1  Entrada:
2     $T$ : Vetor de tempos do sinal de DP
3     $S$ : Vetor de valores do sinal de DP
4  Saída:
5     $RC$ : Constante de tempo

6   $T_oA \leftarrow$  Calcular Tempo de Chegada( $T, S$ )
7   $E_{total} \leftarrow$  Calcular Energia Total( $S$ )
8   $E_{min} \leftarrow 0.63 \times E_{total}$ 
9   $E_c \leftarrow$  Calcular Energia Cumulativa( $S$ )

10 Para  $i = 1$  até tamanho de  $S$  faça
11   Se  $E_c[i] > E_{min}$  então
12      $RC \leftarrow T[i] - T_oA$ 
13   Quebrar Loop
14 Fim Se
15 Fim Para

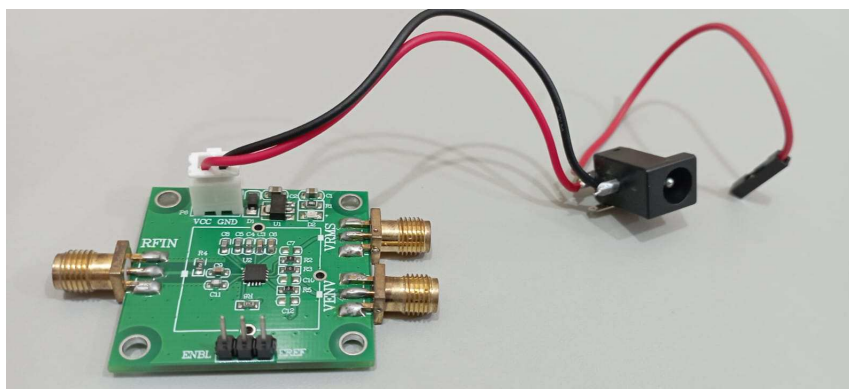
16 Retornar  $RC$ 

```

Em seguida, as equações de corrente e tensão do capacitor são utilizadas para determinar os componentes adequados, levando em consideração a banda de frequência desejada.

Isso posto, realizou-se uma pesquisa de mercado referente aos circuitos comerciais que atendessem aos propósitos desse trabalho. A solução encontrada corresponde ao sistema desenvolvido pela Analog Devices® sob forma de uma placa de sensoriamento com o detector de envoltória ADL5511, apresentado na Figura 4.4, o qual atende às características necessárias ao monitoramento radiométrico de DP e já foi aplicado em pesquisas da área (GERLACH *et al.*, 2022; SOUZA NETO *et al.*, 2014).

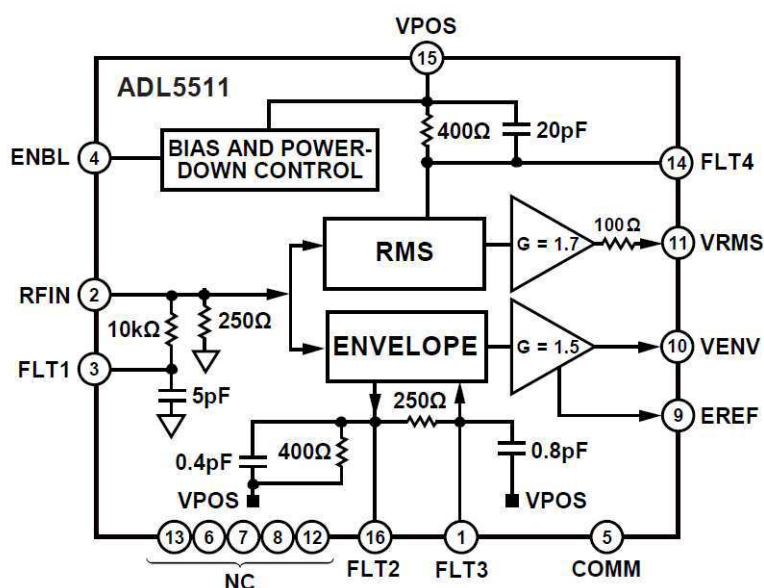
Figura 4.4 – Detector comercial.



Fonte: autoria própria.

O ADL5511 é um dispositivo detector de envelope e TruPwr RMS de RF desenvolvido para operar com sinais de até 6 GHz, sendo amplamente utilizado em aplicações de medição de potência em infraestrutura sem fio, instrumentação, bem como nos mercados de defesa e aeroespacial. Este circuito utiliza uma abordagem patenteada para detectar o envelope de um sinal de entrada, proporcionando uma ampla faixa dinâmica com excelente precisão. O diagrama de blocos desse circuito é mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Diagrama de blocos do ADL5511.



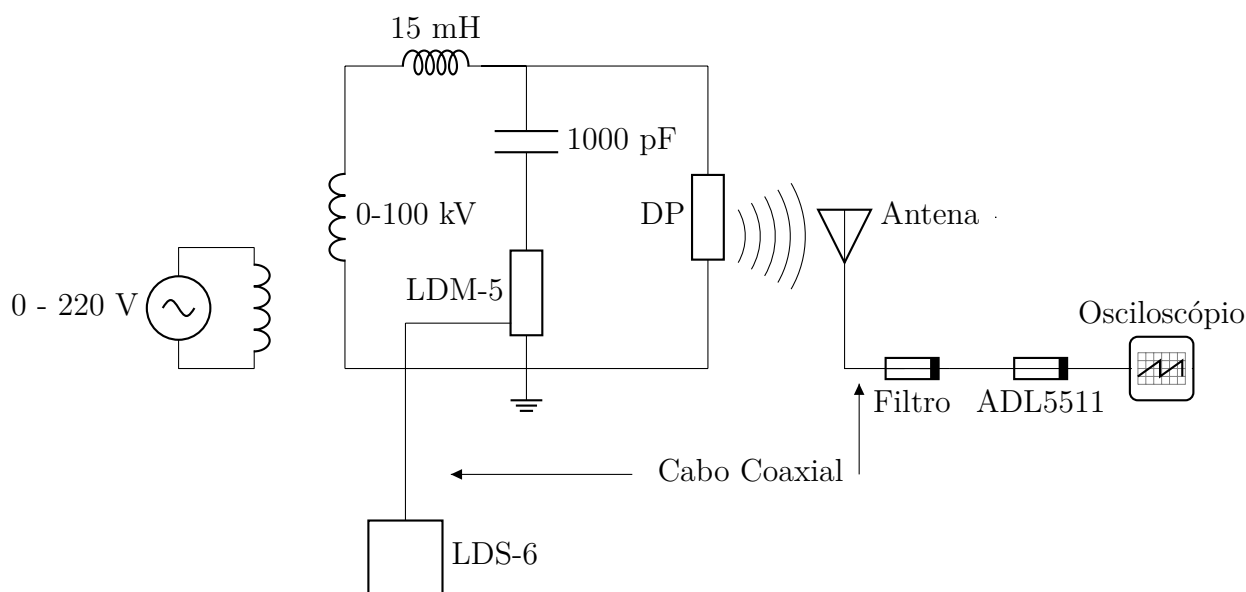
Fonte: Analog Devices®.

Verifica-se, na Figura 4.5, que este circuito possui como entrada o pino RFIN, que recebe um sinal em RF com até 6 GHz. Como saídas, temos o pino VRMS, que fornece a tensão em RMS, e o pino VENV, na saída do bloco ENVELOPE, baseado no circuito apresentado na Figura 2.10, que fornece o envelope do sinal de entrada com largura de banda de saída de até 130 MHz. Também é possível observar o pino ENBL, compatível com uma tensão CC de até 5 V, que tem a função de habilitar o circuito.

### 4.3 AVALIAÇÃO DO ADL5511 EM ENSAIOS DE DP

Os ensaios realizados nesta etapa tiveram como objetivo avaliar o desempenho do circuito ADL5511 na detecção do envelope dos sinais de DP, como parte da metodologia adotada neste estudo. Eles foram realizados por meio do método radiométrico, o qual é o foco desta pesquisa, em paralelo ao método elétrico descrito pela norma IEC60270 (2000), utilizado como referência. O esquemático do arranjo de medição utilizado para a realização desses ensaios é apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Arranjo de medição para a detecção DP.



Fonte: autoria própria.

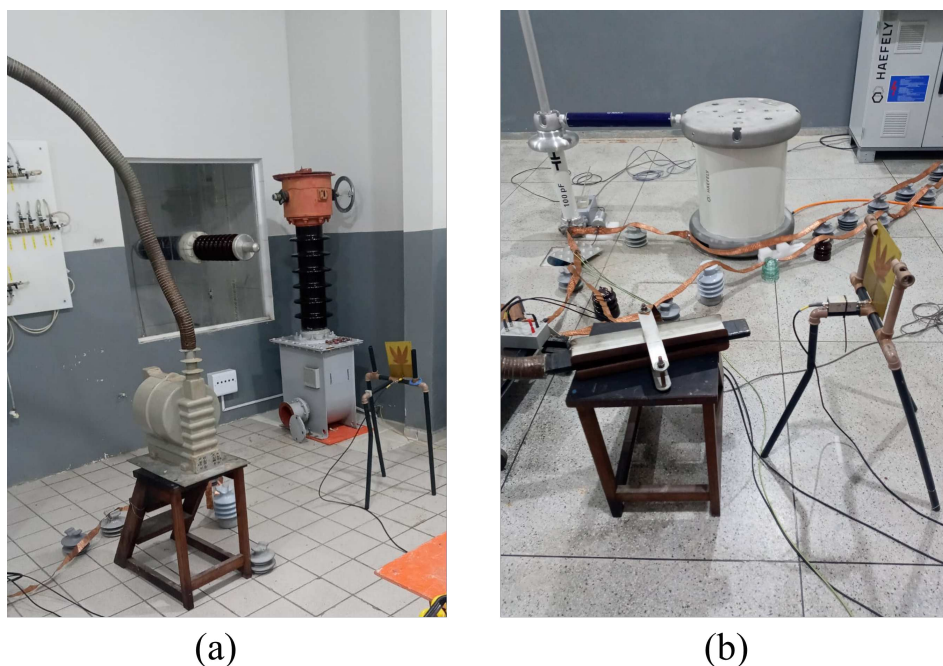
No método tradicional, utilizou-se um capacitor de acoplamento de 1000 pF, conforme a recomendação da norma IEC; um indutor de 15 mH, como filtro passa-baixas para suprimir as interferências de alta frequência originárias da fonte de tensão; e o sistema de medição comercial LDS-6 da Double Lemke, o qual realiza medições diretamente na impedância externa do circuito, neste caso o LDM-5. O LDM-5 é um circuito ressonante que prolonga pulsos de corrente no domínio do tempo, tornando sua detecção mais fácil. Além

disso, o calibrador LDC-5 foi utilizado para calibração, que oferece valores de calibração de 5, 20, 100 e 500 pC.

No que concerne ao arranjo de medição radiométrico, apresentado na Figura 4.7, utilizou-se a antena desenvolvida por Nobrega (2019), um osciloscópio com taxa de amostragem de 5 GSa/s, um Filtro Passa Altas (FPA) passivo na saída da antena, com frequência de corte de 100 MHz para remover ruídos de baixa frequência e o circuito ADL5511 na entrada do osciloscópio.

Para avaliar o desempenho do circuito ADL5511, foi realizada uma análise comparativa entre a energia dos sinais originais e dos envelopes resultantes de 20 medições de um TP de 36 kV modelo ZI-MS94, apresentado na Figura 4.7 (a) e 20 medições da barra de um hidrogerador, apresentada na Figura 4.7 (b). O objetivo foi observar a semelhança entre a evolução das curvas e o impacto causado pela queda de tensão associada ao diodo presente no circuito. Por fim, aplicou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transformer*) para avaliar as componentes de frequência em cada um dos casos.

Figura 4.7 – Arranjo de medição: (a) TP 36 kV. (b) Barra de hidrogerador.



Fonte: autoria própria.

#### 4.4 ENSAIOS DE LOCALIZAÇÃO COM FONTE CONTROLADA

Os primeiros testes de localização tiveram como objetivo analisar as regiões de campo da antena, tendo em vista que a localização via RSS dependerá do princípio físico que fundamenta o modelo de propagação de Friis. Portanto, é necessário que ela esteja

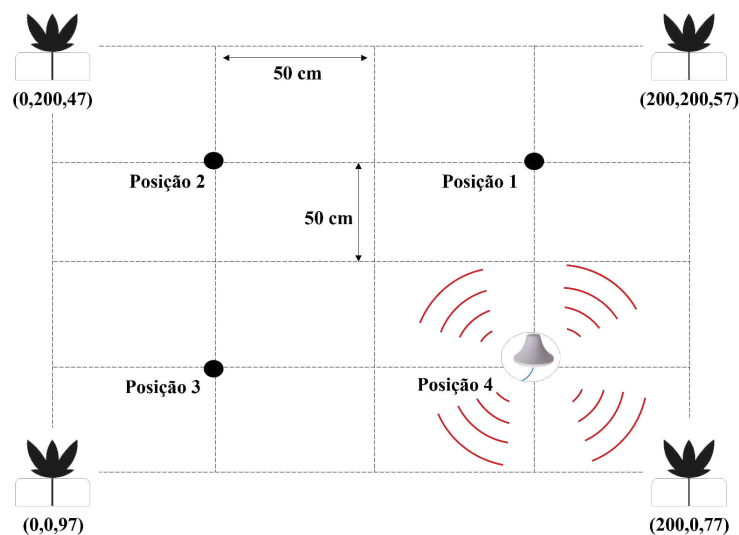
operando na região de campo distante, de modo que a potência do sinal diminua com o aumento da distância.

Isso posto, utilizou-se um arranjo composto por duas antenas bioinspiradas idênticas, uma delas operando como emissor e uma como receptor. A primeira delas foi conectada a um gerador de sinais de RF modelo Agilent N5181A, configurado com potência de 10 dBm na frequência central da antena, ou seja, 992 MHz. A segunda foi conectada a um analisador de RF modelo Agilent N9912A. O teste consistiu em afastar a antena receptora da antena emissora até não ser mais possível identificar o sinal em meio ao ruído, de forma a avaliar a curva de decaimento de potência.

Posteriormente, para avaliar os algoritmos de localização baseados em RSS, houve a determinação de um arranjo experimental em um ambiente com baixa reflexão e baixo nível de ruído. Para tanto, utilizou-se como fonte de irradiação a antena omnidirecional UBER SHUNER 1399.17.0128 conectada ao gerador de sinais Agilent N5181A, evitando assim a necessidade de 4 receptores operando em perfeito sincronismo, tendo em vista que o gerador irradia continuamente.

As dimensões do arranjo apresentado na Figura 4.8 tomaram como referência os trabalhos de Silva *et al.* (2020) e Xavier *et al.* (2021).

Figura 4.8 – Arranjo experimental em ambiente controlado 1: posição das antenas receptoras distribuídas ao redor da antena emissora.



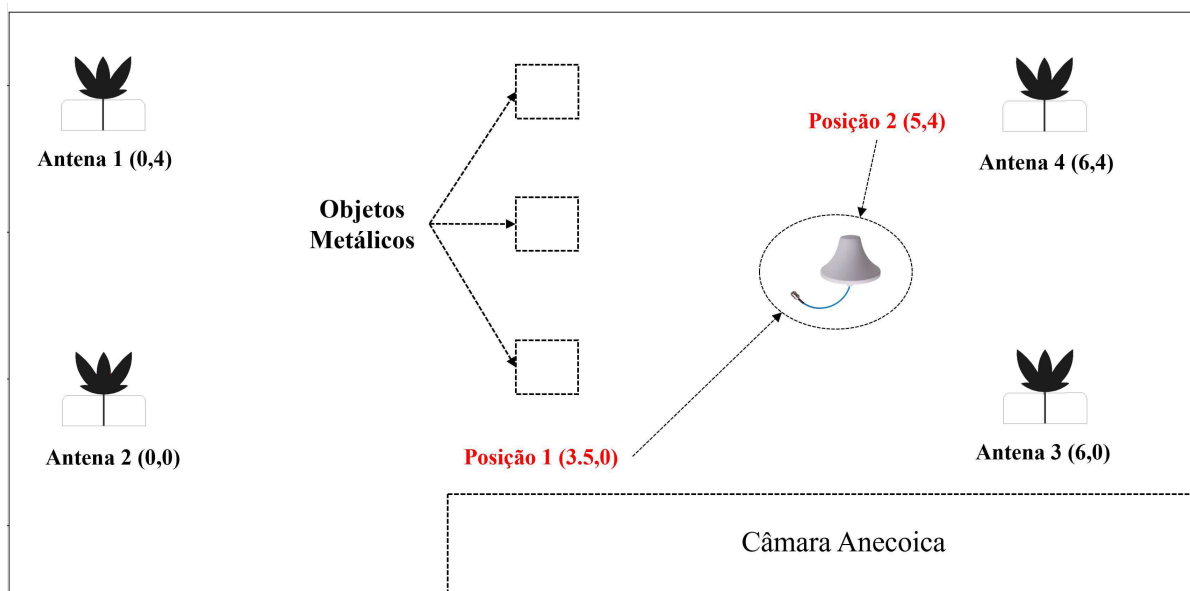
Fonte: autoria própria.

A antena omnidirecional foi posicionada em quatro posições diferentes do arranjo, conforme a Figura 4.8. Para cada posição da fonte, a antena receptora foi deslocada pelos quatro extremos do arranjo. Em cada extremo foi realizada uma média de 30 medições de potência.

Em seguida, de forma a tornar o arranjo mais realístico, o processo foi repetido

para um arranjo com maiores dimensões e a presença de obstáculos metálicos entre as antenas e a fonte. As dimensões desse segundo arranjo podem ser observadas na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Arranjo experimental em ambiente controlado 2: posição das antenas e dos obstáculos metálicos distribuídos ao redor da antena emissora.



Fonte: autoria própria.

## 4.5 METODOLOGIA PARA A LOCALIZAÇÃO DE DP

Nas análises de localização utilizando fontes de DP, foram utilizados dados de três diferentes arranjos, os quais estão descritos nas subseções 4.5.1 a 4.5.3.

### 4.5.1 Arranjo Experimental 1

A base de dados referente ao primeiro arranjo, apresentado na Figura 4.10, foi extraída de Xavier (2021).

O arranjo experimental foi formado por quatro antenas posicionadas conforme a Figura 4.8. Como objeto de teste, foi utilizado um par de eletrodos ponta-plano, imersos em óleo mineral isolante. Os eletrodos foram espaçados por um disco de poliamida com diâmetro de 3 cm, espessura de 0,3 cm e uma pequena cavidade no centro, resultando em padrões de DP típicos de falhas dielétricas internas em equipamentos de alta tensão (MACEDO *et al.*, 2012; XAVIER *et al.*, 2021). Na aquisição dos dados, foi utilizado um osciloscópio com frequência de 1 GHz, quatro canais, taxa de amostragem de 2,5 GSa/s e quatro FPA passivos produzidos em laboratório com frequência de corte 150 MHz.

Para avaliar a eficiência de localização, o objeto de teste foi posicionado em quatro pontos diferentes do arranjo, o qual é mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Arranjo experimental 1: visão das antenas distribuídas ao redor do objeto de teste.



Fonte: retirado de Xavier (2021).

Na etapa computacional associada a este arranjo, houve a simulação dos envelopes no *software* LTspice®, de forma a simular o comportamento do circuito detector de envelope sem a necessidade de quatro circuitos físicos para realizar a avaliação dessa abordagem.

#### 4.5.2 Arranjo Experimental 2

O segundo arranjo experimental, apresentado na Figura 4.11, foi formado por duas antenas, dois FPA passivos com frequência de corte de 100 MHz, dois ADL5511, um osciloscópio com frequência de 1 GHz e taxa de amostragem de 5 GSa/s e, como objeto de teste, o TP de 36 kV modelo ZI-MS94.

Há de se destacar que a partir desse arranjo houve a mudança dos FPA para o modelo CHPFL-0100 de maneira a diminuir a perda na faixa de frequência de interesse, dada a queda de tensão inerente ao diodo presente no detector de envelope.

Figura 4.11 – Arranjo experimental 2: distância entre as antenas e o objeto teste.



Fonte: autoria própria.



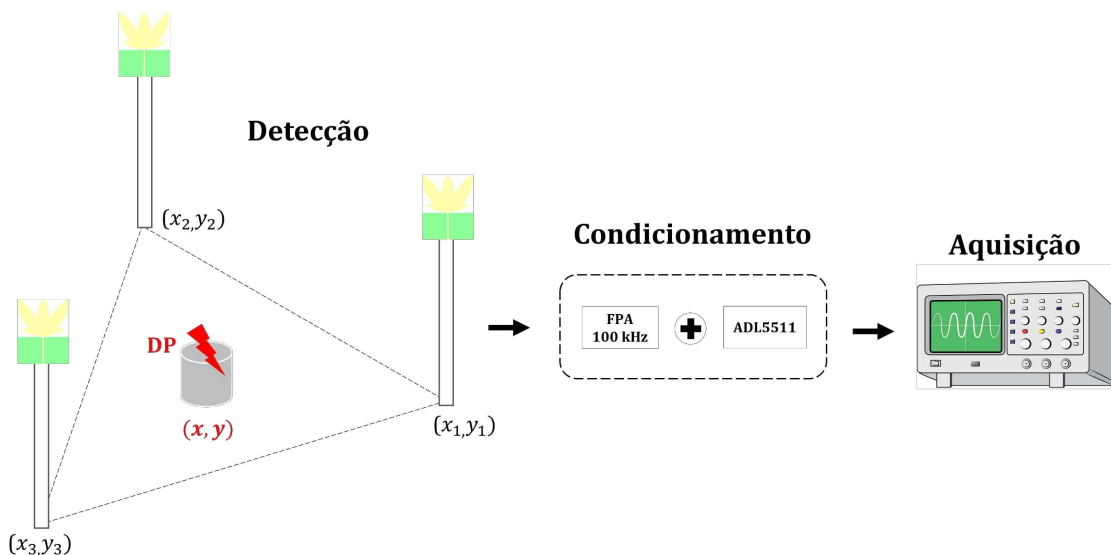
O objetivo foi verificar a potência do sinal recebido a partir de dois diferentes pontos do arranjo, tendo em vista que a adição dos detectores de envoltória pode causar inconsistências nas medições dada a sensibilidade dos componentes.

### 4.5.3 Arranjo Experimental 3

O terceiro arranjo, apresentado na Figura 4.12, foi formado por três antenas, três FPA com frequência de corte 100 MHz modelo CHPFL-0100, três ADL5511 e um osciloscópio com frequência de 1 GHz e taxa de amostragem de 2.5 GSa/s.

Como objeto de teste, foi utilizado o TP de 36 kV modelo ZI-MS94, no qual a tensão foi elevada até haver a atividade de DP.

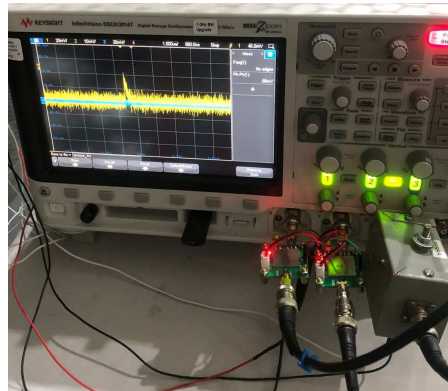
Figura 4.12 – Esquemático referente ao arranjo experimental 3: detecção, condicionamento e aquisição dos sinais de DP.



Fonte: autoria própria.

O objetivo do terceiro arranjo foi avaliar a eficácia dos algoritmos de localização utilizando apenas as envoltórias detectadas analogicamente pelos circuitos comerciais. Para tanto, foram utilizadas três antenas e a cada uma delas foi conectado um FPA passivo para remover os ruídos de baixa frequência e um circuito ADL5511 para detectar a envoltória dos sinais de DP. A saída de cada um dos circuitos foi conectada aos canais de um osciloscópio com frequência de 1 GHz e taxa de amostragem de 2.5 GHz, conforme é mostrado na Figura 4.13.

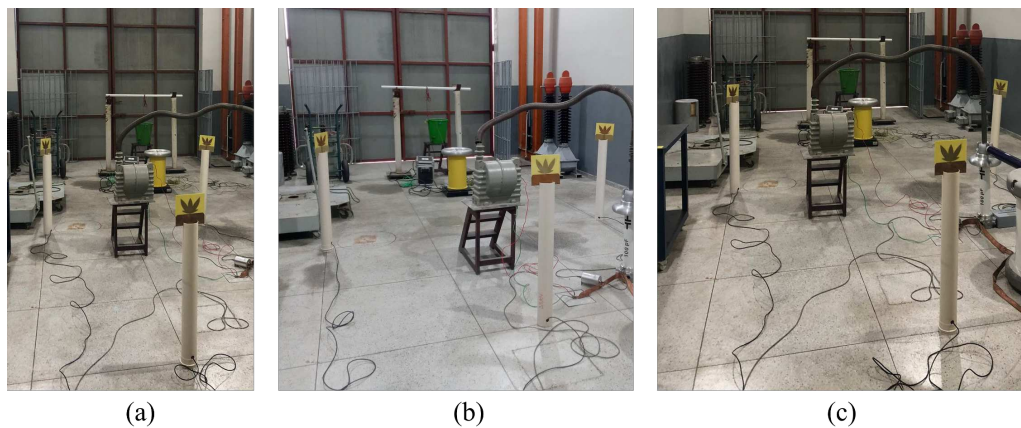
Figura 4.13 – Sistema de aquisição: circuitos ADL5511 nas entradas do osciloscópio.



Fonte: autoria própria.

Nas medições, as antenas e o TP de 36 kV foram dispostos em três posições distintas, conforme as Figuras 4.14 (a) - (c) e a Tabela 4.14.

Figura 4.14 – Arranjo experimental 3: (a) posição 1. (b) posição 2. (c) posição 3.



Fonte: autoria própria.

Tabela 5.2 – Disposição espacial dos arranjos.

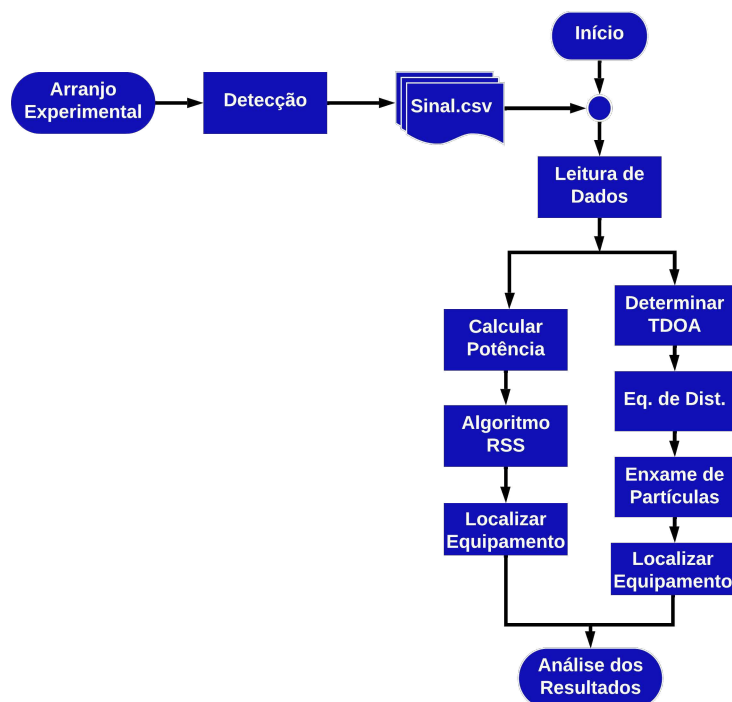
Posição 1			Posição 2			Posição 3		
	x (m)	y (m)		x (m)	y (m)		x (m)	y (m)
Antena 1	1	0	Antena 1	1,5	0	Antena 1	0,0	3,0
Antena 2	0,0	3,0	Antena 2	0,0	2,0	Antena 2	1,5	0,0
Antena 3	2,0	3,0	Antena 3	3,0	2,0	Antena 3	3,0	3,0
TP 36 kV	1,0	2,0	TP 36 kV	1,5	1,5	TP 36 kV	1,0	2,0

Fonte: autoria própria.

#### 4.5.4 Etapa Computacional

O fluxograma apresentado na Figura 4.15 resume a etapa computacional aplicada neste trabalho para localizar a fonte de DP.

Figura 4.15 – Fluxograma da etapa computacional.



Fonte: autoria própria.

Esta etapa inicia com a leitura dos dados dos ensaios de DP. De forma subsequente, dois algoritmos de localização são aplicados: o algoritmo do centroide ponderado, aqui designado apenas como RSS e o TDOA, utilizado como referência por oferecer alto grau de exatidão e permitir realizar uma avaliação comparativa entre duas abordagens distintas.

Verifica-se que, enquanto o primeiro algoritmo utiliza apenas a informação da amplitude dos sinais de DP, o segundo utiliza o ToA de cada sinal, o que requer um equipamento com taxa de amostragem adequada para não suprimir essa informação e um perfeito sincronismo entre os sensores.

Na aplicação do método TDOA, em primeiro lugar os ToA de cada sinal são determinados a partir da aplicação do algoritmo do AIC, descrito na Subseção 2.4.1 e já avaliado por Silva *et al.* (2020). Em seguida, eles são aplicados às equações (15) a (18). A localização é, por fim, determinada pela aplicação do método de Otimização por Enxame de partículas (PSO, do inglês: *Particle Swarm Optimization*).

Na aplicação do algoritmo RSS, inicialmente os sinais de tensão são convertidos para sinais de potência, utilizando, para tanto, a impedância de entrada da antena. Em seguida, estimam-se as distâncias de cada receptor a partir da aplicação do modelo de propagação apresentado pela Equação 33. Por fim, determinam-se as coordenadas (x,y) da fonte de DP.

## Análise dos Resultados

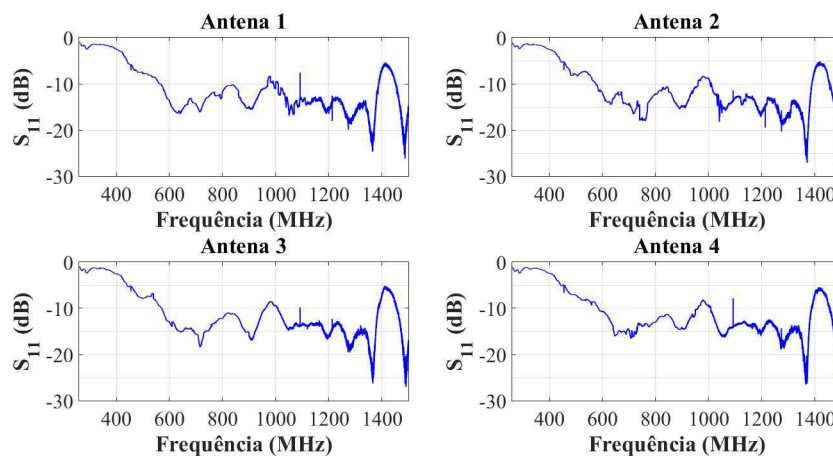
Neste capítulo, apresenta-se a análise dos resultados obtidos nesta dissertação, os quais estão divididos em três Seções. Na primeira delas há uma análise da caracterização das antenas e dos filtros analógicos. Na segunda, há a análise dos resultados de detecção de DP utilizando o circuito de condicionamento e, por fim, na terceira Seção há a apresentação dos resultados de localização.

### 5.1 ANÁLISE DOS COMPONENTES

Para fins de localização, idealmente os componentes aplicados no ensaio devem ter características idênticas. Portanto, há a necessidade de analisar os resultados da caracterização desses componentes, em especial as antenas e os filtros.

Para selecionar a antena a ser utilizada neste trabalho, realizaram-se as medições dos coeficientes de reflexão da antena bioinspirada apresentada na Seção 4.1. Os resultados desse processo de caracterização estão apresentados na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Magnitude dos coeficientes de reflexão ( $S_{11}$ ) medidos para as antenas bioinspiradas.

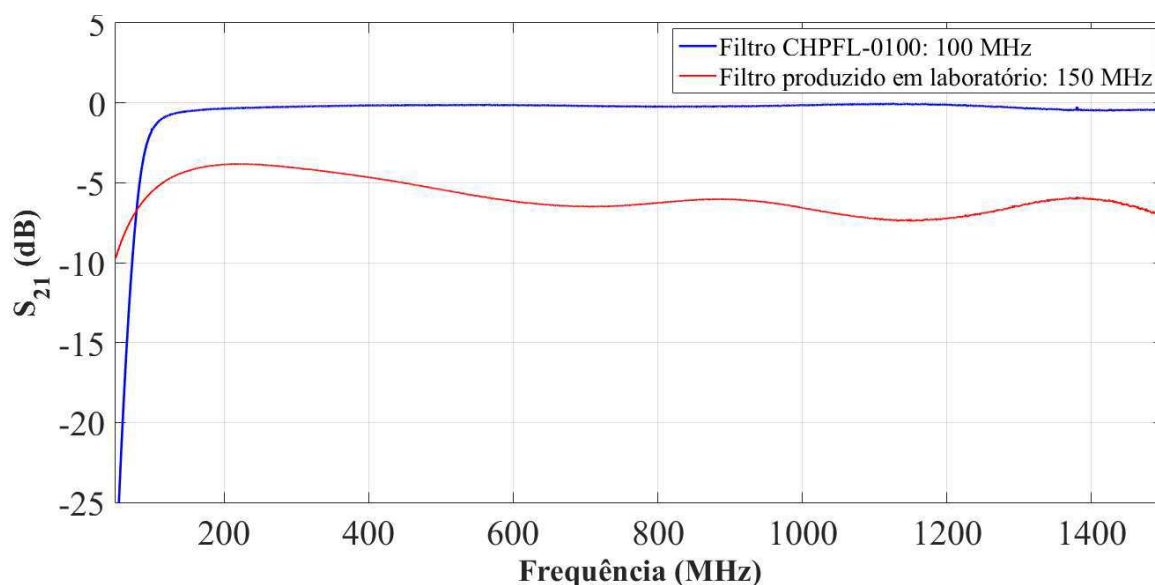


Fonte: autoria própria.

Nota-se que as antenas bioinspiradas apresentaram coeficientes de reflexão similares para a faixa de frequência de interesse, tendo em vista que elas foram fabricadas em uma prototipadora, evitando erros causados pelo fator humano. Portanto, as antenas se mostraram adequadas para os propósitos de localização.

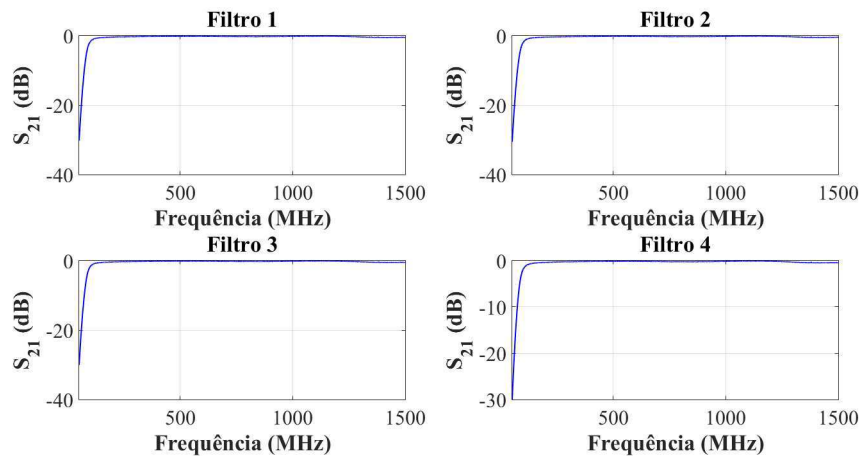
Quanto aos FPA, além de serem idênticos, é desejável que eles apresentem a menor perda possível na faixa de frequência de interesse. Para tanto, realizou-se uma análise comparativa da perda de transmissão ( $S_{21}$ ) de dois filtros passivos: o primeiro deles fabricado em laboratório com frequência de corte 150 MHz e, o segundo, o filtro comercial CHPFL-0100 com frequência de corte 100 MHz, resposta Butterworth e grau 7, conforme mostrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Magnitude dos coeficientes de transmissão ( $S_{21}$ ) de dois FPA passivos distintos.



Fonte: autoria própria.

Nota-se na Figura 5.2, que o filtro produzido em laboratório apresentou valores de  $S_{21}$  inferiores a -3 dB. Esse resultado é bastante significativo, tendo em vista que o sinal a ser filtrado é da ordem de  $mV$ . O Filtro CHPFL-0100, por outro lado, apresentou uma perda muito pequena, próxima a 0 dB e, portanto, foi selecionado para os ensaios de localização. Na Figura 5.3 são mostrados os gráficos  $S_{21}$  para os 4 filtros.

Figura 5.3 – Magnitude dos coeficientes de transmissão ( $S_{21}$ ) de quatro FPA CHPFL-0100.

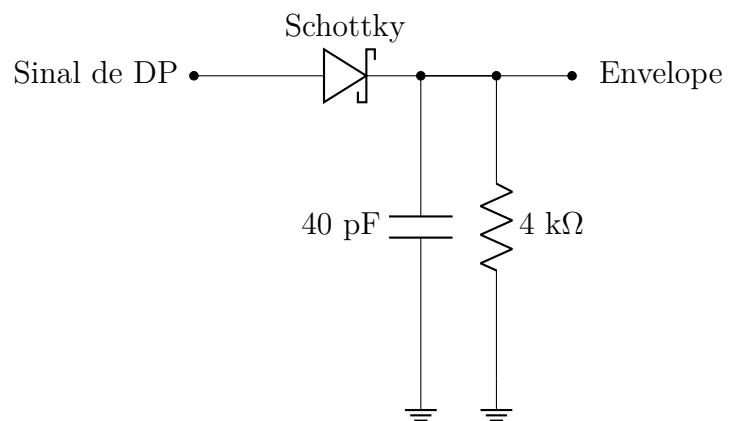
Fonte: autoria própria.

Conforme apresentado na Figura 5.3, os 4 filtros apresentaram coeficientes  $S_{21}$  similares e, portanto, são adequados para os ensaios de localização.

## 5.2 DETECÇÃO

A análise do circuito responsável pela detecção do envelope iniciou com a simulação no *software* LTspice®. Para tanto, foi utilizada a configuração básica de um circuito detector de envelope, ou seja, um diodo, um capacitor e um resistor, conforme é apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Circuito detector de envoltória.



Fonte: autoria própria.

O dimensionamento dos componentes considerou a constante de tempo RC resultante do Algoritmo 1 e ajustes realizados na própria simulação para garantir o bom desempenho do sistema. Para os sinais de DP referentes à barra do hidrogenador, aplicou-se um capacitor de 40 pF e um resistor de 4 kΩ. A largura de banda resultante

dessa combinação foi adotada como característica limite para a escolha do detector de envelope comercial.

De forma subsequente foi realizada a simulação de alguns tipos de diodo, de maneira a determinar o componente mais adequado ao propósito deste trabalho. Para tanto, utilizou-se como referência um sinal de DP com tensão de pico ( $V_p$ ) corresponde a 133,90 mV. Nesta análise os modelos de diodo Schottky foram os únicos capazes de gerar adequadamente a envoltória dos sinais. Os resultados dessa análise para alguns modelos de diodo disponíveis comercialmente são apresentados na Tabela 2.3.

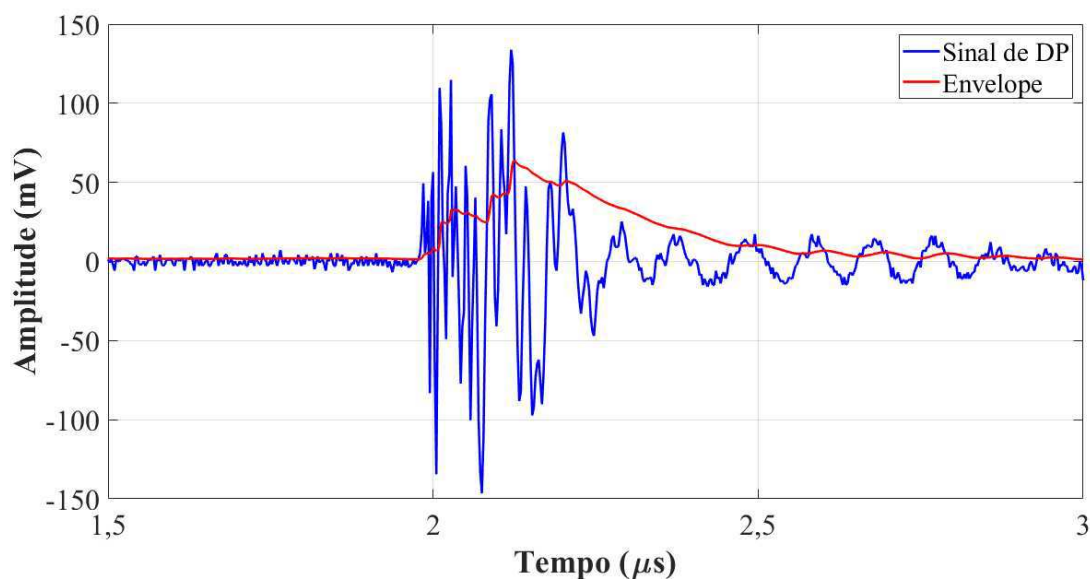
Tabela 2.3 – Comparação dos diodos.

Diodo	$V_j(V)$	$C_j(pF)$	$R_s(\Omega)$	$V_p(mV)$
SMS 7630	0,34	0,14	20	63,50
HSMS 2850	0,35	0,18	25	63,20
SMS 1546	0,51	0,38	4	16,72
SMS 7621	0,51	0,10	12	3,25

Fonte: autoria própria.

Nota-se na Tabela 2.3, que o circuito com o diodo SMS 7630 resultou em uma maior  $V_p$ , uma vez que ele apresenta a menor tensão de junção ( $V_j$ ) dentre esses modelos e se trata do parâmetro mais significativo para essa aplicação (GONÇALVES, 2016). Destaca-se, no entanto, que mesmo neste caso houve uma queda na tensão  $V_p$  de 50%. Na Figura 5.5 é apresentado o sinal na saída do circuito simulado no LTSpice®.

Figura 5.5 – Resultado da simulação para o diodo SMS 7630 para um sinal de entrada proveniente da barra de um hidrogerador.



Fonte: autoria própria.

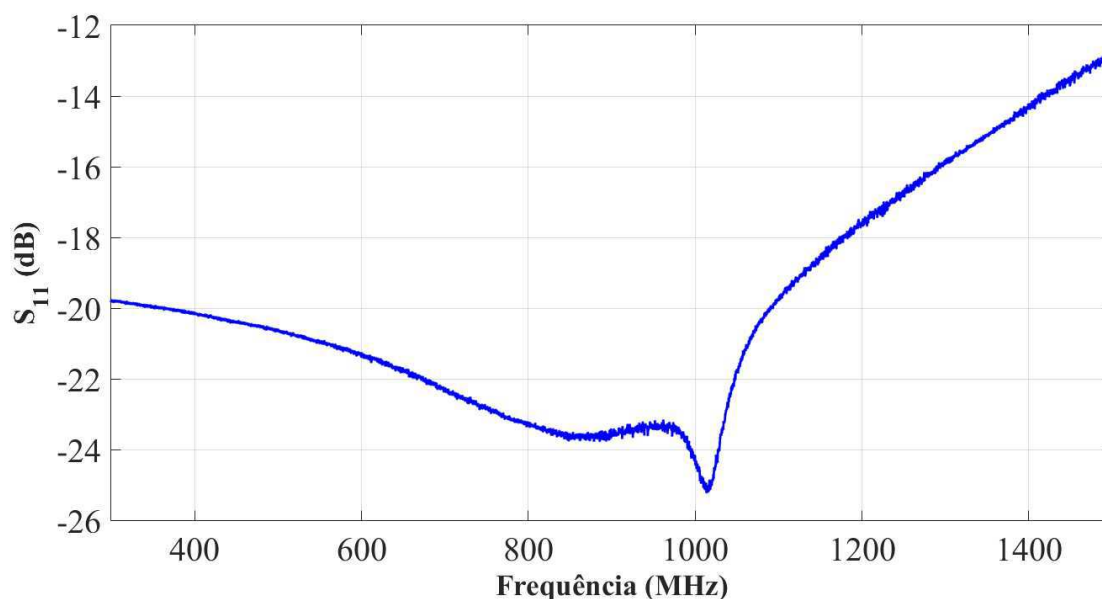
Na Figura 5.5 é evidenciado que há uma queda significativa na amplitude do envelope de DP, portanto, há uma implicação direta na energia do sinal de saída. Verifica-se que, enquanto o sinal original de DP possui 19,58  $pJ$ , o envelope possui apenas 3,88  $pJ$ .

Essa constatação é relevante, tendo em vista que alguns sinais radiométricos de DP podem apresentar amplitudes muito pequenas, na ordem de algumas dezenas de mV, tornando a detecção mais difícil. Assim, evidencia-se a necessidade de incluir no sistema de medição uma etapa de amplificação, bem como a aplicação de componentes eletrônicos mais eficientes, como, por exemplo, a utilização de um filtro passivo com baixa atenuação na faixa de interesse.

### 5.2.1 Aplicação do ADL5511

Após os resultados preliminares fornecidos pelas simulações, houve a análise da eficácia do circuito comercial ADL5511. Inicialmente, analisou-se o gráfico da magnitude dos coeficientes de reflexão  $S_{11}$  para a faixa de operação da antena, após o processo de caracterização utilizando o NanoVNA, apresentado na Figura 5.6.

Figura 5.6 –  $S_{11}$  do circuito ADL5511.

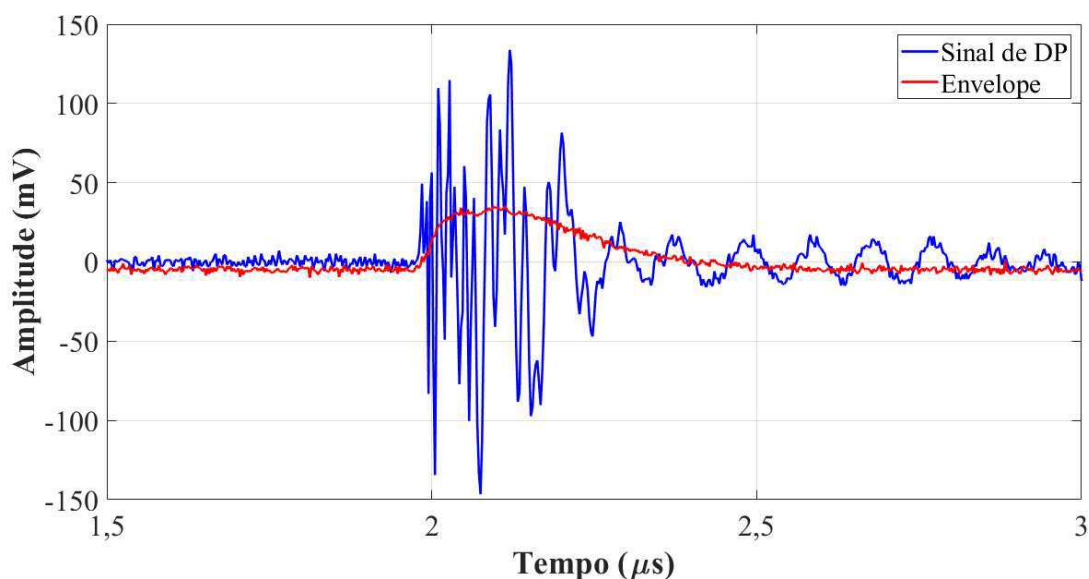


Fonte: autoria própria.

Observa-se que o circuito apresentou coeficientes de reflexão ( $S_{11}$ ) abaixo de -10 dB em toda a faixa de operação da antena, mostrando-se adequado para a detecção das DP. O resultado da aplicação desse circuito nos ensaios de DP realizados com a barra de um hidrogerador e com o TP de 36 kV são apresentados nas Figuras 5.7 a 5.8.

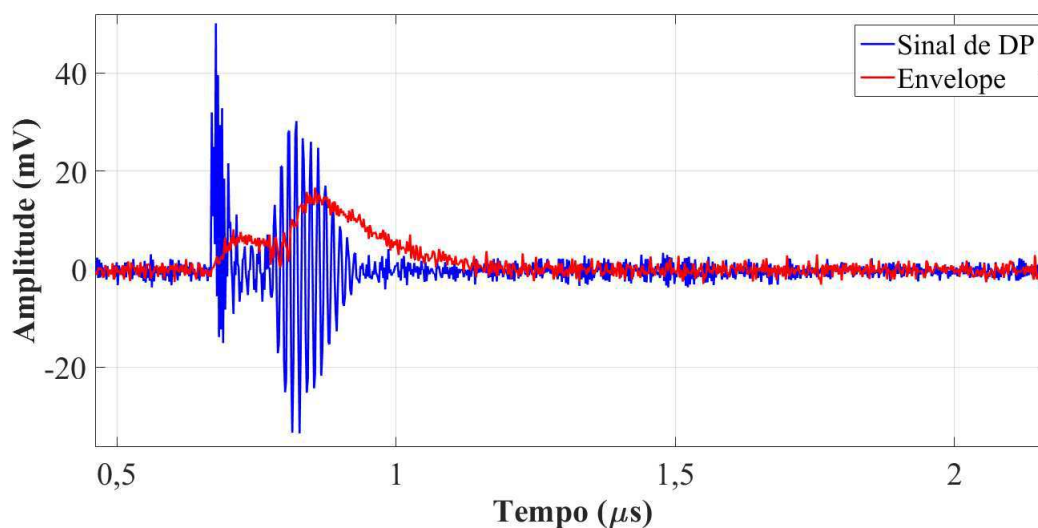


Figura 5.7 – Envelope resultante da barra do hidrogerador.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.8 – Envelope resultante do TP de 36 kV.

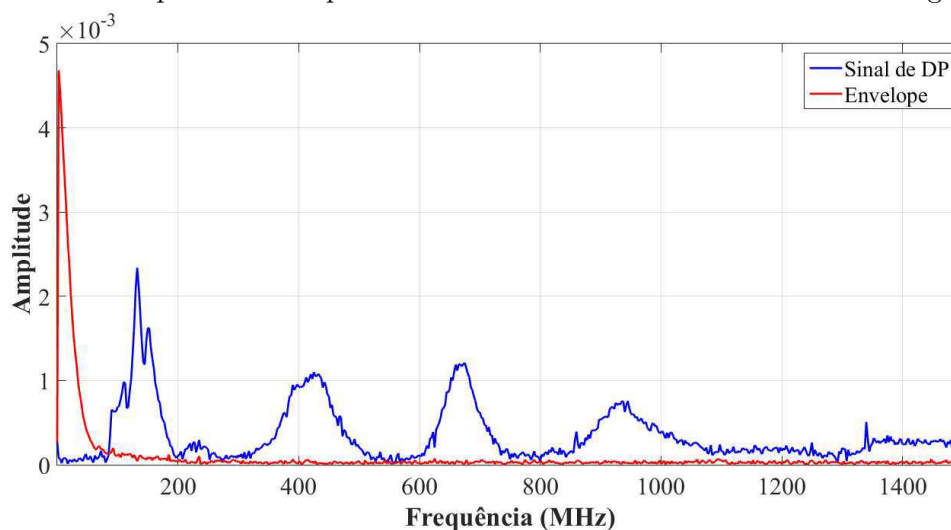


Fonte: autoria própria.

A partir da análise dos sinais apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8, nota-se que os sinais medidos na saída do ADL5511 seguem a envoltória do sinal original. No entanto, nota-se um pequeno atraso em ambos os casos. Este atraso é previsto pela folha de dados do dispositivo e mostra que neste tipo de abordagem não há coerência de fase, o que pode ser relevante para algumas aplicações, como, por exemplo, a localização baseada no método clássico.

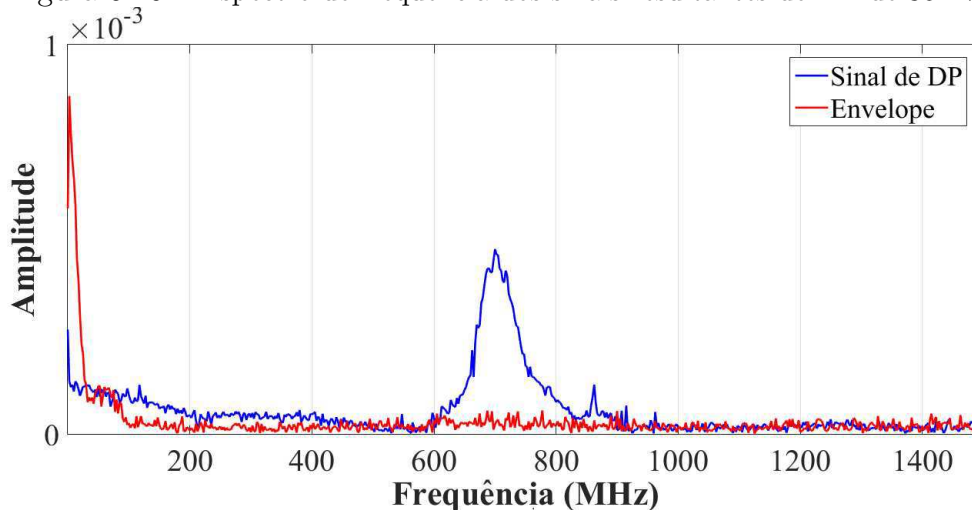
A diferença entre a frequência dos sinais originais e dos envelopes pode ser mais facilmente observada ao se aplicar a FFT, conforme mostrado nas Figuras 5.9 e 5.10.

Figura 5.9 – Espectro de frequência dos sinais resultantes da barra do hidrogerador.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.10 – Espectro de frequência dos sinais resultantes do TP de 36 kV.



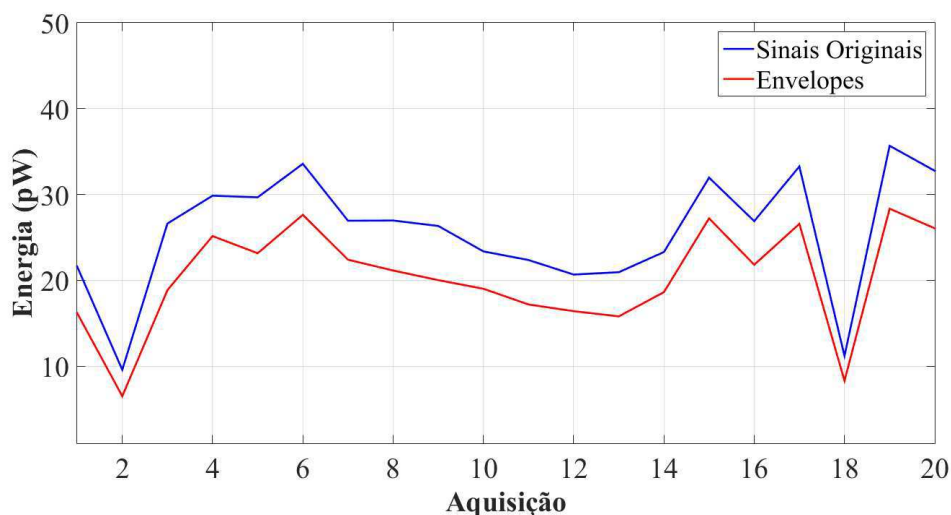
Fonte: autoria própria.

Nota-se na Figura 5.9, que o sinal referente à barra do hidrogerador apresentou componentes significativas em frequências de até 1 GHz. Para o TP de 36 kV, apresentado na Figura 5.10, há componentes significativas em frequências de até 800 MHz. Por outro lado, os envelopes são formados majoritariamente por componentes de frequência inferiores a 100 MHz para ambos os casos.

Quanto às perdas de potência inerentes ao processo de detecção, observou-se que o sinal referente à barra do hidrogerador possui uma energia de  $19,58 \text{ pJ}$ , enquanto o envelope apenas  $6,34 \text{ pJ}$ , ou seja, o envelope preservou 32% da energia. No entanto, ao comparar as curvas de evolução da energia dos sinais originais e dos envelopes resultantes ao longo de um ciclo de 20 medições, conforme ilustrado nas Figuras 5.11 e 5.12, constatou-se que

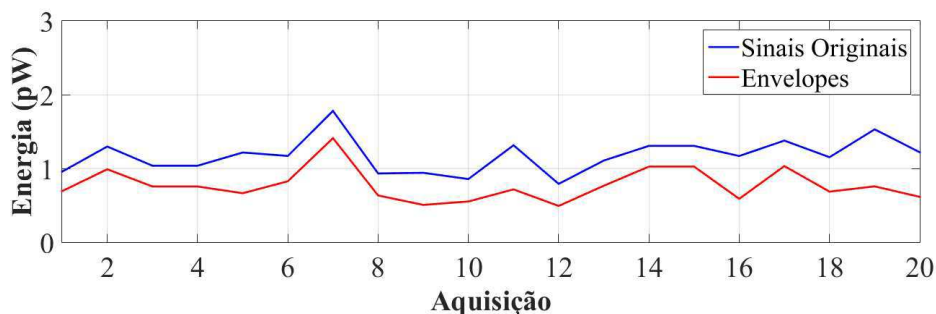
ambos apresentaram curvas de evolução similares. Portanto, monitorar a atividade de DP utilizando apenas o envelope é algo factível.

Figura 5.11 – Curva de evolução da energia referente a barra do hidrogerador.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.12 – Curva de evolução da energia referente ao TP de 36 kV.



Fonte: autoria própria.

Ao associar as curvas apresentadas nas Figuras 5.9 e 5.11 é possível afirmar que a curva de evolução realizada a partir dos envelopes exige uma menor taxa de amostragem em comparação aos sinais originais, portanto, é possível realizar uma análise confiável com menos amostras.

### 5.3 LOCALIZAÇÃO

A análise dos resultados de localização está dividida em 3 subseções. Na primeira é apresentada uma análise do decaimento de potência do sinal com a distância entre a fonte e a antena. Na segunda há a apresentação dos resultados de localização referentes aos ensaios realizados com uma fonte controlada. Na terceira, há a apresentação dos resultados de localização em ensaios realizados no LAT.

### 5.3.1 Prova de Princípio

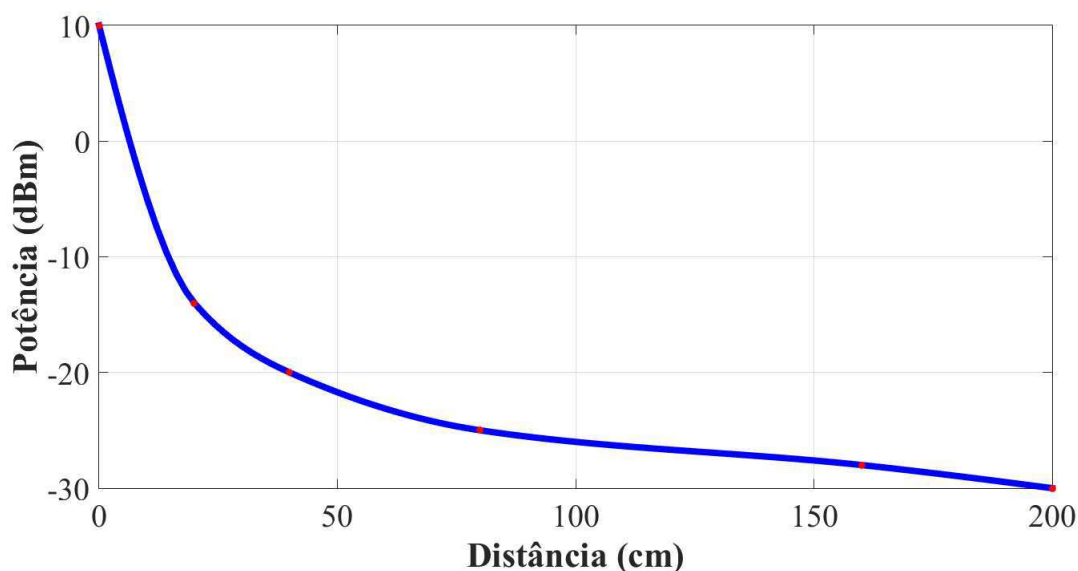
Como ponto de partida, calcularam-se os parâmetros de referência discutidos na Seção 2, ou seja, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a distância em que a antena irá operar na região de campo distante (R), conforme as Equações (42) - (43).

$$\lambda = \frac{300 \cdot 10^6}{992 \cdot 10^6} \rightarrow \lambda = 30 \text{ cm.} \quad (42)$$

$$R \geq \frac{2 \cdot (0,2)^2}{0,3} \rightarrow R \geq 26 \text{ cm.} \quad (43)$$

Esses resultados podem ser facilmente analisados a partir do gráfico apresentado na Figura 5.13.

Figura 5.13 – Curva de decaimento da potência (dBm) pela distância (cm).



Fonte: autoria própria.

Nota-se, portanto, que a intensidade do sinal decai gradativamente a partir da distância  $R$ , calculada pela Equação (43). Para Beura, Beltle e Tenbohlen (2019), essa tendência de decaimento também será válida para ambientes com maiores reflexões, como o interior de transformadores de potência, por exemplo.

### 5.3.2 Testes de Localização com Fonte Controlada

Os resultados estimados pelo algoritmo RSS para os testes realizados com uma fonte controlada são apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 – Resultados de localização para o arranjo 1.

Coord. de Referência		Coord. Estimadas		Erro(m)
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	
1,50	1,50	1,36	1,39	0,18
0,50	1,50	0,65	1,41	0,17
0,50	0,50	0,84	0,34	0,38
1,50	0,50	1,64	0,64	0,20

Fonte: autoria própria.

Tabela 3.5 – Resultados de localização para o arranjo 2.

Coord. de Referência		Coord. Estimadas		Erro(m)
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	
3,5	0,0	3,4	1,0	1,00
5,0	4,0	4,7	3,0	1,00

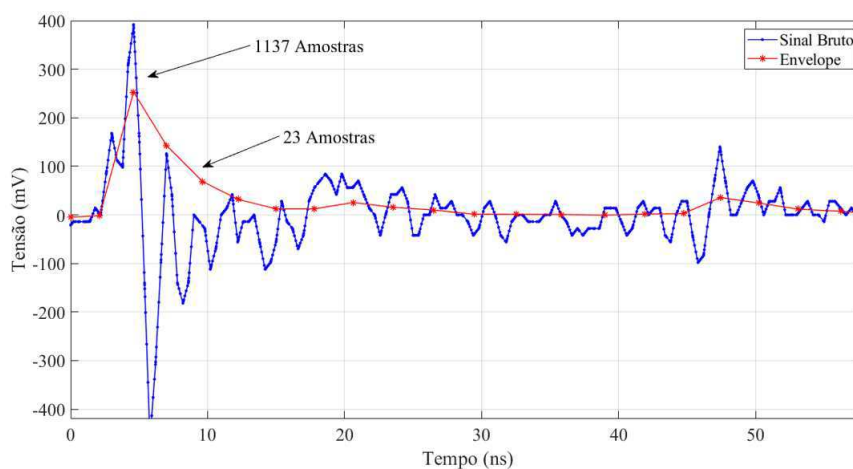
Fonte: autoria própria.

Nota-se que o algoritmo de localização estimou as coordenadas da antena transmissora com pequenos erros, da ordem de cm. No entanto, para o arranjo 2, em que as dimensões são maiores e há a presença de muitos obstáculos entre a fonte e a antena, o erro aumentou. Esse resultado é esperado, tendo em vista que a exatidão do RSS é inversamente proporcional ao tamanho do arranjo (KHAN, 2018).

### 5.3.3 Arranjo Experimental 1

Conforme já mencionado na subseção 4.5.1, na etapa computacional associada a este arranjo houve a simulação dos envelopes dos sinais medidos no *software* LTspice®, como é mostrado na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Envelope simulado do sinal de entrada.

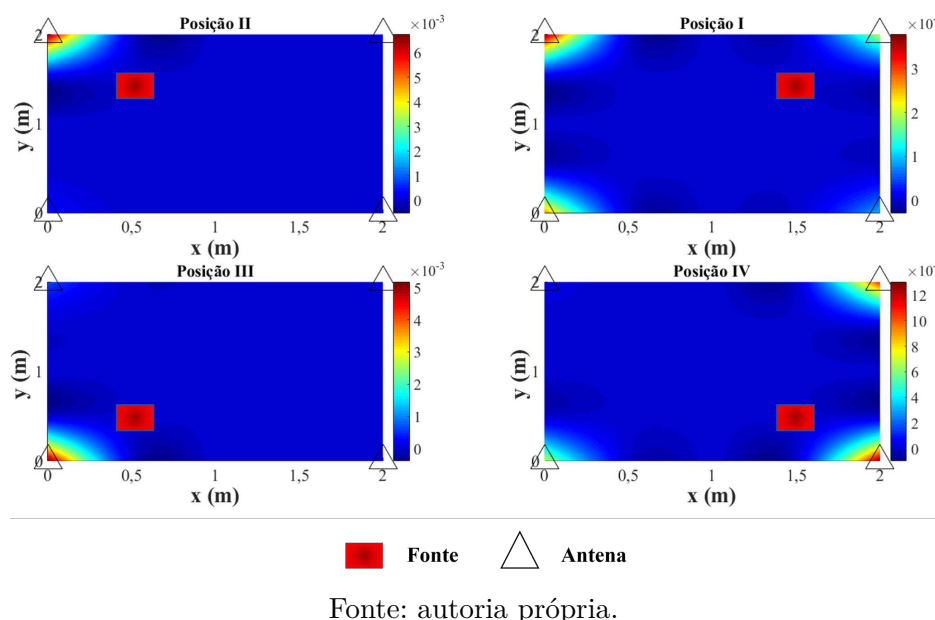


Fonte: autoria própria.

Constatou-se que a envoltória do sinal de DP exigiu um número muito menor de amostras para detectar a informação de interesse, neste caso, a potência.

Ao calcular a potência recebida por cada antena, para cada uma das coordenadas em que o objeto sob teste foi posicionado, foi possível criar um mapa de calor mostrando a proporção da potência recebida por cada sensor, conforme é mostrado na Figura 5.15,

Figura 5.15 – Mapa de calor referente ao arranjo experimental 1.



A partir do mapa de calor já é possível verificar a região em que o equipamento se encontra, bem como, supor se haverá uma boa exatidão na localização. Nota-se, por exemplo, que para a posição de defeito I, a antena mais próxima detectou sinais com menor potência que outras duas, logo, a exatidão será afetada.

Ao aplicar os algoritmos de localização, obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 5.16 a 5.19 e na Tabela 3.6.

Figura 5.16 – Localização estimada: posição I.

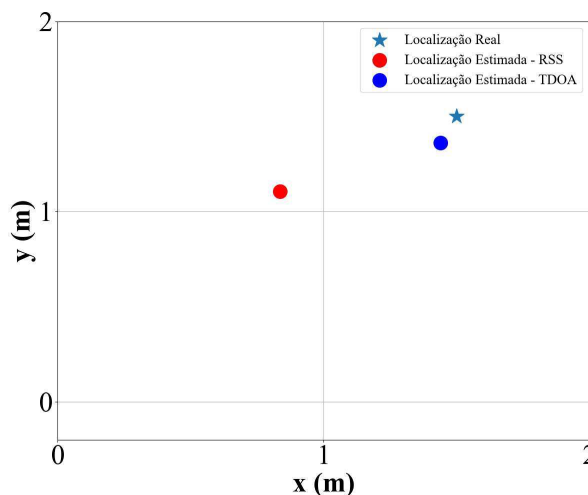
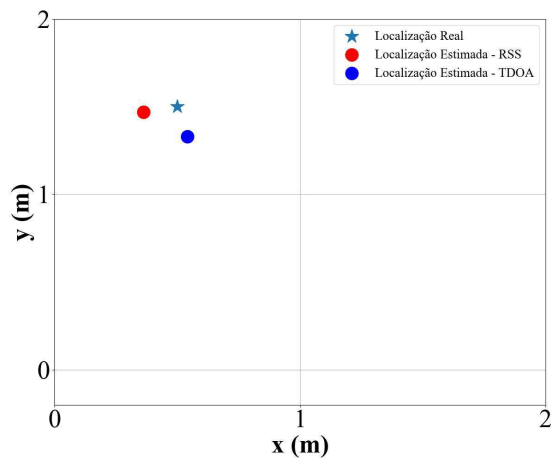
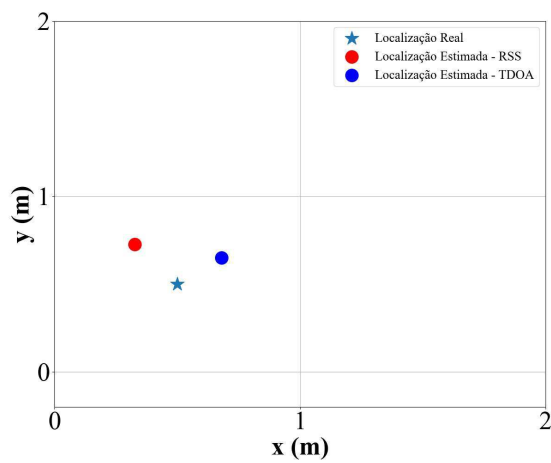


Figura 5.17 – Localização estimada: posição II.



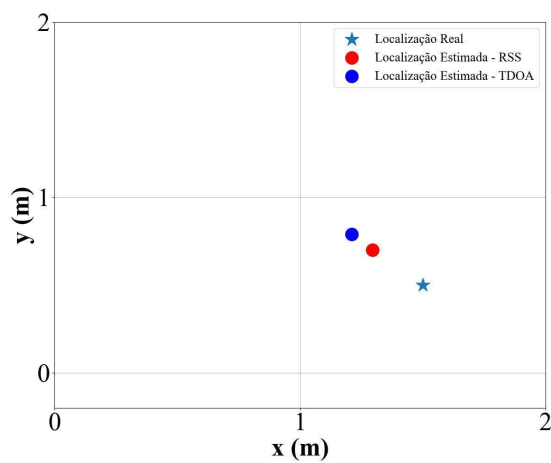
Fonte: autoria própria.

Figura 5.18 – Localização estimada: posição III.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.19 – Localização Estimada: posição IV.



Fonte: autoria própria.

Tabela 3.6 – Resultados de localização.

Localização Real		Localização Estimada - TDOA			Localização Estimada - RSS		
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	Erro (m)	x (m)	y (m)	Erro(m)
1,5	1,5	1,44	1,36	0,15	0,84	1,11	0,77
0,5	1,5	0,54	1,33	0,17	0,36	1,47	0,14
0,5	0,5	0,68	0,65	0,23	0,33	0,73	0,29
1,5	0,5	1,21	0,79	0,41	1,29	0,70	0,29

Fonte: autoria própria.

Nota-se, na Tabela 3.6, que o algoritmo RSS resultou em coordenadas muito próximas aos valores de referência, assim como o TDOA. Esse último, em geral, resulta em uma localização com elevado grau de exatidão.

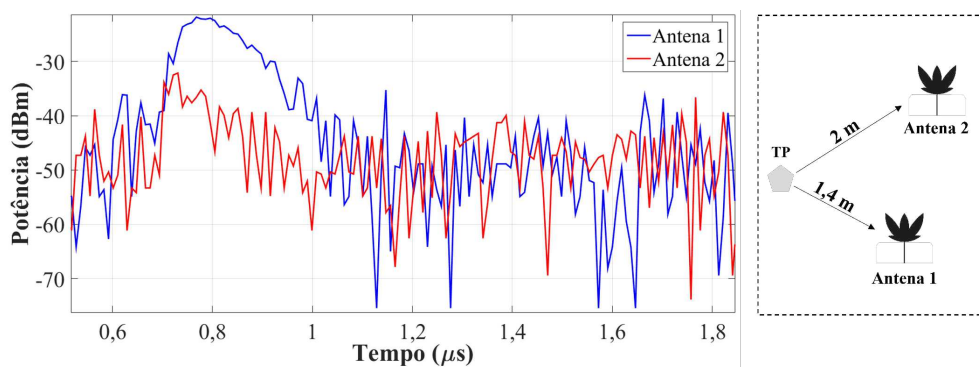
Por outro lado, o algoritmo RSS resultou em coordenadas discrepantes para a posição I, na qual o sensor mais próximo à fonte captou menos energia que os demais, causando um deslocamento nas coordenadas estimadas, uma vez que ele opera conforme a proporção de potência entre os sensores. O TDOA, em contrapartida, não sofreu nenhuma influência do resultado dessa propagação, tendo em vista que o princípio de Fermat garante que a primeira frente de onda percorre o caminho mais curto entre o defeito e o sensor, sofrendo um atraso de propagação mínimo.

Essa observação é importante, uma vez que a maior parte dos trabalhos relacionados utilizaram como fonte uma antena omnidirecional, semelhante a utilizada nos testes preliminares deste trabalho, a qual foi insuficiente para avaliar problemas de propagação causados pela própria fonte emissora. Assim, há a necessidade de testes com diferentes equipamentos, de forma a investigar essa hipótese e, então, propor alternativas para mitigar esse problema, como a utilização de mais sensores, por exemplo.

### 5.3.4 Arranjo Experimental 2

Os resultados dos ensaios correspondentes ao arranjo 2 estão resumidos na Figura 5.20.

Figura 5.20 – Sinais de DP captados em diferentes distâncias.



Fonte: autoria própria.

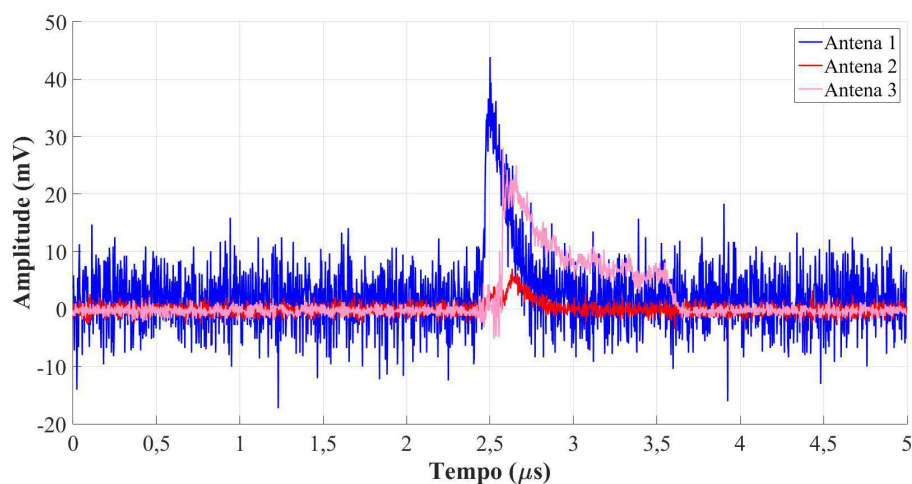


Nota-se, na Figura 5.20, que o sinal DP referente à antena 1 possui uma intensidade, em dBm, maior que a do sinal recebido pela antena 2. Tal resultado comprova que é possível realizar a localização de equipamentos elétricos durante a ocorrência de DP, baseando-se apenas na amplitude dos sinais obtidos por meio de detectores de envelope analógicos.

### 5.3.5 Arranjo Experimental 3

Seguindo a disposição das antenas apresentada na Tabela 2.3, realizaram-se ensaios para três configurações distintas. Na Figura 5.21 são apresentados os sinais adquiridos para a posição 3.

Figura 5.21 – Sinais adquiridos pelas três antenas para a posição 3.



Fonte: autoria própria.

Observa-se na Figura 5.21 uma clara diferença entre a amplitude dos sinais captados por cada antena, tendo em vista que cada uma delas está posicionada em pontos distintos do arranjo, sendo assim, a distância à fonte é diferente.

Para verificar o resultado de localização, aplicaram-se os algoritmos de localização nos sinais medidos para as posições 1 a 3. Os erros de localização calculados para os centroides resultantes de cada algoritmo podem ser observados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Resultados de localização para as posições 1, 2 e 3.

Posição	Erro (m) - TDOA	Erro (m) - RSS
1	1,42	0,49
2	1,58	0,52
3	1,73	0,53

Fonte: autoria própria.

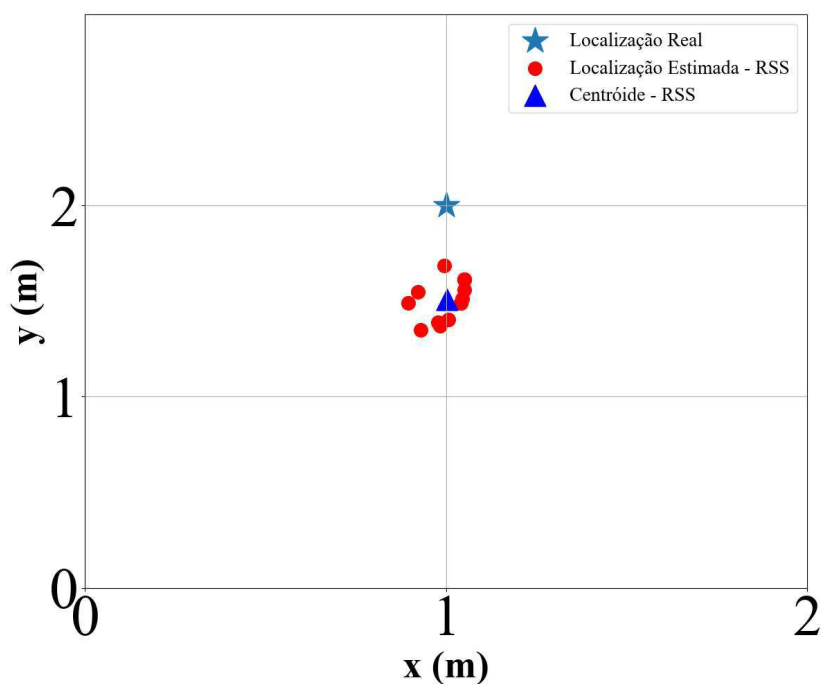
Conforme é possível observar na Tabela 3.7, o método TDOA apresentou resultados distantes da posição real, o que pode ser atribuído ao pequeno número de antenas, tendo em

vista que foram utilizadas apenas 3; ao nível de ruído presente no momento do experimento, o que pode levar a determinação incorreta do ToA de cada sinal e, por fim, aos diferentes atrasos que os circuitos comerciais podem adicionar aos sinais, dada a sensibilidade dos componentes, o que pode provocar diferenças significativas na localização, um fato que não pode ser avaliado no caso em que a envoltória foi simulada.

No que concerne aos resultados referentes ao algoritmo RSS, a localização estimada se aproximou da posição real do TP para todas as posições avaliadas, com um erro de 49 cm para a posição 1, apresentada na Figura 5.22, 52 cm para posição 2, mostrada na Figura 5.23 e 53 cm para a posição 3, apresentada na Figura 5.24.

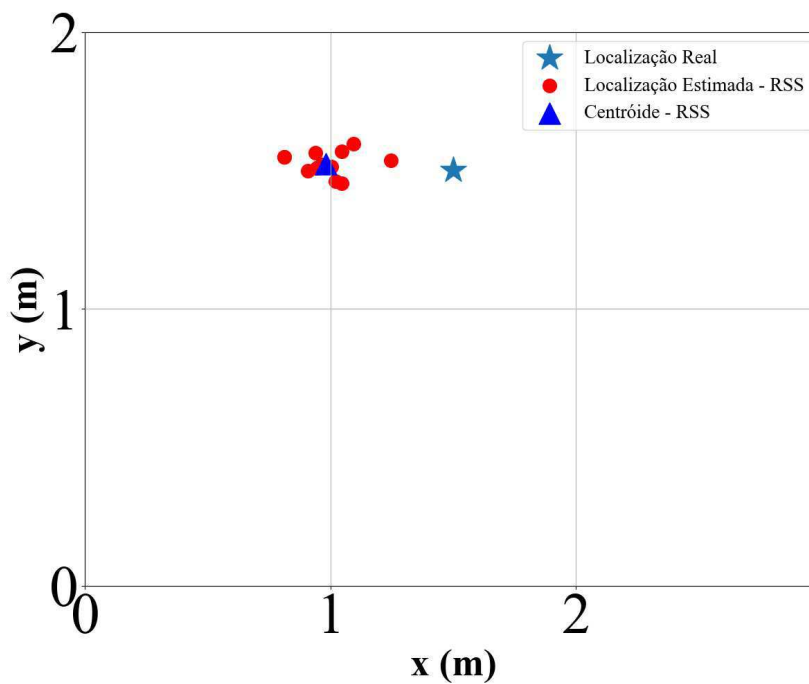
A análise minuciosa do estado da arte revelou que para um arranjo dimensional de 12 x 9 metros quadrados e a aplicação de cinco antenas, o erro de localização foi de 5,94 metros (SOUZA NETO, 2014). Para uma área com dimensões de 18 x 18 metros quadrados e a aplicação de seis antenas, o erro de localização foi de 4,5 metros (UPTON *et al.*, 2021) e, para um arranjo dimensional de 18 x 18 metros quadrados e a aplicação de oito antenas, o erro de localização foi de 1,90 metros (UPTON *et al.*, 2018). Portanto, diante da quantidade limitada de antenas aplicadas ao arranjo 3 deste trabalho, o erro de 53 cm pode ser considerado satisfatório, mesmo ao se considerar as pequenas dimensões desse arranjo.

Figura 5.22 – Localização estimada - posição 1.



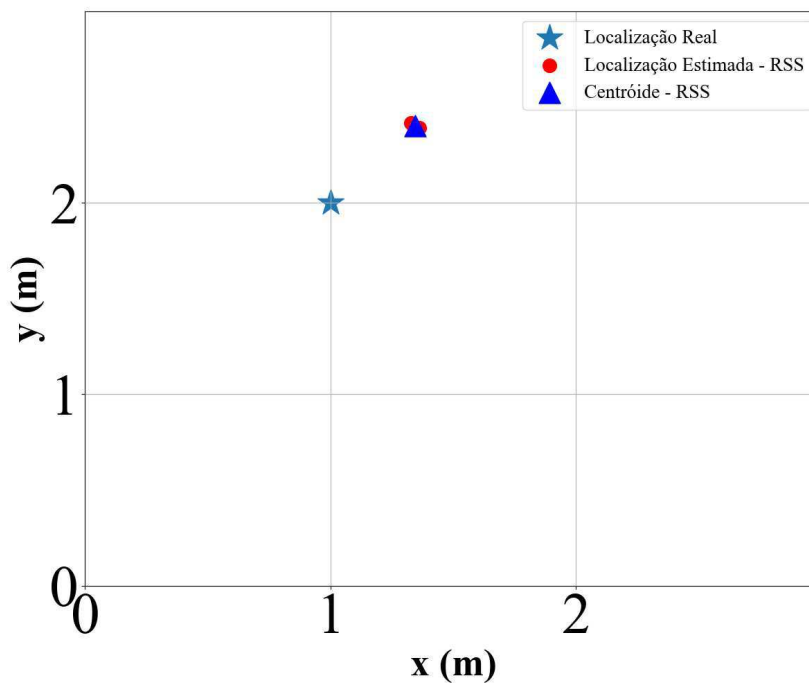
Fonte: autoria própria.

Figura 5.23 – Localização estimada - posição 2.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.24 – Localização estimada - posição 3.



Fonte: autoria própria.

Vale destacar, que esses erros de localização também podem ser atribuídos à sensibilidade dos detectores ADL5511, uma vez que os circuitos não são idênticos e, aos efeitos das reflexões e refrações, conforme foi evidenciado pelos resultados referentes ao

arranjo experimental 2 com a fonte controlada. No entanto, mesmo para esse número limitado de antenas, o algoritmo baseado em RSS se mostrou eficaz, tendo em vista que a sua acurácia depende principalmente da proporção da potência recebida pelas antenas.

Tais resultados demonstram a viabilidade dessa abordagem para localizar fontes de DP sem a necessidade de um perfeito sincronismo entre as antenas. Assim, sugerem-se análises adicionais para avaliar a robustez dessa metodologia em cenários mais críticos, com um maior número de antenas, arranjos experimentais com maiores dimensões, em diferentes ambientes, bem como, com a inclusão de obstáculos metálicos entre as antenas e a fonte de DP.

---

## Conclusões e Trabalhos para o Futuro

Neste trabalho foi apresentada uma avaliação de envelopes radiométricos na detecção e na localização de fontes de DP.

Na etapa de simulação do circuito detector de envelope, constatou-se que o diodo Schottky se trata do componente mais adequado para essa aplicação, tendo em vista a sua baixa tensão de junção em comparação a outros tipos de diodo. Nessa etapa também houve a determinação da largura de banda mínima desejável para a especificação do circuito comercial, neste caso, a placa de sensoriamento ADL5511.

Na aplicação do ADL5511 nos ensaios de DP, verificou-se que esse circuito foi capaz de realizar a detecção analógica do envelope dos sinais de DP, mantendo parte da energia do sinal original. Além disso, os resultados apresentados mostraram que a informação contida na envoltória está concentrada em bandas de frequência consideravelmente inferiores às dos sinais originais.

Adicionalmente, observou-se que a energia presente nos envelopes foi suficiente para gerar uma curva de evolução similar à gerada pelos sinais originais. Portanto, trata-se de uma alternativa promissora para reduzir os custos associados a um sistema de instrumentação aplicável ao monitoramento de DP.

Constatou-se também que o ADL5511 causou um atraso nos sinais de saída, resultando em deslocamentos de fase e do ToA, o que já era esperado, tendo em vista que se trata de uma detecção não coerente. Tal constatação pode ser relevante em aplicações mais específicas, contudo, não é um obstáculo ao propósito central desta pesquisa.

As respeito da localização de fontes de DP utilizando os envelopes dos sinais radiométricos, constatou-se que os métodos RSS e TDOA tiveram um desempenho semelhante quando se utilizaram envelopes simulados. Vale destacar, que o método TDOA é mais robusto aos efeitos das reflexões e refrações que o método RSS. Por outro lado, dada a sensibilidade dos componentes eletrônicos, a resposta do método TDOA foi comprometida quando se utilizaram sinais detectados com a aplicação dos circuitos ADL5511.

A respeito da localização baseada no método RSS, comprovou-se que é possível utilizar essa abordagem para localizar fontes de DP utilizando apenas os envelopes dos sinais de DP, dada a exatidão dos resultados apresentados para cada arranjo experimental utilizado neste trabalho.

No entanto, o mapa de calor referente a um dos ensaios realizados no arranjo experimental 1 mostrou que houve uma distribuição irregular de potência entre os sensores. Tal resultado sugere que irradiação de algumas fontes de DP pode não ser omnidirecional, acarretando erros de localização na aplicação desse método.

## 6.1 PUBLICAÇÕES

A divulgação dos resultados obtidos nesta pesquisa foi realizada a partir da publicação de artigos em eventos científicos internacionais, conforme apresentado a seguir.

1. **Silva, A. D. C.**; Freire, R. C. S.; Nobrega, L. A. M. M.; Carvalho, I. F., Xavier, G. V. R.; Costa, E. G.; de Melo, J. V. J. **Location of Partial Discharges Sources Using Radiometric Signal Envelopes**. 23rd International Symposium on High Voltage Engineering, Glasgow: 2023 (Aceito para Publicação).
2. Carvalho, I. F.; Silva Júnior, A. C.; Nobrega, L. A. M. M.; Costa, E. G.; **Silva, A. D. C.**; Lira, George R. S.; Marotti, Ana C. F.; Costa, André I., Souza; João P. A. (2023). **PRPD Analysis in Current Transformers Using UHF Sensors and Signal Conditioning System**. In: 23rd International Symposium on High Voltage Engineering, Glasgow: 2023 (Aceito para Publicação).
3. **Silva, A. D. C.**; Freire, R. C. S.; Nobrega, L. A. M. M.; Carvalho, I. F.; Xavier, G. V. R.; Silva, H. D.; Souza, A. S. **Evaluation of Envelope Detection for Radiometric Measurements of Partial Discharges in Instrument Transformers**. In: International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits, and Transducers, Rio de Janeiro: 2023 (Aceito para Publicação).
4. **Silva, A. D. C.**; Freire, R. C. S.; Nobrega, L. A. M. M.; Xavier, G. V. R.; Carvalho, I. F.; Cardoso, I. S. **Evaluation of Envelope Detection for Partial Discharge Source Localization**. In: International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits, and Transducers, Rio de Janeiro: 2023 (Aceito para Publicação).

## 6.2 TRABALHOS PARA O FUTURO

Como continuação da pesquisa desenvolvida nesta dissertação, propõe-se:

- **Aprimoramento dos arranjos experimentais:** Apesar dos bons resultados providos pelos ensaios realizados neste trabalho, a aplicação dessa abordagem em

campo carece de ensaios com diferentes níveis de ruído, maior distanciamento entre as antenas e a inclusão de obstáculos metálicos para avaliar os erros de localização.

- **Realização de campanhas de medição em subestações abertas:** A realização de medições em subestações pode validar o uso dessa abordagem para localizar equipamentos elétricos defeituosos.
- **Desenvolver um sistema de monitoramento autônomo:** O monitoramento dos equipamentos elétricos requer as etapas de detecção, localização e classificação de DP. Neste trabalho os resultados apontaram que é possível detectar e localizar DP utilizando apenas os envelopes dos sinais radiométricos. Portanto, faz-se necessário desenvolver o sistema de transmissão, de forma a eliminar a necessidade de cabos de comunicação, fornecendo um isolamento galvânico entre o equipamento monitorado e a unidade de processamento, assim, viabilizando o monitoramento remoto.
- **Investigar a possibilidade de calibração do método radiométrico:** Um dos grandes desafios que ainda tornam o método radiométrico dependente de outros métodos de medição é a ausência de calibração. Portanto, há a necessidade de investigar a associação entre a carga aparente, em pC e, a tensão, em mV, das envoltórias dos sinais radiométricos.

---

## REFERÊNCIAS

- AMERICA, I. C. A. L. **Guia básico para implantação da gestão de ativos em empresas de energia**. [S.l.: s.n.], 2012.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory - Analysis and Design**. New Jersey: [s.n.], 2005.
- BANSAL, R. The far-field: How far is far enough? **applied microwave and wireless**, p. 58–60, 1999.
- BARTNIKAS, R. **Electrical Insulating Liquids**. USA: [s.n.], 1991. v. 3. 468 p.
- BEURA, C. P.; BELTLE, M.; TENBOHLEN, S. Attenuation of uhf signals in a 420 kv power transformer based on experiments and simulation. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- CHEN, Q. *et al.* The uhf method for measurement of partial discharge in oil-impregnated insulation. In: **Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 451–454.
- CIGRE. **Avaliação do Desempenho de Transformadores de Potência e Reatores no Sistema**. [S.l.: s.n.], 2013. Grupo de Trabalho GT A2-02 - Brochura técnica.
- CIGRE. **On-line monitoring of paper-oil insulated current transformers**. [S.l.: s.n.], 2020. Grupo de Trabalho GT A3-210 - Brochura técnica.
- DHARA, S.; KOLEY, C.; CHAKRAVORTI, S. Uhf sensors based localization of partial discharge sources in air-insulated electrical substation using tdoa and relative rss information. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 1–9, 2023.
- DHARMADHIKARI, V.; PUSALKAR, N.; GHARE, P. Path loss exponent estimation for wireless sensor node positioning: Practical approach. In: **2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.
- DIONISIO, I. C. O. **Desempenho de um Sistema Multiportadora de Baixa Complexidade**. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000.



- DUARTE, R. M. **Localização de Fontes de Descargas Parciais Baseada em Métodos Radiométricos**. 77 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- FEILAT, E. Detection of voltage envelope using prony analysis-hilbert transform method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 4, p. 2091–2093, 2006.
- GERLACH, T. *et al.* A real-time energy monitoring system for an mri hybrid ablation system. In: **2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine Biology Society (EMBC)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 5016–5020.
- GONZALES, C. *et al.* Localização eficiente de descargas parciais em transformadores de transmissão usando sistemas inteligentes. In: . [S.l.: s.n.], 2013.
- GONÇALVES, C. B. **Circuitos de Retificação para Sistemas de Recuperação de Energia Eletromagnética**. 69 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- GUIMARÃES, D. A.; SOUZA, A. A. de. Exploring practical aspects of the fsk modulation with non-coherent matched filter detection. 2015. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação.
- HAMPTON, B. F.; MEATS, R. J. Diagnostic measurements at uhf in gas insulated substations. In: . [S.l.: s.n.], 1988.
- HUANG, Y.; BOYLE, K. **Antennas from Theory to Practice**. Chichester: [s.n.], 2008.
- IEC60270. **High Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurements**. Geneve: Switzerland, 2000.
- JABER, A. A. *et al.* Calibration of free-space radiometric partial discharge measurements. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 24, n. 5, p. 3004–3014, 2017.
- JING-GANG, Y. *et al.* Study of time delay of uhf signal arrival in location partial discharge. In: **2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1088–1092.
- JUDD, M. *et al.* Dielectric windows for uhf partial discharge detection. **Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on**, v. 8, p. 953 – 958, 12 2001.
- KAKEETO, P. *et al.* Experimental investigation of positional accuracy for uhf partial discharge location. In: **2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1070–1073.
- KHAN, U. F. **RSS Based Localization for Partial Discharge Using Received Signal Strength Only**. 162 p. Tese (Doutorado) — University of Huddersfield, Huddersfield, 2018.
- LI, Z. *et al.* A novel partial discharge localization method in substation based on a wireless uhf sensor array. **Sensors**, v. 17, n. 8, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/17/8/1909>>.

- LUO, H. *et al.* Research on the uhf microstrip antenna for partial discharge detection in high voltage switchgear. In: **2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 2273–2276.
- MACEDO, E. C. T. *et al.* Assessment of dielectric degradation by measurement, processing and classification of partial discharges. In: **2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 587–590.
- MACÊDO, E. C. T. d. *et al.* Metodologia para a classificação de descargas parciais utilizando redes neurais artificiais. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- MISTA, C. *et al.* The uhf method for measurement of partial discharge in oil-impregnated insulation. In: **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 1, p. 1–9.
- NATTRASS, D. Partial discharge measurement and interpretation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 4, n. 3, p. 10–23, 1988.
- NETO, J. M. R. d. S. *et al.* Plausibility of practical low-cost location using wsn path-loss law inversion. In: **IET International Conference on Wireless Sensor Network 2010 (IET-WSN 2010)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 260–265.
- NOBREGA, L. A. *et al.* Uhf partial discharge location in power transformers via solution of the maxwell equations in a computational environment. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 15, p. 3435, 2019.
- NOBREGA, L. A. M. M. **Parametrização de HFCT para Medição de Descargas Parciais em Para-raios de ZnO**. Campina Grande: [s.n.], 2016. 113 p.
- NOBREGA, L. A. M. M. **Novo Método para Monitoramento e Localização de Fontes de Descargas Parciais em Transformadores de Potência Utilizando Medições e Simulações na faixa UHF**. 162 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.
- PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. New Jersey: [s.n.], 2006.
- PEARSON, J. *et al.* Partial discharge diagnostics for gas insulated substations. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 2, n. 5, p. 893–905, 1995.
- PINPART, T. **Techniques for analysis and interpretation of UHF partial discharge signals**. 275 p. Tese (Doutorado) — University of Strathclyde, Strathclyde, Scotland, 2010.
- PINPART, T.; JUDD, M. Differentiating between partial discharge sources using envelope comparison of ultra-high-frequency signals. **Science, Measurement Technology, IET**, v. 4, p. 256 – 267, 10 2010.
- PORTUGUES, I. E. *et al.* Rf-based partial discharge early warning system for air-insulated substations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 1, p. 20–29, 2009.
- QIAN, S. *et al.* High sensitivity detection of partial discharge acoustic emission within power transformer by sagnac fiber optic sensor. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 25, n. 6, p. 2313–2320, 2018.

ROBLES, G.; FRESNO, J. M.; MARTÍNEZ-TARIFA, J. M. Separation of radio-frequency sources and localization of partial discharges in noisy environments. **Sensors**, v. 15, n. 5, p. 9882–9898, 2015. ISSN 1424-8220.

ROBLES, G. *et al.* Antenna deployment for the localization of partial discharges in open-air substations. **Sensors**, v. 16, n. 4, 2016. ISSN 1424-8220.

RUTGERS, W. R.; FU, Y. H. **UHF PD-detection in a power transformer**. 1997.

SANTOS, L.; LINARES, R.; ESPINO-CORTES, F. Electromagnetic spectrum of the corona discharge and their fundamental frequency. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2021.

SCHWARZ, R.; JUDENDORFER, T.; MUHR, M. Review of partial discharge monitoring techniques used in high voltage equipment. In: **IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. [S.l.: s.n.], 2008.

SHI, H. A new weighted centroid localization algorithm based on rssi. In: **2012 IEEE International Conference on Information and Automation**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 137–141.

SILVA, A. *et al.* Evaluation of partial discharge sources location algorithms on signals with different signal to noise ratio. In: IEEE. **2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**. [S.l.], 2020. p. 1–4.

SILVA, A. D. C. *et al.* Evaluation of artificial intelligence techniques in the classification of partial discharges. In: **Proceedings of the Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICEVT IMECE)**. [S.l.: s.n.], 2021. v. 34, p. 232–244.

SILVA, A. D. C. *et al.* Evaluation of partial discharge sources location algorithms on signals with different signal to noise ratio. In: **2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4.

SINAGA, H. H.; PHUNG, B. T.; BLACKBURN, T. Partial discharge localization in transformers using uhf detection method. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 19, p. 1891–1900, 2012.

SOUZA NETO, J. M. R. **Localização de Descargas Parciais Baseada em um Método Radiométrico - Prova do Princípio**. 160 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

SOUZA NETO, J. M. R. *et al.* An envelope detector as a trading cost technique for radiometric partial discharge detection. In: **2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1584–1589.

STEINER, J. P.; WEEKS, W. L. **Digital Measurement of Partial Discharge**. West Lafayette: [s.n.], 1989. 120 p.

SUN, C.; OHODNICKI, P. R.; STEWART, E. M. Chemical sensing strategy for real-time monitoring of transformer oil: A review. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, p. 1–18, 2017.

- TANG, Z. *et al.* Partial discharge location in power transformers using wideband rf detection. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 13, n. 6, p. 1193–1199, 2006.
- TENBOHLEN, S. *et al.* Partial discharge measurement in the ultra high frequency (uhf) range. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 15, n. 6, p. 1544–1552, 2008.
- UPTON, D. *et al.* Wireless sensor network for radiometric detection and assessment of partial discharge in hv equipment. **Radio Science**, v. 53, 03 2018.
- UPTON, D. W. *et al.* A review of techniques for rss-based radiometric partial discharge localization. **Sensors**, v. 21, n. 3, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/3/909>>.
- UPTON, D. W. *et al.* Wireless sensor network for radiometric detection and assessment of partial discharge in hv equipment. In: **2017 XXXIIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.
- XAVIER, G. V. R. **Aplicação de Antenas Monopolo Impressas Bio-Inspiradas com Superstratos Metamateriais na Detecção e Localização de Descargas Parciais**. 178 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.
- XAVIER, G. V. R. *et al.* Design and application of an uhf microstrip circular antenna for partial discharges detection in power transformers. In: **2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.
- XAVIER, G. V. R. *et al.* Application of time difference of arrival methods in the localization of partial discharge sources detected using bio-inspired uhf sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 2, p. 1947–1956, 2021.
- YANG, L.; JUDD, M. D. Recognising multiple partial discharge sources in power transformers by wavelet analysis of uhf signals. In: . [S.l.: s.n.], 2003.
- YUEN, D.; CHAN, S. Uhf partial discharge monitoring of 400 kv gis at castle peak substation. In: **1991 International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-91**. [S.l.: s.n.], 1991. p. 415–419 vol.1.
- ZAENI, A.; KHAYAM, U. Designing, simulating, and manufacturing envelope detector to analyze partial discharge waveform. In: **Proceedings of the Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICEVT IMECE)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 94–99.