

RAFAEL MOURA DUARTE

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS BASEADA EM
TÉCNICAS RADIOMÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores:

Prof. Dr. Juan Mauricio Moises Villanueva

Prof. Dr. Euler Cássio Tavares de Macêdo

JOÃO PESSOA

2016

RAFAEL MOURA DUARTE

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS BASEADA EM
TÉCNICAS RADIOMÉTRICAS**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores:

Prof. Dr. Juan Mauricio Moises Villanueva

Prof. Dr. Euler Cássio Tavares de Macêdo

JOÃO PESSOA

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

D812I Duarte, Rafael Moura.
Localização de fontes de descargas parciais baseada em técnicas radiométricas / Rafael Moura Duarte.- João Pessoa, 2016.
77f. : il.
Orientadores: Juan Mauricio Moises Villanueva, Euler Cássio Tavares de Macêdo
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR
1. Engenharia elétrica. 2. Descargas parciais.
3. Localização. 4. Processamento digital de sinais. 5. UHF.
6. Técnicas radiométricas.

UFPB/BC

CDU: 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB

**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho de conclusão

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS USANDO TÉCNICAS
RADIOMÉTRICAS**

Elaborado por

RAFAEL MOURA DUARTE

como requisito para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA

PROF. DR. EULER CASSIO TAVARES DE MACÊDO

PROF. DR. JOSÉ MAURÍCIO RAMOS DE SOUZA NETO

PROF. DR. WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES

PROF. DR. EDSON GUEDES DA COSTA

João Pessoa

Julho de 2016

Dedico este trabalho a todos que de alguma forma contribuíram para a sua
realização.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Juan Mauricio Moises Villanueva, ao meu coorientador, o Prof. Dr. Euler Cássio Tavares de Macêdo, e ao professor José Maurício Ramos de Souza Neto pelo suporte.

Aos outros professores do DEE/UFPB que compartilharam o seu conhecimento dentro e fora de sala, ajudando a me tornar um profissional mais completo.

À minha família e aos meus amigos pelo apoio, pela paciência e pelos bons conselhos.

Ao CNPq e à UFPB, pelo auxílio financeiro e material que me permitiu desenvolver este trabalho ao longo dos últimos dois anos.

“A ciência é a aproximação progressiva do homem com o mundo real.”

Max Planck.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUÇÃO	9
2. DESCARGAS PARCIAIS.....	13
2.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	13
2.2 MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.....	15
2.3 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DO TOA DE SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS	18
2.3.1 MÉTODO DO LIMIAR.....	19
2.3.2 MÉTODO DO CRITÉRIO DA INFORMAÇÃO DE AKAIKE	20
2.3.3 MÉTODO DO CRITÉRIO DA ENERGIA.....	21
4 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS	30
4.1 MODELO DE PROPAGAÇÃO DE FRIIS.....	30
4.2 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS	30
4.2.1 LOCALIZAÇÃO POR MULTILATERAÇÃO (TDOA NÃO LINEAR)	31
4.2.2 LOCALIZAÇÃO POR TDOA LINEAR	33
4.2.3 LOCALIZAÇÃO PELA RAZÃO DAS POTÊNCIAS	35
4.2.4 LOCALIZAÇÃO POR TDOA E ENERGIA (TÉCNICA HÍBRIDA)	37
5 MODELO COMPUTACIONAL	42
5.2.1 TESTES DE INTERSEÇÃO.....	43
5.2.2 GERAÇÃO DO SINAL DE DESCARGAS PARCIAIS	47
5.2.3 TESTE DE RECEPÇÃO	49
5.2.4 PERDAS POR ESPALHAMENTO.....	50
5.2.5 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO	50
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
6.1 CENÁRIO 1: ESPAÇO LIVRE COM RUÍDO	56
6.2 CENÁRIO 2: AMBIENTE GENÉRICO COM REFLEXÕES E SEM RUÍDO	58
6.3 CENÁRIO 3: SUBESTAÇÃO COM MULTIPERCURSO E SEM RUÍDO	60
6.4 CENÁRIO 4: SUBESTAÇÃO COM MULTIPERCURSO E RUÍDO	62
7 CONCLUSÕES	65
8 TRABALHOS FUTUROS.....	66
REFERÊNCIAS	69

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ISOLAÇÃO COM DEFEITOS.....	13
FIGURA 2 – SINAIS RELACIONADOS AO PROCESSO DE DESCARGA PARCIAL.....	14
FIGURA 3 – CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.....	16
FIGURA 4 – FORMAS DE ONDA DE SAÍDA DE IMPEDÂNCIAS RLC E RC.....	16
FIGURA 5 – ANTENA DISCONE.....	18
FIGURA 6 – ESTIMAÇÃO DO TOA USANDO UM LIMIAR.....	19
FIGURA 7 – SINAL E RESPECTIVA CURVA AIC.....	21
FIGURA 8 – CURVAS DOS DESVIOS-PADRÕES DOS DOIS SEGMENTOS.....	21
FIGURA 9 – SINAL DE DESCARGA PARCIAL E RESPECTIVA CURVA EC.....	22
FIGURA 10 – CURVAS DE POTÊNCIA, EC E DE ENERGIA ACUMULADA.....	22
FIGURA 11 – CENÁRIO DE LOCALIZAÇÃO POR TDOA NÃO LINEAR.....	31
FIGURA 12 – DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DA FONTE POR MULTILATERAÇÃO.....	32
FIGURA 13 – CENÁRIO DE LOCALIZAÇÃO POR TDOA LINEAR.....	33
FIGURA 14 – DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DA FONTE USANDO CIRCUNFERÊNCIAS.....	35
FIGURA 15 – INTERSEÇÕES DE DUAS CIRCUNFERÊNCIAS.....	38
FIGURA 16 – RESUMO DO PROCEDIMENTO PARA ESTIMAR A LOCALIZAÇÃO PELA TÉCNICA HÍBRIDA.....	40
FIGURA 17 - RAIOS INCIDENTE, REFLETIDO E TRANSMITIDO.....	44
FIGURA 18 - CURVA DE IMPEDÂNCIA DO CONCRETO.....	45
FIGURA 19 - CURVA DE IMPEDÂNCIA DA PORCELANA.....	46
FIGURA 20 - CURVA DE IMPEDÂNCIA DO AÇO DE MÁQUINAS.....	46
FIGURA 21 – PERCURSO DE UM RAIOS DISPARADO COM UM ÂNGULO DE 40°.....	47
FIGURA 22 – GERADOR DE PULSOS DE DESCARGAS PARCIAIS.....	48
FIGURA 23 – PULSO DE DESCARGAS PARCIAIS USADO NO MODELO.....	49
FIGURA 24 – POSSÍVEIS RESULTADOS DO TESTE DE RECEPÇÃO DO RAIOS.....	50
FIGURA 25 – INTERSEÇÃO DAS CIRCUNFERÊNCIAS NA TÉCNICA HÍBRIDA.....	52
FIGURA 26 – INTERSEÇÃO DAS HIPÉRBOLES NA MULTILATERAÇÃO.....	52
FIGURA 27 – DISTRIBUIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO DE ALTA TENSÃO.....	53
FIGURA 28 – CURVAS DE MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DAS COORDENADAS USANDO OS DOIS CONJUNTOS DE ANTENAS.....	57
FIGURA 29 – ERROS DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO NO AMBIENTE COM OBSTÁCULOS...59	59
FIGURA 30 – ERROS DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO NAS TRÊS POSIÇÕES DA SUBESTAÇÃO.....	60
FIGURA 31 – ERROS DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO NAS TRÊS POSIÇÕES DA SUBESTAÇÃO.....	61
FIGURA 32 – ESTIMATIVAS DAS COORDENADAS DA FONTE DE DESCARGAS PARCIAIS NAS TRÊS POSIÇÕES DA SUBESTAÇÃO SEM RUÍDO.....	62
FIGURA 33 – CURVAS DE MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DAS COORDENADAS ESTIMADAS NA SUBESTAÇÃO, COM MULTIPERCURSO E RUÍDO.....	64

RESUMO

Uma forma de diagnosticar o nível de degradação de isolamentos elétricos consiste em identificar a ocorrência de descargas parciais (DP). A detecção precoce de defeitos em isolamentos viabiliza a programação de atividades de manutenção de equipamentos elétricos de potência. Dessa forma, o sistema elétrico pode operar de forma mais confiável e com um número menor de interrupções. Além da detecção, as informações fornecidas pelos pulsos de descargas parciais permitem a localização da sua fonte. Neste trabalho, o principal objetivo é desenvolver uma técnica híbrida de localização, baseada nos instantes de chegada e nas energias dos sinais de DP. O desempenho da técnica híbrida foi comparado com o de outras três técnicas radiométricas de localização. Para este propósito, os métodos usados para estimar os instantes de chegada dos pulsos de DP e as técnicas de localização estão explicados em detalhes. A fim de realizar as simulações deste trabalho, foi desenvolvido um modelo de traçado de raios, que é capaz de simular a propagação dos pulsos de ondas em ambientes definidos por mapas. Os resultados deste trabalho foram obtidos a partir de quatro cenários de simulação: espaço livre com ruído, sala com obstáculos e sem ruído, subestação de alta tensão sem ruído e subestação de alta tensão com ruído. O desempenho da técnica híbrida foi inferior ao desempenho das técnicas de localização que dependem apenas dos instantes de chegada, cuja precisão não é tão afetada pelo multipercurso. No entanto, a estimativa fornecida pela técnica híbrida se mostrou útil como condição inicial para o sistema linear de uma das técnicas e localização pelos instantes de chegada.

Palavras-Chave: Localização, Processamento digital de sinais, UHF, Descargas parciais, Técnicas radiométricas.

ABSTRACT

One way to diagnose the level of electrical insulation degradation is to identify the occurrence of partial discharges (PD). Early detection of defects in insulation enables the programming of electric power equipment maintenance activities. Thus, the electrical system can operate more reliably and with fewer interruptions. In addition to detection, the information provided by pulses of partial discharges allow the location of its source. In this work, the main objective is to develop a hybrid technique of location, based on the time-of-arrival and the energies of PD signals. The performance of the hybrid technique was compared with three other location radiometric techniques. For this purpose, the methods used to estimate time-of-arrival of PD pulses and localization techniques are explained in details. In order to make simulations of this work was to develop a model of ray tracing, which is able to simulate the propagation of the pulse wave environments defined by maps. These results were obtained from four simulation scenarios: free space with noise, room with obstacles and without noise, high-voltage substation without noise and high-voltage substation with noise. The performance of the hybrid technique was inferior to that of the location techniques that depend only on the time-of-arrival, the accuracy is not as affected by multipath. However, the estimate provided by the hybrid technique proves useful as an initial condition for non linear time-of-arrival non linear technique.

Keywords: Localization, Digital signal processing, UHF, Partial discharges, Radiometric techniques.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a norma IEC 60.270 (2000), descargas parciais são descargas elétricas localizadas, isto é, que curto-circuitam parcialmente um meio isolante. Tais descargas ocorrem em regiões do isolante onde o campo elétrico é mais intenso.

O estudo das descargas parciais (DP) em isolações elétricas remonta ao início do século XX. Os primeiros trabalhos trataram de analisar a ocorrência desse fenômeno em cabos isolados com papel impregnado por óleo. Exemplos são os trabalhos de Dawes e Hoover (1926) e Robinson (1936). Nos anos seguintes, foram descobertos diversos efeitos físicos e químicos associados à ocorrência das descargas parciais. Daí em diante, com base nesses efeitos, foram propostas várias técnicas de detecção e localização de DP.

As primeiras técnicas de detecção de DP se baseavam na realização de ensaios elétricos com os equipamentos desconectados do sistema em operação (*off grid*). As técnicas convencionais de medição analógica foram compiladas na norma IEC 60.270 (2000).

A fim de minimizar o tempo de desligamento ou interrupção da operação de sistemas elétricos, foram desenvolvidos métodos de detecção de descargas parciais não invasivos, como a detecção usando transformadores de corrente de alta frequência (HFCT – *High Frequency Current Transformer*), antenas de UHF (*Ultra High Frequency*) e sensores acústicos. Com essas ferramentas, não só é possível identificar a ocorrência de um processo de DP, como também é possível determinar a localização da falha em um equipamento. Por exemplo, Álvarez et al (2015) usaram combinadamente sensores UHF e HFCT para medir sinais de descargas parciais em subestação isolada a gás (GIS – *Gas Insulated Substation*).

A detecção e a localização de fontes de descargas parciais por métodos radiométricos em subestações isoladas a ar foi abordada por Moore et al (2005). Nesse trabalho, a localização foi feita com base nos instantes de chegada dos pulsos de DP em diferentes antenas. Nesse caso, os autores usaram uma técnica conhecida como multilateração.

O monitoramento de subestações de alta tensão e a localização de fontes de descargas parciais por métodos radiométricos também foram estudados por Português et al (2009). Eles desenvolveram o protótipo de um sistema de

monitoramento, composto por quatro antenas discone. Uma técnica de localização baseada nos instantes e nos ângulos de chegada dos pulsos de descargas parciais foi usada para determinar a posição da fonte de DP em duas subestações, com até alguns meses de antecedência.

Nos anos que se seguiram, Souza Neto (2014) realizou, em laboratório, testes de uma nova técnica de localização de DP, baseada nas razões das energias dos pulsos captados por antenas discone, e Zhang et al (2015) demonstrou a possibilidade de substituir as antenas por sensores sem fio nessa técnica.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma técnica radiométrica de localização de fontes de DP baseada nas energias e nos instantes de chegada dos sinais em diferentes antenas. O desempenho dessa técnica foi comparado com o de outras três técnicas de localização de DP. Elas são a técnica de localização por razão de energias, a multilateração e outra técnica de localização pela diferença dos instantes de chegada. Para realizar a comparação, a propagação dos pulsos foi simulada usando um modelo de traçado de raios (RT – *Ray Tracing*) capaz de simular a propagação em um ambiente semelhante ao de uma subestação de alta tensão.

1.1 Motivação

A ocorrência de descargas parciais pode ser interpretada como um sinal de desgaste de isolações elétricas. Esse tipo de descarga ocorre em equipamentos elétricos de potência, tais como transformadores cabos e capacitores. Com o tempo, se o equipamento não for reparado ou substituído, podem ocorrer explosões. Além de interromper o fornecimento de energia, esse tipo de evento pode resultar em perdas materiais e humanas.

Segundo Polak et al (2014), a detecção de pulsos de descargas parciais permite a verificação da integridade da isolação de equipamentos e a necessidade de se realizar algum tipo de manutenção. Além disso, os métodos radiométricos de detecção e localização não intrusivos permitem o monitoramento contínuo de equipamentos específicos e de subestações (PORTUGUES et al, 2009). Por isso, é importante que sejam desenvolvidos novos métodos de localização da fonte de DP ou aprimoramentos dos métodos atuais.

A técnica de localização por multilateração envolve a resolução de um sistema não linear e, portanto, necessita de uma condição inicial. Uma forma de determinar essa condição inicial consiste em estimar a posição da fonte de DP com outras técnicas de localização. E essa é uma das aplicações da técnica apresentada neste trabalho.

A avaliação do desempenho da técnica de localização aqui proposta foi feita com base na comparação entre o seu erro de estimação e os das outras três técnicas. O modelo de traçado de raios foi escolhido porque permite que diversos efeitos físicos de propagação sejam considerados na simulação.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma técnica de localização híbrida baseada nos instantes de chegada e na energia dos pulsos de descargas parciais. Essa técnica também deve servir como condição inicial para a multilateração, que é uma técnica de localização mais precisa.

Para este propósito, os objetivos específicos são:

- Desenvolver um modelo computacional capaz de simular a propagação dos sinais e de descargas parciais em um ambiente de medição (incluindo antenas, obstáculos e fonte de descargas parciais);
- Implementar algoritmos dos métodos de estimação de ToA e das outras três técnicas de localização de DP;
- Desenvolver uma técnica híbrida de localização de fontes de descargas parciais baseada nas energias e nos instantes de chegada dos pulsos;

1.3 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo de introdução, o trabalho está organizado em...

- Descargas Parciais: nesse capítulo, explica-se parte da teoria das descargas parciais. Tipos de descarga, efeitos físicos e químicos e as características dos sinais de DP.

- Técnicas de Localização: esse capítulo é composto por uma seção sobre as técnicas de estimação dos instantes de chegada de um sinal no receptor. Em seguida, são descritas as três técnicas de localização de DP usadas como parâmetro. Por fim, o modelo computacional e a dedução da técnica híbrida que combina energias e instantes de chegada são apresentados;
- Revisão Bibliográfica: são apresentadas contribuições de alguns artigos sobre detecção radiométrica e localização de descargas parciais;
- Resultados e Discussão: os resultados das simulações são apresentados e interpretados neste capítulo;
- Conclusão: as principais conclusões deste trabalho são apresentadas;
- Trabalhos Futuros: nesse capítulo são sugeridas possíveis continuações para este trabalho.

2. DESCARGAS PARCIAIS

Neste capítulo, estão expostos alguns conceitos importantes de descargas parciais, os principais efeitos físicos desse fenômeno e três métodos de estimação dos instantes de chegada dos sinais nos receptores.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Além da definição constante na norma IEC 60.270 (2000), existem outras definições na literatura. Cuenca (2005) define descargas parciais como sucessões de descargas elétricas incompletas, rápidas e intermitentes, que se originam pela ionização em cavidades gasosas no interior de isolantes sólidos e líquidos. Paoletti e Golubev (1999) descrevem descargas partilhais como descargas ou pulsos elétricos que ocorrem em espaços preenchidos por gás ou em superfícies dielétricas de meios. Segundo eles, esse tipo de descarga curto-circuita parcialmente o meio existente entre fases ou em entre fase e terra.

Descargas parciais ocorrem em regiões preenchidas por substâncias gasosas com permissividades elétricas inferiores à do meio isolante que as circunda (Cuenca, 2005). Na Figura 1, encontra-se ilustrada uma isolação com defeitos internos. O conteúdo gasoso deles torna o campo elétrico mais intenso nas cavidades.

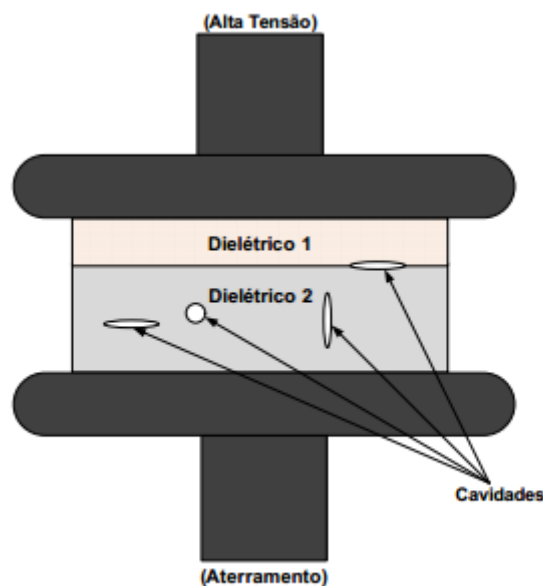


FIGURA 1 – ISOLAÇÃO COM DEFEITOS.
FONTE: MACÊDO, 2014.

Segundo a norma IEC 60.270 (2000), no contexto das descargas parciais, a tensão de inepção (U_i) é o valor de tensão que precisa ser excedido para que pulsos de descarga repetitivos comecem a aparecer. A tensão a partir da qual os pulsos de descarga repetitivos cessam é conhecida como tensão de extinção (U_e).

Nos gráficos da Figura 2, encontram-se ilustrados os pulsos de corrente de descarga parcial, $I(A)$, o sinal senoidal de potência, U_t , que provoca as descargas e a tensão, U , sobre o defeito. Além desses sinais, também estão ilustradas as tensões de inepção nos semiciclos positivo e negativo (U_+ e U_- , respectivamente), as tensões residuais no defeito (V_+ e V_-) e o afundamento de tensão, ΔV , decorrente do processo de descarga.

Uma das possíveis manifestações das descargas parciais é a geração de uma sequência de pulsos de carga ou de tensão da ordem de picocoulombs e de milivolts, respectivamente. As fases e as amplitudes dos pulsos de descarga parcial variam a cada ciclo. Essa instabilidade – chamada precessão dos pulsos de descarga – é causada pela variação da tensão de inepção em decorrência de descargas anteriores (BARTNIKAS, 2002).

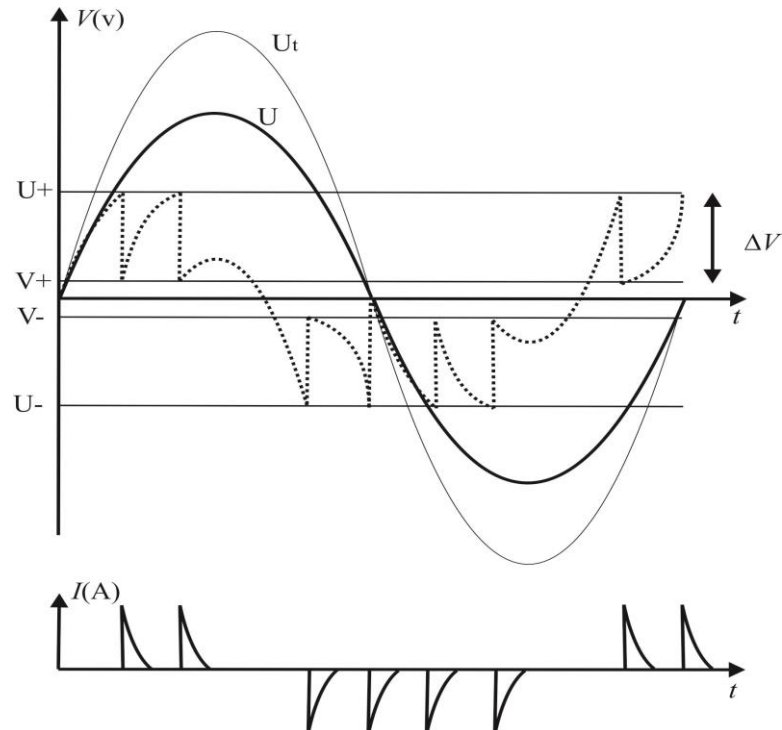


Figura 2 – SINAIS RELACIONADOS AO PROCESSO DE DESCARGA PARCIAL

FONTE: VILLANUEVA (2012).

O valor da tensão de inepção em uma cavidade depende da quantidade de elétrons livres nesse local, que, por sua vez, varia com as alterações de tamanho sofridas pelo defeito. Essas alterações dependem do gás existente no seu interior. Pontas e desgastes locais são mais comuns na presença do gás nitrogênio, por exemplo, enquanto o gás oxigênio está associado a erosões mais uniformes (TANAKA, 1986).

Complementarmente, a norma IEC 60.270 (2000) classifica as descargas parciais em três tipos, de acordo com o seu local de origem:

- internas: ocorrem em cavidades existentes no interior de isolantes sólidos ou em bolhas existentes em isolantes líquidos;
- superficiais: ocorrem em interfaces ou defeitos superficiais de dielétricos;
- corona: ocorrem em dielétricos gasosos nas proximidades de eletrodos metálicos ou em regiões com pequeno raio de curvatura.

Além dos efeitos elétricos, as descargas parciais também produzem efeitos físicos acústicos, ópticos e mecânicos e efeitos químicos. Esses efeitos secundários também podem ser usados para detectar as descargas, como será descrito mais adiante.

2.2 MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

De acordo com Lemke et al (2008), para obter medições em conformidade com a norma IEC 60.270 (2000), três circuitos de medição pode ser usados. Nessa configuração, C_a é a capacitância do corpo de prova, Z_n é a impedância de ruído, cuja função é impedir que os pulsos de descarga alcancem a rede elétrica, e C_k é o capacitor de acoplamento que serve para isolar a impedância de medição, bloqueando o sinal de potência. Finalmente, Z_m é a impedância de medição, sobre a qual os sinais de descarga são medidos.

As características dos pulsos adquiridos pelo instrumento de medição (M_i) dependem da impedância de medição que está sendo utilizada. Por exemplo, quando a impedância de medição é do tipo RLC, o pulso medido é oscilante e

amortecido (BARTNIKAS, 1987). Na Figura 4, encontram-se ilustradas aproximações dos pulsos detectados com impedâncias de medição RC e RLC.

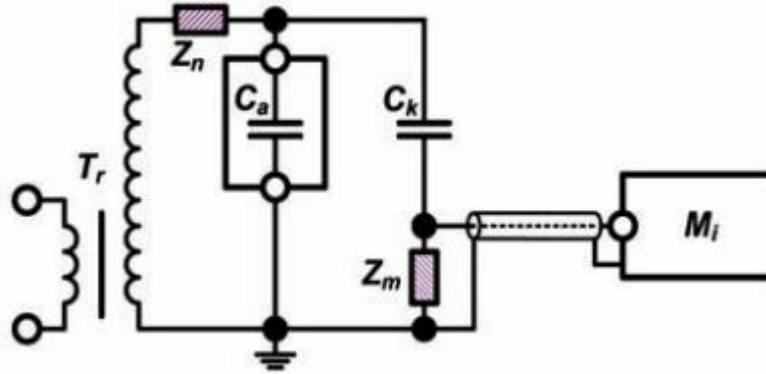


FIGURA 3 – CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.
FONTE: LEMKE ET AL (2008).

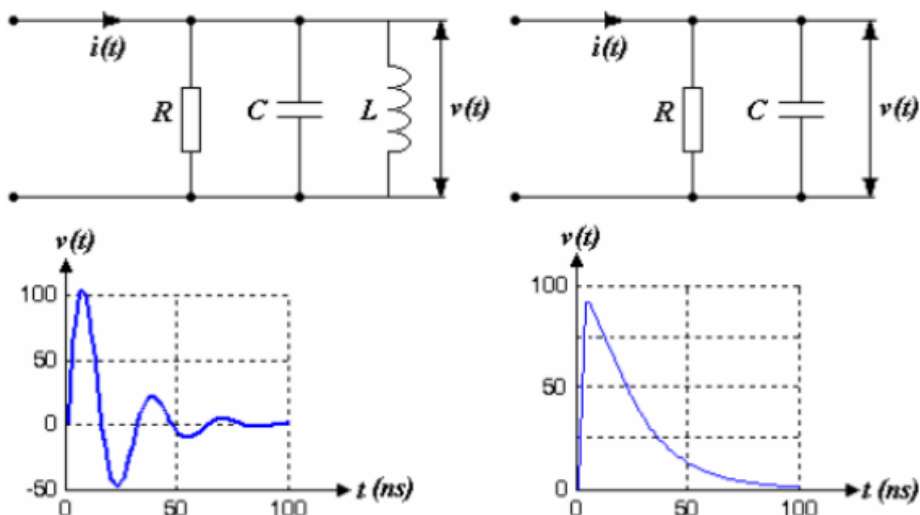


FIGURA 4 – FORMAS DE ONDA DE SAÍDA DE IMPEDÂNCIAS RLC E RC.
FONTE: SOUZA NETO (2014).

De acordo com a norma IEC 60.270 (2000), a análise quantitativa dos pulsos de descarga parcial pode ser embasada em grandezas como a carga aparente (q_a), a taxa de repetição (n), a frequência de repetição (N), o seu posicionamento no eixo do tempo (t_i) – ou da fase (φ_i) – e a corrente média em um intervalo de tempo de referência. A carga aparente é definida como a carga que, quando injetada em um curto intervalo de tempo entre os terminais de um corpo de prova conectado a um circuito de teste, é capaz de produzir leituras iguais às de um pulso de descarga parcial no instrumento de medição.

Além da medição elétrica intrusiva, existem outras formas de detectar e medir descargas parciais, com base em diferentes efeitos físicos e químicos. As principais são:

- Acústica: segundo (LUNDGAARD, 1992), uma descarga parcial atua como uma pequena explosão. O material vaporizado no processo dá origem a uma onda de pressão que pode ser detectada por transdutores piezoelétricos. A região do espectro dos sinais acústicos que concentra mais energia depende do tipo de descarga parcial e do semiciclo de tensão em que ocorrem as descargas (BOCZAR, 2001).
- Óptica: a recombinação de íons e elétrons durante as descargas liberam fótons que podem estar associados à faixa visível do espectro. Esses fótons podem ser observados com o auxílio de câmeras e acessórios especiais, como sensores de fibra óptica (SCHWARZ et al, 2005).
- Química: a ocorrência de descargas parciais provoca certas reações químicas nos materiais que compõem o meio isolante ou nos gases que preenchem as cavidades. Gases como o ozônio, o metano e o gás carbônico são alguns dos produtos dessas reações. Identificar a presença desses compostos é uma maneira de inferir a ocorrência de descargas. Uma técnica comumente usada é a análise de gases dissolvidos (DGA – *Dissolved Gas Analysis*) no óleo (WANG et al, 2002).
- Radiométrica: pulsos eletromagnéticos também são irradiados a partir das fontes de descargas parciais. De acordo com Judd et al (2005), uma fonte de DP irradia pulsos eletromagnéticos em todas as direções, os quais podem ser detectados pelos sensores adequados, como a antena bicone usada por Hikita et al (1998);
- Elétrica: outra forma de detectar descargas parciais consiste em usar sensores HFCT para adquirir os pulsos que se propagam em cabos. A forma dos pulsos detectados normalmente difere da original, porque eles são atenuados e sofrem dispersão durante a propagação (VAN VEEN, 2014).

Algumas dessas formas de detecção fornecem informações que permitem estimar a localização de uma fonte de DP. Essa estimação pode ser feita de forma não intrusiva usando métodos acústicos (MARKALOUS, 2008) ou radiométricos (ZHANG et al, 2015). A fim de localizar fontes de DP, pode-se, por exemplo, utilizar antenas discone (SOUZA NETO, 1998), como a que está ilustrada na Figura 5.



FIGURA 5 – ANTENA DISCONE.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

2.3 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DO TOA DE SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS

A localização de descargas parciais usando técnicas radiométricas pode se basear na energia, na direção de chegada (DoA – *Direction of Arrival*) ou no instante de chegada (ToA – *Time of Arrival*) do sinal de DP no receptor. O valor do ToA de pulsos de DP pode ser obtido com o uso de métodos de estimação adequados. Herold e Leibfried (2007) e Wagenaars et al (2008) estudaram diversos métodos de estimação de ToA de pulsos de DP em cabos. Aqui, serão explicados três métodos:

- Método do Limiar;
- Método do Critério de Informação de Akaike;
- Método do Critério de Energia.

O método do limiar é a maneira mais simples de estimar o ToA de um sinal. O método do critério da informação de Akaike (AIC), apesar de ser muito suscetível ao ruído (WAGENAARS et al, 2008), é muito aplicado à estimação de ToA em

cabos. Finalmente, o método do critério da energia, segundo Robles e Martinez-Tarifa (2015), fornece os resultados mais precisos para qualquer tipo de sinal. Wagenaars (2008) também destacou o bom desempenho desse método em cenários ruidosos.

O método da correlação cruzada foi evitado pelo fato de ser suscetível a erros de estimação causados pelo multipercurso (ROBLES e MARTINEZ-TARIFA, 2015). Diferentemente dos outros métodos, o da correlação cruzada fornece a diferença entre os instantes de chegada (TDOA – *Time Difference of Arrival*) de um sinal em diferentes receptores. Howells e Norton (1978) usaram esse método para determinar o TDOA de sinais de DP acústicos.

2.3.1 MÉTODO DO LIMIAR

A maneira mais simples de determinar o instante de chegada de um sinal a um receptor consiste em estabelecer um limiar de tensão (v_{limiar}). O valor ideal do limiar seria zero, mas, na prática, a escolha é influenciada pelos níveis de ruído. O nível do limiar pode ser escolhido relativamente ao máximo do sinal, por meio da seguinte equação:

$$v_{limiar} = k \cdot v_{max} \quad (2.1)$$

em que v_{max} é o valor máximo do sinal e k é um parâmetro definido pelo usuário.

Contanto que o teste de limiar seja realizado com cada amostra, o instante de chegada do sinal será aquele em que o sinal exceder o limiar, conforme ilustrado na Figura 6.

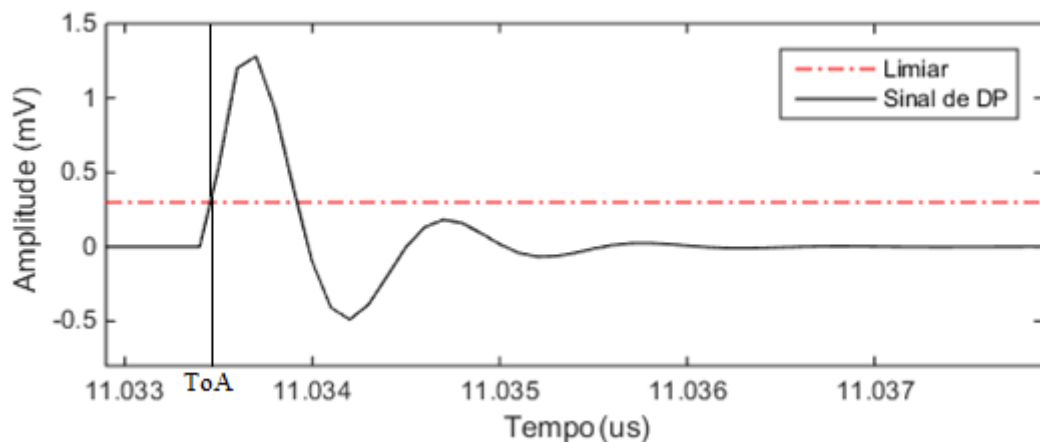


FIGURA 6 – ESTIMAÇÃO DO TOA USANDO UM LIMIAR.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

2.3.2 MÉTODO DO CRITÉRIO DA INFORMAÇÃO DE AKAIKE

Elaborado com base na teoria da informação, o método do critério da informação de Akaike (AIC) é comumente aplicado em estudos de detecção de descargas parciais em cabos e também em estudos sismológicos (SLEEMAN e VAN ECK, 1999).

Um sinal x , obtido pela soma do sinal sem ruído (s) com o ruído ($s_{ruído}$) pode ser dividido em dois conjuntos de pontos (segmentos). Um deles começa na primeira amostra e termina na amostra n , enquanto o outro começa na amostra $n+1$ e termina na última amostra (N) do sinal. A cada iteração do algoritmo, as variâncias dos pontos que compõem os dois segmentos são dadas por:

$$\sigma^2(1, n) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n [x(m) - \bar{x}(1, n)]^2 \quad (2.2)$$

$$\sigma^2(n+1, N) = \frac{1}{N-n-1} \sum_{m=n+1}^N [x(m) - \bar{x}(n+1, N)]^2 \quad (2.3)$$

Essas variâncias são usadas para calcular a curva AIC para cada n :

$$AIC(n) = n \cdot \ln(\sigma^2(1, n)) + (N - n - 1) \cdot \ln(\sigma^2(n+1, N)) \quad (2.4)$$

O primeiro segmento ganha uma amostra do segundo segmento a cada iteração. Ao final das iterações, o segundo segmento é composto por uma única amostra.

Quando um sinal é detectado pelo receptor, os desvios-padrões (*std*, do inglês *standard deviation*) dos dois segmentos mudam drasticamente devido à contribuição da energia do sinal. Essa variação repentina dos desvios-padrões no momento da detecção do pulso pode ser observada nas curvas da Figura 7. Conforme ilustrado na Figura 8, a repentina mudança nos desvios-padrões produz o primeiro mínimo na curva AIC, o qual coincide com o ToA do sinal.

A análise da curva AIC deve ser realizada preferivelmente em uma janela de tempo pequena, em torno do instante de aparição do sinal, pois este pode possuir vários mínimos locais (Robles e Martinez-Tarifa, 2015).

A qualidade da estimativa do ToA pelo AIC depende de quão abruptamente o sinal cresce. Pulsos que crescem abruptamente apresentam variações maiores nos

desvios-padrões e, conseqüentemente, um ToA mais exato. A vulnerabilidade ao ruído é outro ponto fraco dessa técnica (WAGENAARS et al, 2008), apesar do baixo custo computacional.

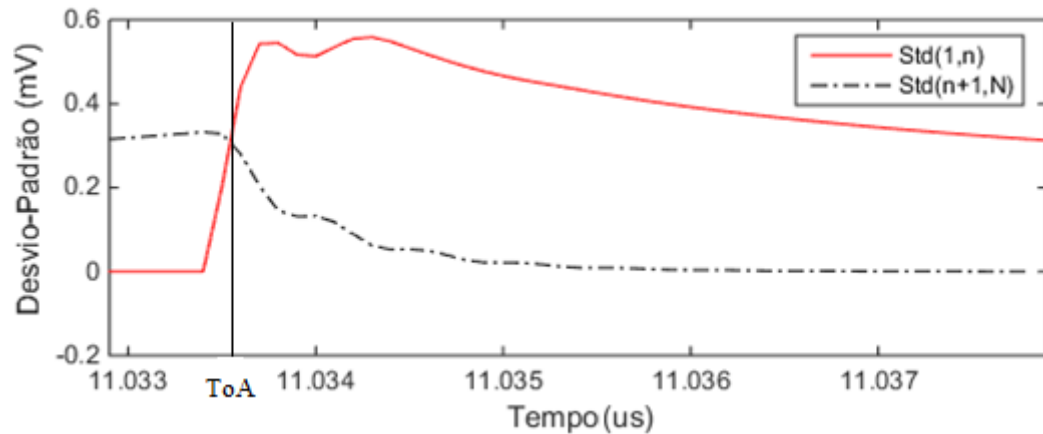


FIGURA 7 – SINAL E RESPECTIVA CURVA AIC.

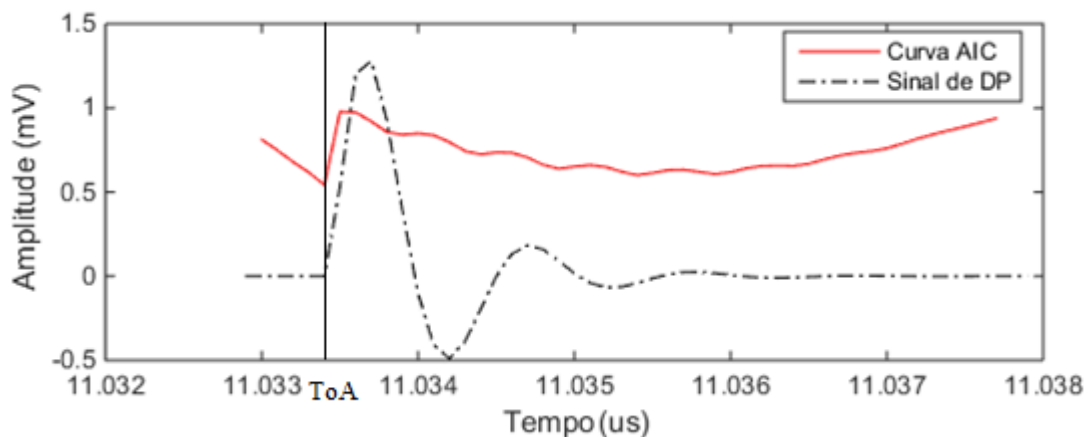


FIGURA 8 – CURVAS DOS DESVIOS-PADRÕES DOS DOIS SEGMENTOS.
 FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

2.3.3 MÉTODO DO CRITÉRIO DA ENERGIA

O método do critério da energia (EC) se baseia no fato de que a detecção de um sinal provoca perturbações na curva de energia acumulada. Como ocorre no AIC, o ToA coincide com o mínimo de uma curva obtida a partir do sinal. A construção da curva consiste no procedimento iterativo de subtrair da energia acumulada do sinal uma fração de sua energia total. A curva EC, ilustrada na Figura 9, é dada por:

$$EC(n) = \sum_{m=1}^n (x^2(m) - n \cdot P_x) \quad (2.5)$$

Em que n é o número da amostra que está sendo calculada e P_x é a potência do sinal x .

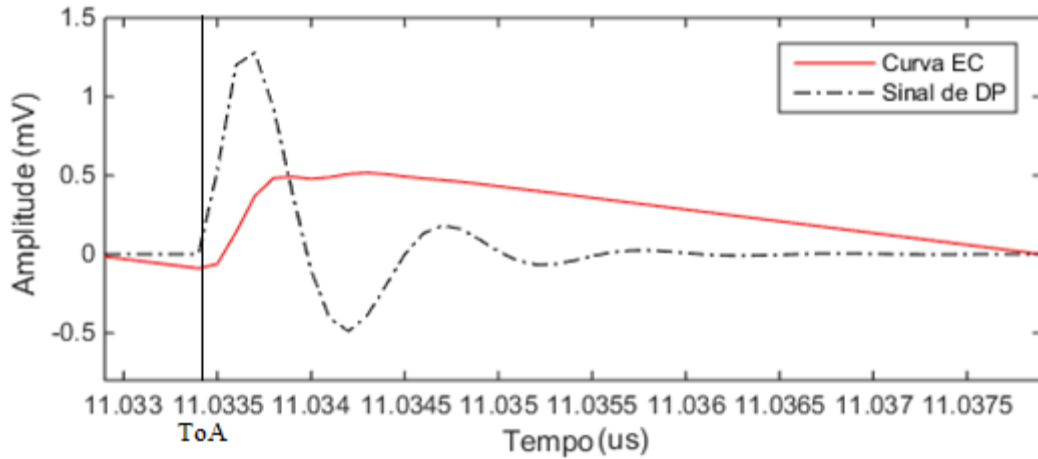


FIGURA 9 – SINAL DE DESCARGA PARCIAL E RESPECTIVA CURVA EC.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

A energia cumulativa do sinal – representada pelo primeiro termo do somatório – cresce rapidamente a partir do ToA. Por esse motivo, a curva EC alcança o seu nível mínimo no instante de chegada do sinal e, em seguida, cresce repentinamente. A relação entre as curvas de energia cumulativa, de potência e EC pode ser observada graficamente na Figura 10.

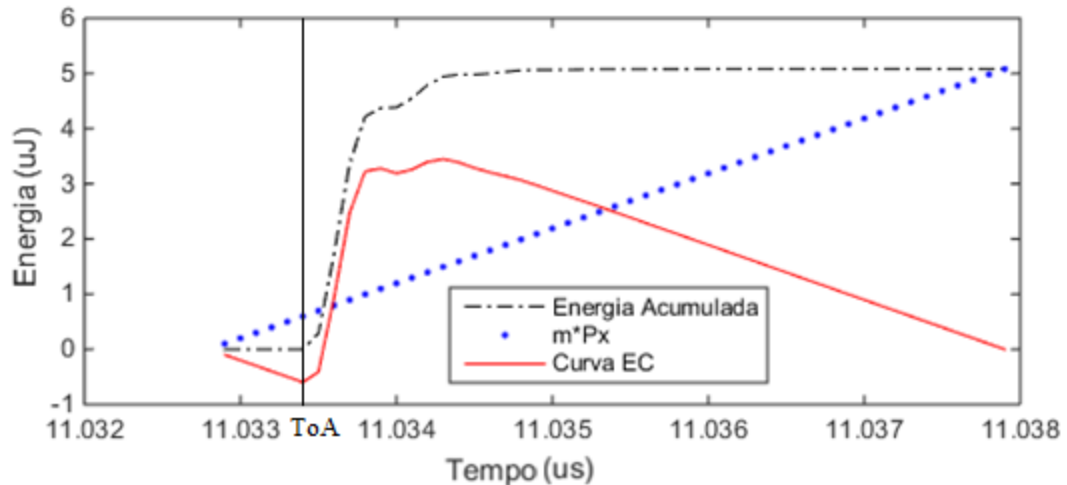


FIGURA 10 – CURVAS DE POTÊNCIA, EC E DE ENERGIA ACUMULADA.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Conclusões:

- A duração e a intensidade de um pulso de descargas parciais dependem das características do defeito que as originou;
- O instante de chegada de um sinal de DP pode ser estimado com diversos métodos. Neste capítulo, foram apresentados os métodos baseados em limiar, energia e características estatísticas dos sinais;
- O desempenho dos métodos de estimação de ToA é afetado pela SNR;
- Neste trabalho, o método do critério da energia foi escolhido para realizar as simulações do estudo de caso. Além de apresentar o melhor desempenho em cenários ruidosos, a curva EC possui apenas um mínimo, o que viabiliza a automatização dos algoritmos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A detecção de descargas parciais em isolamentos elétricos é uma forma de diagnosticar o desgaste de equipamentos e, assim, evitar acidentes e a interrupção do fornecimento de energia. Por esse motivo, é importante que o monitoramento de equipamentos e instalações de alta tensão seja contínuo. Um método que tem se mostrado especialmente promissor é o de monitoramento por UHF. Inicialmente usado para monitorar subestações isoladas a gás, esse método ganhou espaço nos últimos anos e é o objeto de estudo deste trabalho.

De acordo com Pearson et al (1995), a primeira experiência com o monitoramento radiométrico por UHF de descargas parciais em subestações foi realizada em 1986, na GIS da estação de energia nuclear de Torness na Escócia. Dois anos depois, Hampton e Meats (1988) realizaram experimentos com sensores UHF em laboratório e em subestações isoladas a gás. O trabalho descreve os espectros de sinais de DP comuns (partículas suspensas no gás e de eletrodo flutuante) em uma GIS. O monitoramento foi realizado na faixa de 600 a 900 MHz, a qual concentra grande parte da energia desse tipo de sinal. A possibilidade de usar os instantes de chegada dos sinais para localizar a fonte de DP também foi sugerida pelos autores nesse trabalho.

No início da década de noventa, Pearson et al (1991) descreveram o funcionamento do sistema de monitoramento por UHF contínuo de GIS. A influência da natureza da descarga sobre o espectro do sinal de DP também foi percebida. Por exemplo, o espectro das descargas corona é mais concentrado que o espectro de descargas por eletrodo flutuante. Essa conclusão foi tirada com base em medições de 0 até 1,5 GHz.

Alguns anos depois, os métodos convencionais e não convencionais de detecção de descargas parciais em subestações isoladas a gás foram descritos por Pearson et al (1995). Segundo eles, a GIS se comporta como um guia de onda coaxial para os pulsos de DP em UHF. As barreiras e descontinuidades internas das GIS contribuem para atenuar os sinais de UHF. Os autores também destacam que o nível dos sinais de interferência existentes no interior dessas instalações de alta tensão normalmente não excede o nível do ruído. O artigo também descreve as principais ocorrências associadas a descargas parciais na GIS da usina nuclear de Torness.

O debate acerca do espectro dos sinais de descargas parciais seguiu ao longo da década de noventa. Hikita et al (1998) perceberam a relação existente entre o tipo de isolante a sofrer descargas parciais e a largura de banda. Essa conclusão foi tirada a partir de medições de ruído eletromagnético em três tipos de subestação (GIS, GIS subterrânea e subestação isolada a ar). Nos seus experimentos, eles utilizaram uma antena do tipo bicone projetada para opera na faixa de VHF (30 a 300 MHz).

Judd et al (1999) usaram dois sensores de UHF acoplados ao tanque de um transformador para detectar e estimar a localização (por ToA) de fontes de DP no seu interior. Segundo os autores, os resultados do método acústico concordaram com os do método UHF. Eles sugerem que um terceiro sensor tornaria a estimativa mais precisa.

Judd et al (2000) realizaram mais testes de detecção de DP em transformadores, usando novos acopladores UHF. Esses acopladores forneceram resultados superiores àqueles recomendados pelo padrão do Reino Unido em testes realizados com transformadores energizados e desenergizados. Nesse trabalho, os autores também sugerem que a eliminação de interferências seja realizada com o uso de limiares.

Moore et al (2005) realizaram a localização de uma fonte de descargas parciais por multilateração, uma técnica que se baseia apenas nas diferenças dos instantes de chegada. Além dos testes em laboratório, foram realizados dois estudos de caso em uma subestação de alta tensão. Os autores concluíram que essa forma de localizar fontes de DP pode ser usada com erros de alguns metros quando o conjunto de antenas não está a mais de quinze metros da fonte de DP. Adicionalmente, eles ressaltam que descargas parciais originadas em dielétricos mais rígidos possuem espectros mais largos. Por exemplo, o espectro de um sinal de DP originado em óleo tende a ser mais largo que o espectro de um sinal originado em ar.

O uso de UHF para realizar o monitoramento de descargas parciais em transformadores foi defendido por Judd, Yang e Hunter (2005). Segundo eles, o monitoramento contínuo desses equipamentos pode reduzir os riscos associados às descargas parciais. O uso de UHF para a detecção de DP é interessante nos casos em que o espectro dos pulsos de curta duração se estende até faixa de UHF. Os

autores afirmam que a forma dos pulsos de UHF detectados pelos sensores decorre das reflexões dos pulsos de DP no interior do transformador. Por fim, os autores propõem o uso de um modelo numérico para tabelar os tempos de trânsito (*time-of-flight*) dos sinais de DP no interior transformador. Com base nessas informações, seria possível localizar a fonte de DP em três dimensões.

O método de detecção e localização de fontes de descargas parciais em transformadores por UHF foi simulado por Shen e El-Saadany (2006). Para realizar a localização, os autores utilizaram a técnica de multilateração. Segundos eles, três sensores foram suficientes para realizar a localização da fonte de descargas parciais em três dimensões (x , y e z). A escolha do UHF no lugar de sensores ultrassônicos se deve ao fato de o tempo de trânsito dos sinais de UHF não ser tão afetado pelas barreiras sólidas e fluidas no interior de um transformador, ao passo que os sinais ultrassônicos são severamente afetados por elas.

A diferença entre os espectros de descargas parciais originadas por defeitos de diferentes tipos foi analisada por Rengarajan et al (2008). As descargas foram produzidas no interior de um tanque metálico e a sua detecção foi realizada com antenas de UHF do tipo espiral. Além de demonstrar que é possível realizar a detecção de DP com antenas de UHF, também ficou demonstrado que descargas menos intensas, como a corona e a de superfície, apresentaram espectros de frequências mais baixas. O trabalho sugere que é possível realizar a localização de fontes de DP em transformadores a partir das diferenças nos instantes de chegada dos sinais de DP em diferentes antenas.

A precisão das estimativas de localização obtidas com dois métodos de estimação de ToA (limiar e energia acumulada) foi estudada por Kakeeto et al (2008). Eles instalaram um gerador de descargas parciais no interior de um tanque metálico e fixou três antenas monopolo de UHF nas paredes desse mesmo tanque. Como resultado da comparação, os autores concluíram que o método do limiar tem potencial para fornecer resultados mais precisos que aqueles obtidos com o da energia cumulativa. O motivo para essa superioridade está no fato de a perturbação promovida pelo sinal recebido nem sempre estar evidente na curva de energia acumulada.

No estudo de descargas parciais, a aplicação de técnicas de cancelamento de ruído é usada a fim de conservar apenas os pulsos de DP. O cancelamento usando

a transformada *wavelet* é uma dessas técnicas. Entretanto, Pinpart e Judd (2009) demonstraram que o uso do cancelamento por *wavelet* pode distorcer a forma de onda dos pulsos de descargas parciais em UHF, o que pode acarretar em erros de estimação dos instantes de chegada dos pulsos. Por esse motivo, os autores defendem o uso do método de estimação de ToA pelo aumento relativo de energia entre pontos sucessivos do sinal amostrado. Com esse método, é possível reduzir os erros introduzidos pelo cancelamento de ruído. Diante dos resultados positivos do estudo de caso, o uso estimação de ToA por aumento relativo de energia em um sistema automatizado é defendida pelos autores.

Os métodos de detecção acústico e de UHF em uma GIS foram comparados por Qi et al (2010). Para este propósito, modelos das cinco fontes de DP foram desenvolvidos usando fios de alumínio e um cilindro coaxial preenchido por SF₆. Foram comparadas as estimativas de carga aparente e da tensão de injeção das descargas. O método de detecção por UHF se mostrou superior nos cinco cenários estudados. Esse resultado reforça o potencial dos métodos de monitoramento de descargas parciais por UHF.

A localização radiométrica de uma fonte de descargas parciais com os receptores dessincronizados foi estudada por Souza Neto (2014) em sua tese de doutorado. Para tanto, ele utilizou apenas as energias dos pulsos de DP. Além disso, fez-se uso de um detector de envoltória para reduzir a taxa de amostragem do sistema de detecção. A desnecessidade do sincronismo e a redução da taxa de amostragem tornam o sistema de localização mais barato, o que viabiliza o uso de um grande número de receptores. Devido às características dos pulsos de DP, uma antena omnidirecional de banda larga foi usada na detecção desses sinais.

Diante do uso crescente dos métodos de monitoramento não convencionais, Álvarez et al (2015) propuseram o uso conjunto de sensores de UHF e HFCT para o monitoramento de instalações de alta tensão constituídas por GIS e cabos. Com esse objetivo, fontes de DP foram identificadas e localizadas com base em informações providas pelos sensores. Além disso, a fim de reduzir os custos com equipamentos de altíssima taxa de amostragem, um conversor foi usado para deslocar o espectro do sinal de UHF para a faixa de HF (*High Frequency*).

Recentemente, Zhang et al (2015) usaram uma rede de sensores sem fio (RSSF) para realizar a localização de uma fonte de DP por razão de energias em

laboratório. O experimento mostrou a viabilidade desse sistema para o monitoramento de fontes de DP. Visando à otimização do algoritmo de localização, os autores sugerem que seja realizado um mapeamento espacial do índice de perdas.

Conclusões

- O espectro dos sinais de descargas parciais varia com a rigidez dielétrica do isolante e com o tipo de descarga. Apesar disso, sabe-se que parte da energia está distribuída na banda de UHF;
- O monitoramento contínuo de instalações de alta tensão pode ser realizado com receptores UHF. Esse método tem sido utilizado para monitorar subestações isoladas a gás há pelo menos duas décadas;
- Os pulsos de DP podem ser usados para estimar a localização da fonte no interior de equipamentos ou em subestações;
- Os sinais de DP normalmente passam por um processamento antes de serem analisados ou usados para a localização da fonte de DP. Esse processamento pode incluir o cancelamento de ruído e a eliminação de interferências.

Na Tabela 1, encontram-se indicados os temas abordados pelos autores dos trabalhos citados neste capítulo. Nela, encontram-se indicados os trabalhos que abordam a detecção de descargas parciais, a localização de descargas parciais e a modelagem ou simulação de descargas parciais. Os três temas estão relacionados às contribuições dadas no presente trabalho.

TABELA 1 – ENFOQUES DE PARTE DOS CITADOS NESTE CAPÍTULO.

Referência	Enfoque do Trabalho		
	Detecção Radiométrica de DP	Localização Radiométrica de DP	Modelagem ou Processamento de DP
Hampton e Meats (1988)	X		
Pearson et al (1991)	X		
Pearson et al (1995)	X		
Hikita et al (1998)	X		
Judd et al (1999)	X	X	
Judd et al (2000)	X	X	
Judd, Yang e Hunter (2005)			X
Moore et al (2005)		X	
Shen e El-Saadany (2006)		X	X
Rengarajan et al (2008)		X	
Kakeeto et al (2008)		X	X
Pinpart e Judd (2009)			X
Qi et al (2010)	X		
Souza Neto (2014)		X	
Álvares et al (2015)	X	X	
Zhang et al (2015)		X	
Este trabalho		X	X

4 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS

Neste capítulo, estão descritas a técnica híbrida proposta neste trabalho e as três técnicas de localização usadas de descargas parciais usadas para avaliá-la. Essas técnicas independem do conhecimento prévio do instante de transmissão do sinal (t_0) e da sua energia inicial (E_t). Inicialmente, é apresentado o modelo de propagação de Friis, o qual descreve a propagação de sinais no espaço livre. É nele que se baseia o equacionamento da localização por razão de energias.

4.1 MODELO DE PROPAGAÇÃO DE FRIIS

Um modelo de propagação relaciona as potências dos sinais recebido e transmitido. Em um ambiente semelhante ao espaço livre, o modelo de propagação de Friis (1946) descreve bem as perdas por espalhamento de energia ao longo do percurso. Supondo que as antenas transmissora e receptora sejam isotrópicas, a potência recebida é dada por:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (3.1)$$

em que P_t é a potência do sinal transmitido, G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente, λ é o comprimento de onda da frequência central da banda da antena e R é a distância percorrida pelo sinal.

A frente de onda irradiada por uma antena isotrópica é esférica. Sendo o raio da esfera igual à distância entre a sua superfície e a antena transmissora, um elemento de superfície da esfera aumenta com a distância. Uma vez que o elemento de superfície aumenta com a distância, enquanto a energia se conserva, a densidade de potência (S) nesse elemento diminui. Por esse motivo, dá-se o nome de espalhamento de energia a essa perda.

4.2 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS

Informações como o instante de chegada e a energia de um pulso de DP podem servir para determinar a localização de uma fonte de descargas parciais. Quando os receptores operam em sincronismo, pode-se determinar a localização da fonte por multilateração usando os instantes de chegada dos pulsos detectados

por cada receptor. Segundo Miller et al (2010), dá-se o nome de multilateração à técnica de localização hiperbólica baseada na diferença entre os instantes de chegada (TDOA – *Time Difference of Arrival*) dos sinais. Já a trilateração é realizada usando circunferências geradas apenas com os instantes de chegada dos pulsos.

O conteúdo espectral de um pulso de DP também fornece evidências sobre o tipo de defeito ou equipamento que está associado às descargas (KIM et al, 2007). Essa informação pode ser útil para identificar o equipamento defeituoso.

4.2.1 LOCALIZAÇÃO POR MULTILATERAÇÃO (TDOA NÃO LINEAR)

Quando os instantes de chegada dos sinais de DP em diferentes receptores são conhecidos, pode-se realizar a localização por multilateração com base nas diferenças entre os instantes de chegada. Na Figura 11, encontra-se ilustrado o cenário de medição e estão indicadas as coordenadas dos receptores, as distâncias entre eles i e j (d_{ij}) e as distâncias entre eles e a fonte, R_k .

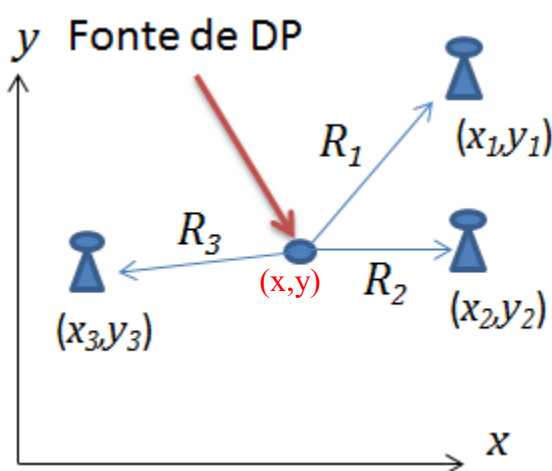


FIGURA 11 – CENÁRIO DE LOCALIZAÇÃO POR TDOA NÃO LINEAR.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

As distâncias percorridas pelos pulsos desde a fonte até os receptores são desconhecidas, pois não se sabe o instante da transmissão dos pulsos. Porém, sabe-se que o tempo que um sinal leva para percorrer uma distância R no vácuo é dado pela seguinte equação:

$$R = c \cdot (ToA - t_0) \quad (3.2)$$

em que c é a velocidade da luz no vácuo. Uma forma de eliminar a incógnita t_o consiste em subtrair as equações das distâncias de dois receptores. No caso dos repetires 2 e 3, obtém-se:

$$R_2 - R_3 = c(ToA_2 - t_o) - c(ToA_3 - t_o) = c(ToA_2 - ToA_3) \quad (3.3)$$

A fim de chegar a um sistema cujas variáveis sejam as coordenadas da fonte de DP (x,y) , as equações das distâncias euclidianas podem ser substituídas na Equação (3.3). Realizando esse procedimento para dois pares de receptores, obtém-se um sistema de equações não lineares hiperbólicas:

$$\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} = c(ToA_1 - ToA_3) \quad (3.4)$$

$$\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} = c(ToA_2 - ToA_3) \quad (3.5)$$

A interseção das hipérbolas definidas pelas equações acima deve ocorrer idealmente na localização exata da fonte de DP. Quando o número de variáveis é igual ao número de equações, a solução é única (MIZUSAWA, 1996). A localização pela interseção das hipérbolas está ilustrada na Figura 12.

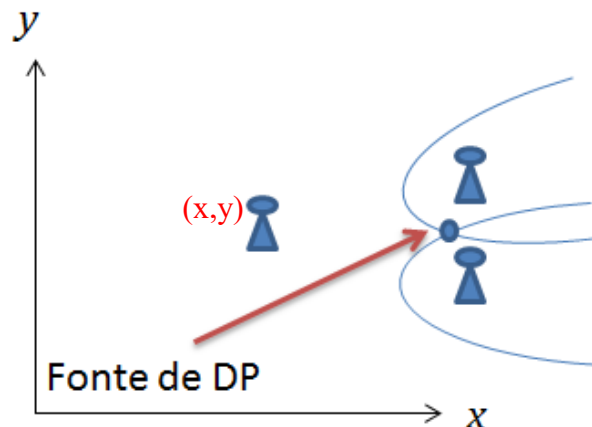


FIGURA 12 – DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DA FONTE POR MULTILATERAÇÃO.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Uma maneira de resolver o sistema não linear formado pelas equações hiperbólicas é usando o método de Newton para sistemas não lineares, que será apresentado na seção 3.3. Esse procedimento foi aplicado por Moore et al (2005) para realizar a localização de uma fonte de DP em três dimensões.

O sistema não linear pode ser linearizado usando séries de Taylor, como demonstrado por Foy (1976). Nesse caso, apesar do método de Newton tornar-se desnecessário, ainda haverá necessidade de uma condição inicial. Além disso, deve-se considerar a existência do erro de linearização. Outra alternativa é o método de Chan (1994), que é mais complexo e pode resultar na ambiguidade de raízes.

4.2.2 LOCALIZAÇÃO POR TDOA LINEAR

Uma segunda maneira de localizar uma fonte de descargas parciais baseada nos instantes de chegada pode ser obtida equações de quatro antenas. Esse cenário está ilustrado na Figura 13.

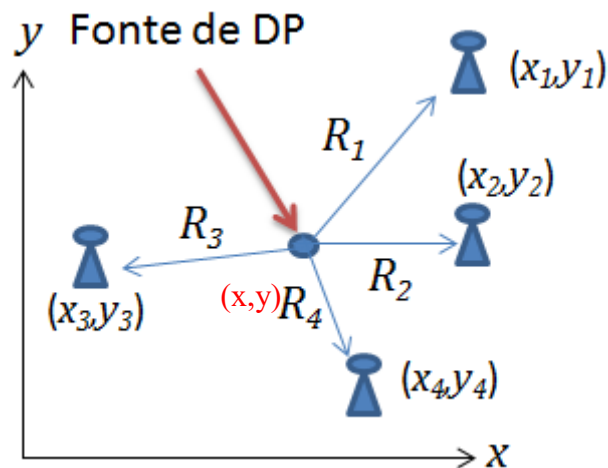


FIGURA 13 – CENÁRIO DE LOCALIZAÇÃO POR TDOA LINEAR.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

O primeiro passo para obter um sistema linear consiste em elevar ao quadrado os termos da equação (3.2) de dois receptores:

$$c^2 T o A_1^2 - 2 \cdot T o A_1 \cdot t_o + t_o^2 = (x^2 - 2 \cdot x \cdot x_1 + x_1^2) + (y^2 - 2 \cdot y \cdot y_1 + y_1^2) \quad (3.6)$$

$$c^2 T o A_2^2 - 2 \cdot T o A_2 \cdot t_o + t_o^2 = (x^2 - 2 \cdot x \cdot x_2 + x_2^2) + (y^2 - 2 \cdot y \cdot y_2 + y_2^2) \quad (3.7)$$

Subtraindo-se (3.7) de (3.6), obtém-se a seguinte equação:

$$-2 \cdot (ToA_1 - ToA_2) \cdot t_o = 2x \cdot (x_1 - x_2) + 2y \cdot (y_1 - y_2) + \gamma_2 \quad (3.9)$$

Em que:

$$\gamma_2 = (x_1^2 + x_2^2) + (y_1^2 + y_2^2) - c^2(ToA_2^2 - ToA_1^2) \quad (3.10)$$

Por fim, realiza-se o reordenamento dos termos de (3.9) para obter a equação na sua forma final:

$$2t_o \cdot (ToA_1 - ToA_2) + 2x \cdot (x_1 - x_2) + 2y \cdot (y_1 - y_2) = -\gamma_2 \quad (3.11)$$

Outras duas equações, semelhantes à 3.11, podem ser obtidas repetindo esse procedimento com outros três pares de receptores. As três equações formam um sistema linear cujas variáveis são t_o , x e y :

$$2t_o \cdot (ToA_1 - ToA_2) + 2x \cdot (x_1 - x_2) + 2y \cdot (y_1 - y_2) = -\gamma_2 \quad (3.12)$$

$$2t_o \cdot (ToA_1 - ToA_3) + 2x \cdot (x_1 - x_3) + 2y \cdot (y_1 - y_3) = -\gamma_3 \quad (3.13)$$

$$2t_o \cdot (ToA_1 - ToA_4) + 2x \cdot (x_1 - x_4) + 2y \cdot (y_1 - y_4) = -\gamma_4 \quad (3.14)$$

Em que

$$\gamma_3 = (x_1^2 + x_3^2) + (y_1^2 + y_3^2) - c^2(ToA_3^2 - ToA_1^2) \quad (3.15)$$

$$\gamma_4 = (x_1^2 + x_4^2) + (y_1^2 + y_4^2) - c^2(ToA_4^2 - ToA_1^2) \quad (3.16)$$

Sendo $[t_o \ x \ y]^T$, o sistema linear pode ser resolvido com a seguinte equação:

$$X = A^{-1}b \quad (3.17)$$

Em que

$$A = \begin{bmatrix} 2(ToA_1 - ToA_2) & 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) \\ 2(ToA_1 - ToA_3) & 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) \\ 2(ToA_1 - ToA_4) & 2(x_1 - x_4) & 2(y_1 - y_4) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

e

$$b = \begin{bmatrix} (x_1^2 + x_2^2) + (y_1^2 + y_2^2) - c^2(ToA_2^2 - ToA_1^2) \\ (x_1^2 + x_3^2) + (y_1^2 + y_3^2) - c^2(ToA_3^2 - ToA_1^2) \\ (x_1^2 + x_4^2) + (y_1^2 + y_4^2) - c^2(ToA_4^2 - ToA_1^2) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Ao contrário da multilateração, esta técnica de localização não requer uma condição inicial. Adicionalmente, ela fornece uma estimativa do instante de transmissão (t_0) dos pulsos.

4.2.3 LOCALIZAÇÃO PELA RAZÃO DAS POTÊNCIAS

A localização radiométrica da fonte de DP também pode ser realizada com base na razão das potências (ou das energias) dos sinais detectados por diferentes receptores (Souza Neto, 2012). Essa técnica parte do pressuposto de que a distância de que cada receptor está situado no centro de uma circunferência, cujo raio é igual à distância entre transmissor e receptor. A interseção das circunferências coincide com a posição da fonte de DP, conforme ilustrado na Figura 14.

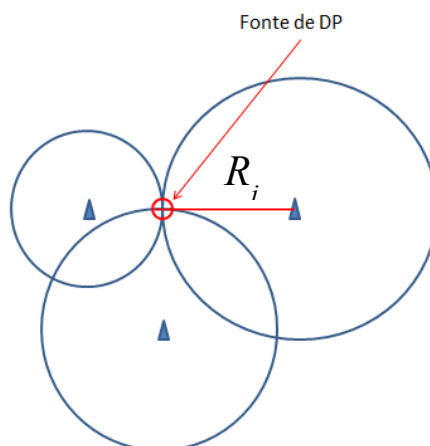


FIGURA 14 – DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DA FONTE USANDO CIRCUNFERÊNCIAS.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Para a localização bidimensional, utilizam-se ao menos três receptores. Nesse caso, o sistema não linear seria composto pelas equações das circunferências. Uma forma de evitar a solução não linear consiste em adicionar ao menos um receptor extra. As circunferências centradas nos quatro receptores são descritas pelas seguintes equações

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = R_1^2 \quad (3.20)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = R_2^2 \quad (3.21)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = R_3^2 \quad (3.22)$$

$$(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 = R_4^2 \quad (3.24)$$

Em que x_i e y_i ($i = 1, 2, 3$ e 4) são as coordenadas dos receptores e R_i são os raios das circunferências. Em seguida, se as equações forem desenvolvidas, obtém-se:

$$x^2 - 2xx_1 + x_1^2 + y^2 - 2yy_1 + y_1^2 = R_1^2 \quad (3.25)$$

$$x^2 - 2xx_2 + x_2^2 + y^2 - 2yy_2 + y_2^2 = R_2^2 \quad (3.26)$$

$$x^2 - 2xx_3 + x_3^2 + y^2 - 2yy_3 + y_3^2 = R_3^2 \quad (3.27)$$

$$x^2 - 2xx_4 + x_4^2 + y^2 - 2yy_4 + y_4^2 = R_4^2 \quad (3.28)$$

Em seguida, deve-se subtrair (3.25) das demais equações, a fim de eliminar x^2 e y^2 . O resultado é o seguinte conjunto de três equações:

$$2xx_1 - 2xx_2 + x_2^2 - 2yy_2 + 2yy_1 + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2 = R_2^2 - R_1^2 \quad (3.29)$$

$$2xx_1 - 2xx_3 + x_3^2 - 2yy_3 + 2yy_1 + y_3^2 - y_1^2 - x_1^2 = R_3^2 - R_1^2 \quad (3.30)$$

$$2xx_1 - 2xx_4 + x_4^2 - 2yy_4 + 2yy_1 + y_4^2 - y_1^2 - x_1^2 = R_4^2 - R_1^2 \quad (3.31)$$

As constantes do lado esquerdo das equações podem ser reunidas em α_1 , α_2 e α_3 :

$$\alpha_2 = x_2^2 + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2 \quad (3.32)$$

$$\alpha_3 = x_3^2 + y_3^2 - y_1^2 - x_1^2 \quad (3.33)$$

$$\alpha_4 = x_4^2 + y_4^2 - y_1^2 - x_1^2 \quad (3.34)$$

Nesse ponto, o número de incógnitas das equações (3.32)-(3.34) ainda precisa ser reduzido. Supondo que o modelo de propagação de Friis descreve a propagação dos sinais detectados pelos quatro receptores, o raio R_1 pode ser relacionado aos demais por meio das seguintes equações:

$$R_2 = R_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R2}}} \quad (3.35)$$

$$R_3 = R_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R3}}} \quad (3.36)$$

$$R_4 = R_1 \sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R4}}} \quad (3.37)$$

Parâmetros como os ganhos das antenas transmissora e receptora nas direções de chegada dos sinais devem ser iguais para que essa relação seja válida. O n das equações (3.35)-(3.37) é chamado de índice de perdas e é igual a 2 no espaço livre (FRIIS, 1946).

Substituindo as distâncias R_2 , R_3 e R_4 pelas equações (3.29)-(3.31), obtém-se três equações com três incógnitas (R_1 , x e y):

$$R_1^2 \left[\left(\sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R2}}} \right)^2 - 1 \right] + x(2x_2 - 2x_1) + y(2y_2 - 2y_1) = \alpha_2 \quad (3.38)$$

$$R_1^2 \left[\left(\sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R3}}} \right)^2 - 1 \right] + x(2x_3 - 2x_1) + y(2y_3 - 2y_1) = \alpha_3 \quad (3.39)$$

$$R_1^2 \left[\left(\sqrt[n]{\frac{P_{R1}}{P_{R4}}} \right)^2 - 1 \right] + x(2x_4 - 2x_1) + y(2y_4 - 2y_1) = \alpha_4 \quad (3.40)$$

O sistema linear composto por essas três equações pode ser resolvido com a equação (3.17).

4.2.4 LOCALIZAÇÃO POR TDOA E ENERGIA (TÉCNICA HÍBRIDA)

Esta técnica híbrida é uma das contribuições deste trabalho. Ela foi desenvolvida com base nas diferenças entre os instantes de chegada e nas razões de energias dos sinais captados pelos receptores. A técnica híbrida aproveita as informações de energia e ToA disponíveis para reduzir a número de receptores

necessários para a localização. A estimativa da posição da fonte de DP também serve como condição inicial para a multilateração.

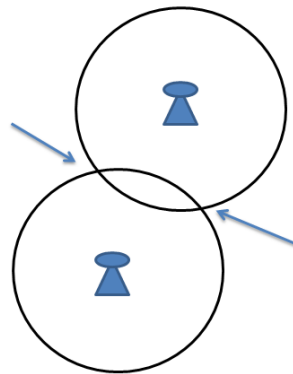
Supondo que, assim como na localização por razão de energias, cada receptor se encontra no centro de uma circunferência, a interseção de pelo menos três circunferências deve coincidir com a localização exata da fonte de DP. Se apenas duas antenas fossem usadas, as circunferências poderiam se interceptar em até dois pontos, como ilustrado na Figura 15.

Sendo $\Delta t = T_oA - t_o$, em que t_o é o instante de transmissão do sinal em todas as direções, uma relação de igualdade pode ser usada para relacionar três receptores:

$$t_o = T_oA_1 - \frac{R_1}{c} = T_oA_2 - \frac{R_2}{c} = T_oA_3 - \frac{R_3}{c} \quad (3.41)$$

Os parâmetros referentes aos receptores 2 e 3 que fazem parte de (3.41) podem ser organizados da seguinte forma:

$$(R_2 - R_3) = (T_oA_2 - T_oA_3) \cdot c \quad (3.42)$$



Duas Interseções

FIGURA 15 – INTERSEÇÕES DE DUAS CIRCUNFERÊNCIAS.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Considerando que as perdas dos sinais captados por todas as antenas obedecem à equação de propagação de Friis, a razão das energias certamente pode ser considerada válida. Os raios das circunferências dos receptores 2 e 3 podem ser relacionados pela seguinte razão:

$$R_2 = R_3 \sqrt[n]{\frac{P_{R3}}{P_{R2}}} \quad (3.43)$$

Substituindo (3.43) em (3.42), obtém-se:

$$R_3 = \frac{c(ToA_2 - ToA_3)}{\left(\sqrt[n]{\frac{P_{R3}}{P_{R2}}} - 1\right)} \quad (3.44)$$

De posse da distância R_3 , pode-se obter os valores das outras distâncias a partir das razões de energias.

Sendo conhecidas as coordenadas dos receptores e as distâncias percorridas pelos pulsos de DP, as equações das circunferências das três antenas podem ser desenvolvidas para obter as equações (3.25)-(3.27). Os termos de (3.27) podem ser manipulados para obter a seguinte equação:

$$x^2 + y^2 = R_3^2 + 2yy_3 - y_3^2 + 2xx_3 - x_3^2 \quad (3.45)$$

Subtraindo os termos de (3.45) das equações (3.25) e (3.26), obtêm-se duas novas equações:

$$R_3^2 + 2yy_3 - y_3^2 + 2xx_3 - x_3^2 - 2xx_1 + x_1^2 - 2yy_1 + y_1^2 = R_1^2 \quad (3.46)$$

$$R_3^2 + 2yy_3 - y_3^2 + 2xx_3 - x_3^2 - 2xx_2 + x_2^2 - 2yy_2 + y_2^2 = R_2^2 \quad (3.47)$$

As constantes das duas equações do sistema linear podem ser reunidas em duas novas constantes, α e β :

$$\alpha = R_3^2 - y_3^2 - x_3^2 + x_1^2 + y_1^2 \quad (3.48)$$

$$\beta = R_3^2 - y_3^2 - x_3^2 + x_2^2 + y_2^2 \quad (3.49)$$

Com essas modificações, obtém-se a forma final das duas equações do sistema:

$$(2x_3 - 2x_1)x + (2y_3 - 2y_1)y = R_1^2 - \alpha \quad (3.50)$$

$$(2x_3 - 2x_2)x + (2y_3 - 2y_2)y = R_2^2 - \beta \quad (3.51)$$

O sistema linear pode ser resolvido por meio da equação (3.17), em que:

$$A = \begin{bmatrix} (2x_3 - 2x_1) & (2y_3 - 2y_1) \\ (2x_3 - 2x_2) & (2y_3 - 2y_2) \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$b = \begin{bmatrix} R_1^2 - \alpha \\ R_2^2 - \beta \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Com esse sistema linear, é possível determinar as coordenadas x e y da fonte de descargas parciais com três receptores.

Uma vez que a o método de estimação de ToA pelo critério da energia envolve o cálculo da energia do sinal, ele pode ser usado para obter simultaneamente a energia e o ToA do sinal de DP. Em seguida, basta usar essas informações para aplicar a técnica de localização híbrida. Esse procedimento está resumizado na Figura 16.

O procedimento baseado em energia e ToA permite que a posição da fonte de DP seja determinada de forma simplificada (com um sistema linear) usando apenas três receptores. O número reduzido de receptores permite que a estimativa fornecida pela técnica híbrida seja usada como condição inicial para a multilateração, que pode ser aplicada com pelo menos três receptores.

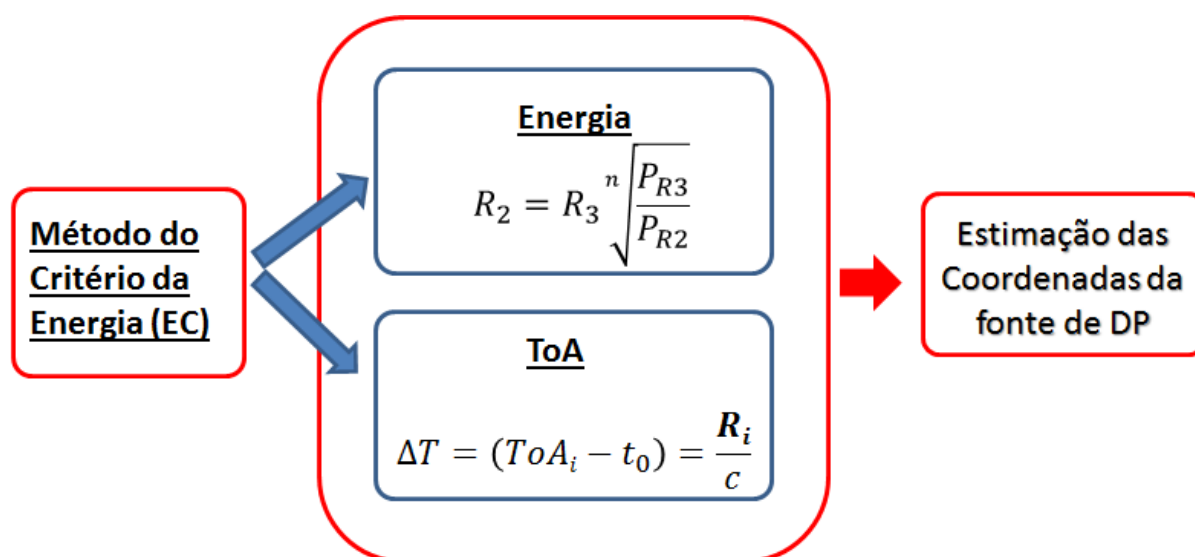


FIGURA 16 – RESUMO DO PROCEDIMENTO PARA ESTIMAR A LOCALIZAÇÃO PELA TÉCNICA HÍBRIDA.

FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Conclusões:

- As técnicas de localização por TDOA possuem a vantagem de não dependerem tanto de distorções causadas por multipercurso e ruído, visto que existem métodos de estimação de ToA precisos, como o EC;
- Uma desvantagem da técnica de localização por multilateração é a dependência de condições iniciais;
- As técnicas de localização de fontes de DP não exigem que o instante de transmissão do pulso e a energia do sinal transmitido sejam conhecidos previamente.
- Assim como na multilateração, a técnica híbrida requer ao menos três receptores para estimar a localização da fonte de DP. Por esse motivo, a técnica híbrida pode fornecer uma condição inicial para a multilateração com três receptores.

As técnicas de localização apresentadas neste capítulo se baseiam apenas em energia e ToA dos sinais. Métodos de localização por DoA não foram analisados neste trabalho.

5 MODELO COMPUTACIONAL

Neste capítulo, está descrito o modelo computacional desenvolvido para avaliar o desempenho das técnicas de localização de fontes de DP. A possibilidade de simular vários efeitos físicos é o maior atrativo desse modelo.

5.1 INTRODUÇÃO

Visando a comparar o desempenho das técnicas de localização, foi desenvolvido um ambiente de simulação baseado no *software* MATLAB/SIMULINK®. Ele funciona como um modelo físico de propagação por traçado de raios (*Ray Tracing*), o qual analisa o caminho percorrido por todos os raios emitidos pela fonte.

Um modelo de traçado de raios pode incluir os efeitos de espalhamento de energia no percurso, de reflexão, de refração, de difração e de espalhamento em superfícies (*scattering*), apesar deste último não seguir as regras da óptica geométrica (LI, 2014). Com esse modelo é possível contabilizar o efeito do recebidos por multipercurso (*multipath*), uma das principais causas da degradação dos sinais (UNAR et al, 2007).

Os efeitos físicos incluídos neste modelo são os de atenuação por espalhamento de energia, de reflexão e as perdas por refração dos sinais. O número de incidências (NR) nas paredes e obstáculos é configurável.

Os ambientes são delimitados por quatro paredes de concreto e possui obstáculos internos retangulares, cujas propriedades elétricas e magnéticas (permissividade, permeabilidade e condutividade) podem ser configuradas. O índice de reflexão (Γ), calculado com base no ângulo de incidência do raio e nas características do material que compõe a superfície de incidência, serve para calcular a perda por transmissão nessa superfície.

A fonte de DP e as antenas receptoras do modelo são isotrópicas. Essas antenas receptoras podem ser posicionadas de forma a simular cenários com linha de visão (LOS, *Line-of-Sight*) e sem linha de visão (NLOS, *Non-Line-of-Sight*).

5.2 FUNCIONAMENTO DO MODELO DE TRAÇADO DE RAIOS

A metodologia escolhida para programar o modelo de traçado de raios foi a SBR (*Shooting and Bouncing Ray*), que normalmente exige um tempo de simulação inferior ao de outras metodologias (YUN e ISKANDER, 2015), além de ser mais intuitivo. Em contrapartida, ela não é tão precisa quanto as outras metodologias (SCHETTINO et al, 2007).

A simulação pode ser dividida em cinco etapas:

- Testes de interseção com os obstáculos e paredes e cálculo das atenuações por transmissão (por meio dos ângulos de transmissão e coeficientes de reflexão);
- Geração da forma de onda do sinal de descargas parciais;
- Teste de recepção do sinal pelas antenas;
- Cálculo da atenuação por espalhamento de energia ao longo do percurso;
- Localização da fonte de DP usando as quatro técnicas.

A seguir, as etapas da simulação serão apresentadas em detalhes.

5.2.1 TESTES DE INTERSEÇÃO

Quando a simulação é iniciada, a fonte de DP emite raios nas direções dos múltiplos do ângulo de incremento. Por exemplo, se o ângulo de incremento fosse de 60°, os múltiplos seriam 0°, 60°, 180°, 240°, 300° e 360°. Em seguida, a existência de obstáculos nessas direções é verificada. Se for confirmada a existência de uma interseção, o programa calcula – com base em seus parâmetros elétricos e magnéticos – o ângulo de reflexão (θ_r), o ângulo de transmissão (θ_t), a impedância do meio (η) e o coeficiente de reflexão (Γ). Com essas informações, é possível determinar a atenuação sofrida pelo sinal de DP. Na figura 17, encontram-se indicados alguns desses parâmetros.

A reflexão foi implementada de acordo com a lei de Snell, a qual afirma que o ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão. Isto é:

$$\theta_r = \theta_i \tag{5.1}$$

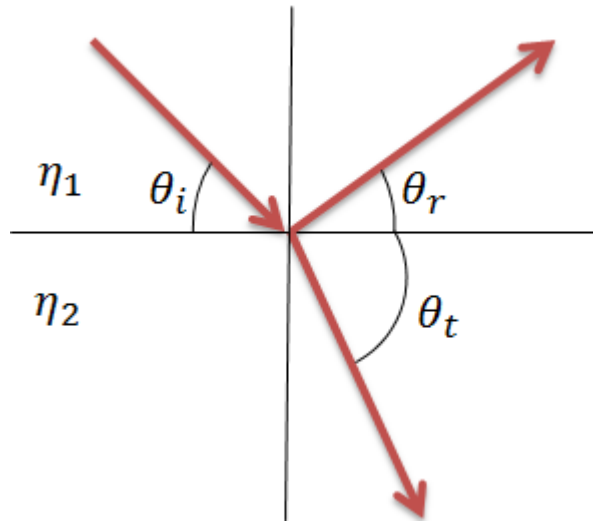


FIGURA 17 - RAIOS INCIDENTE, REFLETIDO E TRANSMITIDO.
 FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

O módulo do sinal refletido é dado pelo produto do coeficiente de reflexão pelo módulo do sinal incidente. De acordo com Rappaport (2002), quando a polarização do sinal é perpendicular ao plano de incidência, o coeficiente de reflexão é dado por:

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{(\eta_2 \text{sen} \theta_i - \eta_1 \text{sen} \theta_t)}{(\eta_2 \text{sen} \theta_i + \eta_1 \text{sen} \theta_t)}, \tag{5.2}$$

em que E_r é o campo elétrico refletido, E_i é o campo elétrico incidente, η_1 e η_2 são as impedâncias do meio 1 e do meio 2, respectivamente, θ_i é o ângulo de incidência e θ_t é o ângulo de transmissão. Segundo Hayt e Buck (2003), a impedância de um meio pode ser calculada por:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{(\sigma + j\omega\varepsilon)}} \tag{5.3}$$

em que σ é a condutividade, ε é a permissividade elétrica e μ é a permeabilidade magnética do meio. A impedância intrínseca do vácuo é aproximadamente igual a 377 Ω . O cálculo do ângulo de transmissão é feito usando:

$$\theta_t = 90^\circ - \text{asen} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1}{\epsilon_2 \mu_2}} \text{sen}(90^\circ - \theta_i) \right) \quad (5.4)$$

O termo $\sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1}{\epsilon_2 \mu_2}}$ é a razão das velocidades da luz nos dois meios.

No modelo apresentado, as paredes e os obstáculos podem ser de concreto, aço de máquinas e porcelana. Os parâmetros dos três materiais (HAYT, 2003) e as impedâncias na frequência de 350 MHz estão elencados na Tabela 1. Apesar do espectro se estender até aproximadamente 1 GHz, grande parte da energia se concentra em torno da frequência de 350 MHz, como será explicado a seguir.

As curvas de impedância dos três materiais estão ilustradas nas Figuras 18, 19 e 20. As impedâncias do concreto e da porcelana praticamente não variam com a frequência, enquanto a do aço de máquinas apresenta uma variação maior ao longo de toda a faixa de frequência.

TABELA 2 - PARÂMETROS DOS MATERIAIS SIMULADOS.

Material	Propriedades Elétricas e Magnéticas dos Materiais			Impedância do meio em 350 MHz (Ω)
	μ_r (B/H)	ϵ_r (F/m)	σ (S)	
Concreto	1,0000	5,3100	0,8095	163,3094
Aço de Máquinas	800,0000	1,0000	10^7	28,2019
Porcelana	1,0000	6,0000	10^{-10}	153,7995

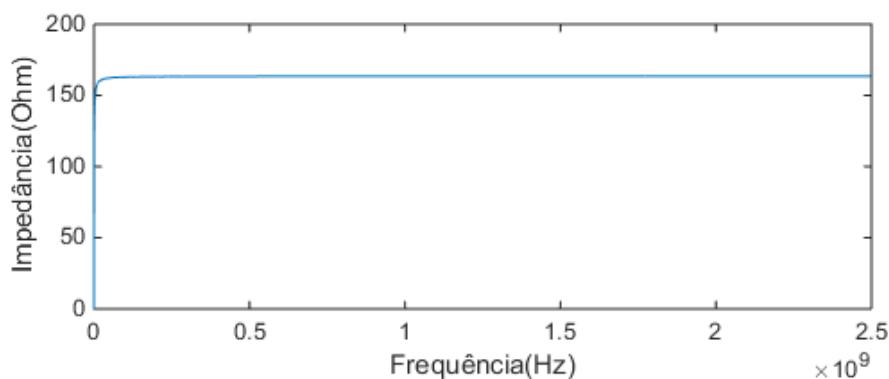


FIGURA 18 - CURVA DE IMPEDÂNCIA DO CONCRETO. FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

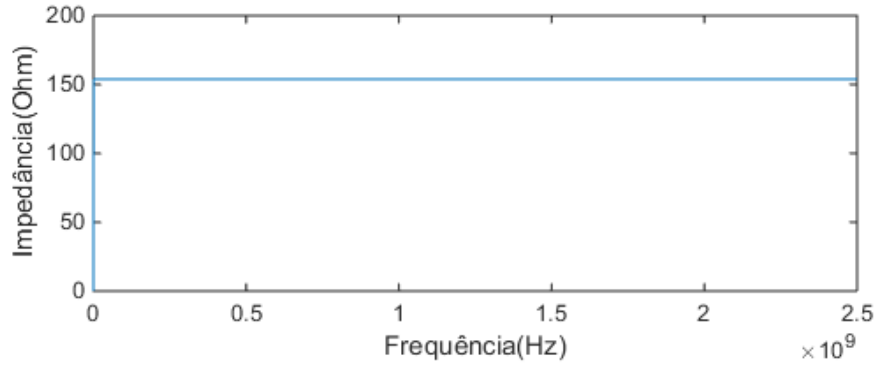


FIGURA 19 - CURVA DE IMPEDÂNCIA DA PORCELANA.
 FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

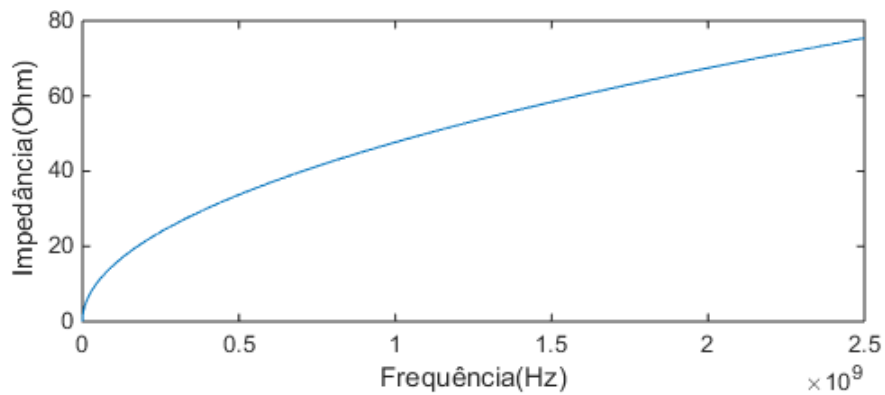


FIGURA 20 - CURVA DE IMPEDÂNCIA DO AÇO DE MÁQUINAS.
 FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

O mecanismo de reflexão do modelo está exemplificado na Figura 21. Nele, encontra-se ilustrado o percurso do raio disparado na direção de 40° e os seus pontos de reflexão (P1...10). O raio forma ângulos de 50° com a vertical e 40° com a horizontal. Sendo as paredes feitas de concreto e os obstáculos feitos de metal, os coeficientes de reflexão nos dez pontos de incidência podem ser calculados usando as equações apresentadas neste capítulo e os dados da Tabela 2. Os coeficientes de reflexão e os ângulos de incidência do raio nos dez pontos de incidência estão elencados na Tabela 3.

Desconsiderando as perdas por espalhamento ao longo do percurso, o sinal teria perdido aproximadamente 85% de sua energia após a décima reflexão, o que pode ser constatado multiplicando-se os coeficientes em todos os pontos de reflexão, em conformidade com a Equação (5.2).

No modelo, as informações referentes às trajetórias dos raios são armazenados em variáveis específicas, que podem ser consultadas a qualquer momento.

TABELA 3 - ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA E MÓDULOS DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO NOS DEZ PONTOS DE INCIDÊNCIA.

Ponto de Reflexão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ângulo de incidência (°)	50	40	50	50	50	50	50	40	50	50
$ \Gamma $	0,9943	0,7598	0,7228	0,9943	0,7228	0,9943	0,7228	0,7598	0,9943	0,7228

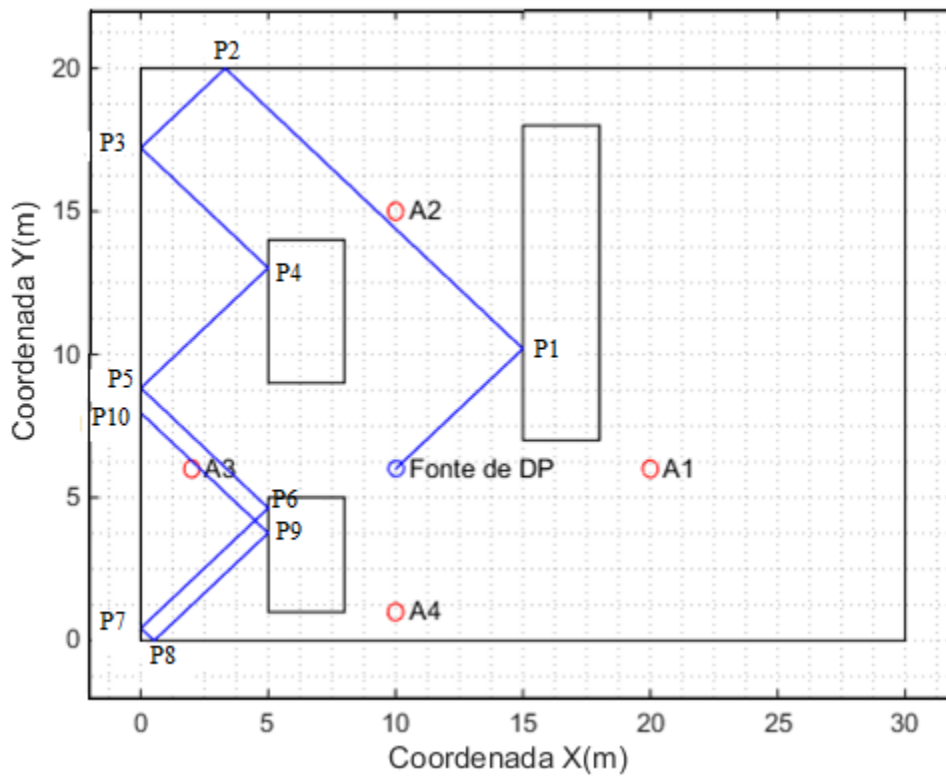


FIGURA 21 – PERCURSO DE UM RAI O DISPARADO COM UM ÂNGULO DE 40°. FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

5.2.2 GERAÇÃO DO SINAL DE DESCARGAS PARCIAIS

A fonte de descargas parciais foi simulada usando o sistema ilustrado na Figura 22. Ele foi implementado usando o *software* Simulink©. A derivada do trem de pulsos é um trem de impulsos. Os blocos *step* e *step1* servem para isolar um único

impulso desse trem. Para tornar o impulso unitário, ele deve ser multiplicado por uma constante (*Gain*). Uma forma de onda subamortecida pode ser obtida quando o impulso unitário é injetado em uma função de transferência de segunda ordem:

$$H(\omega) = \frac{\omega_0^2}{S^2 + 2\omega_0\xi S + \omega_0^2} \tag{5.5}$$

Em que ω_0 é a frequência natural e ξ é o coeficiente de amortecimento. Foi escolhida uma frequência natural de 350 MHz. O espectro do sinal de DP estudado por Zhou et al (2005) possui um pico próximo a essa frequência. O coeficiente de amortecimento de 0,0303 foi escolhido de forma que o pulso de DP decaia em aproximadamente 100 ns, um valor inferior à duração típica de 1 μ s (RENGARAJAN et al, 2008). A amplitude e o instante de transmissão do sinal de DP são ajustados usando blocos de ganho e atraso, respectivamente. A saída do sistema está ilustrada na Figura 23.

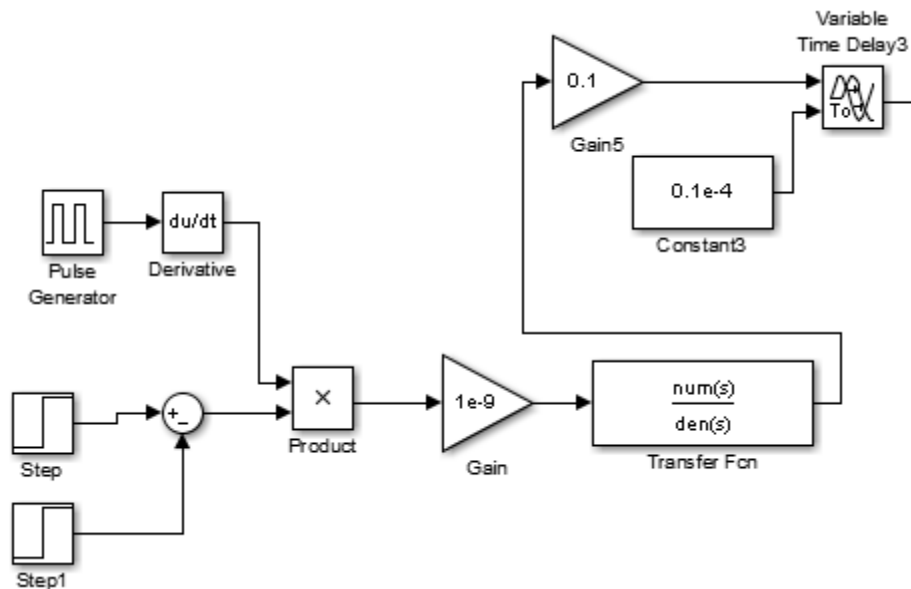


Figura 22 – GERADOR DE PULSOS DE DESCARGAS PARCIAIS.

FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

O nível do ruído gaussiano adicionado ao sinal de DP é ajustado por meio do seu desvio-padrão. A relação entre o desvio-padrão e a potência de ruídos com média zero é dada por:

$$\sigma_{ruído} = \sqrt{P_{ruído}} \tag{5.6}$$

Um parâmetro que pode ser usado para avaliar o desempenho das técnicas de localização é a relação sinal-ruído (SNR, *Signal to Noise Ratio*), dada por:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{ruído}}} \right) \quad (5.7)$$

Essa equação indica o quão maior é a potência total do sinal em relação à potência total do ruído.

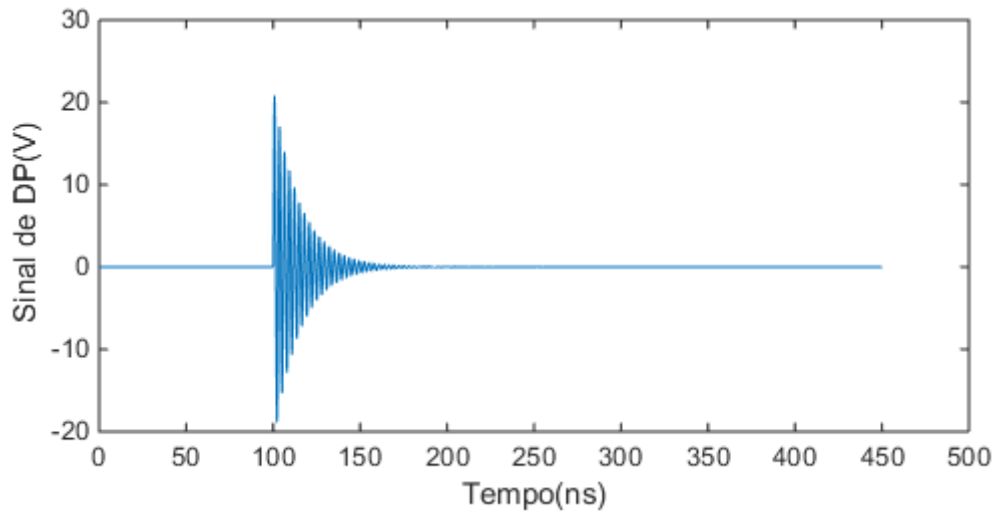


Figura 23 – PULSO DE DESCARGAS PARCIAIS USADO NO MODELO.

FORNE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

5.2.3 TESTE DE RECEPÇÃO

Como descrito por Yun e Iskander (2015), em modelos de traçado de raios do tipo SBR, um sinal é detectado pelo receptor quando o raio intercepta uma circunferência centrada no receptor. Nos modelos de traçado de raios atuais, essas circunferências simulam a região de influência dos raios (UNAR, 2006). Por esse motivo, o diâmetro dela varia com o comprimento do raio e o ângulo de incremento entre dois raios adjacentes (SAEIDI et al, 2009). Neste trabalho, foi adotado um diâmetro fixo de vinte centímetros, apenas para permitir o teste de recepção.

Neste modelo, o teste de interseção tem três possíveis resultados: apenas uma interseção, duas interseções ou nenhuma interseção com a circunferência. Essas três possibilidades estão ilustradas na Figura 24.

Quando há duas interseções do raio com uma circunferência, considera-se que o sinal foi detectado na interseção mais próxima do ponto de partida do raio.

O teste de recepção do modelo é realizado para cada segmento existente entre dois pontos de incidência. Na Figura 21, por exemplo, pode-se observar que a

circunferência do receptor A3 é interceptada apenas pelo segmento existente entre P9 e P10.

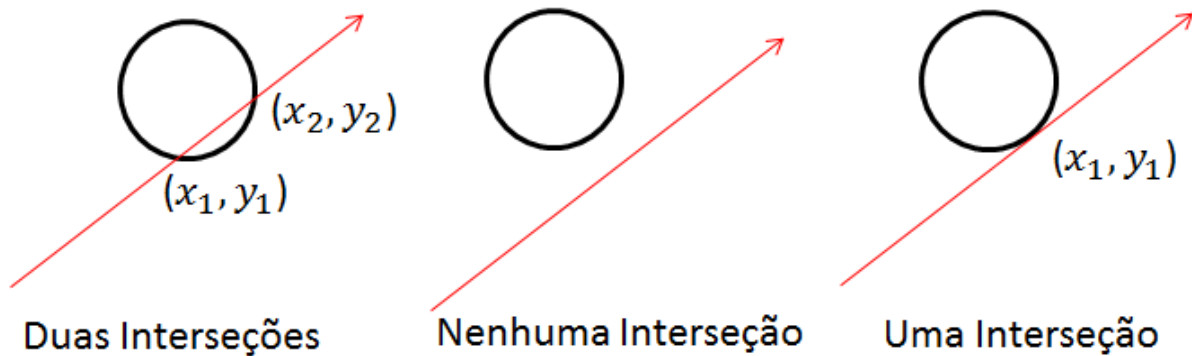


FIGURA 24 – POSSÍVEIS RESULTADOS DO TESTE DE RECEPÇÃO DO RAIOS.
 FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

5.2.4 PERDAS POR ESPALHAMENTO

No modelo, as perdas por espalhamento de energia dependem apenas da distância percorrida pelo sinal, pois o ganho de potência de antenas isotrópicas é unitário (HAYKIN, 2009). A distância total percorrida por um raio, desde a fonte de DP até o ponto de interseção com a circunferência, é conhecida. Usando essa informação e a equação de transmissão de Friis no espaço livre, pode-se calcular a perda por espalhamento sofrida pelo sinal ao longo do percurso.

5.2.5 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO

A localização da fonte de DP é estimada usando as três técnicas existentes na literatura e a híbrida proposta neste trabalho. A fim de demonstrar o funcionamento dos algoritmos de localização, um teste foi realizado. Nele, o ângulo de incremento do simulador foi fixado em 45°, as reflexões foram desabilitadas e as antenas foram mantidas nas mesmas posições apresentadas na Figura 21.

Uma das métricas usadas para avaliar a qualidade da estimativa de localização ou erro inerente de estimação consiste em calcular a distância euclidiana entre a posição da fonte de DP e a posição estimada (\hat{x}, \hat{y}):

$$ERRO = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2} \tag{5.8}$$

A fonte de DP foi posicionada nas coordenadas (10;6) e as coordenadas x e y das quatro antenas receptoras estão elencadas na Tabela 4. As antenas 1, 3 e 4 foram usadas na multilateração e na técnica híbrida.

TABELA 4 - COORDENADAS DAS ANTENAS RECEPTORAS NO TESTE.

Sensor	1	2	3	4
Coordenada x	14,0000	10,0000	15,0000	2,0000
Coordenada y	10,0000	14,0000	1,0000	6,0000

Nesse teste, o resultado da técnica híbrida foi usado como condição inicial para a técnica de multilateração. Os resultados da localização estão elencados na Tabela 5. Todas as técnicas forneceram estimativas com erros inferiores a dez centímetros. Esses erros costumam ser maiores em cenários com multipercurso e ruído.

TABELA 5 - RESULTADOS DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE.

Técnica	Estimativa das Coordenadas da Fonte (m)		Erro (m)
	X	Y	
TDOA Linear	9,9241	4,9686	0,0821
TDOA Não-Linear	9,9634	4,9817	0,0409
Razão das Energias	10,0271	5,0075	0,0281
Híbrida	9,9796	4,9871	0,0241

Como foi dito nos capítulos anteriores, a estimativa da técnica híbrida é dada pela interseção das circunferências cujos raios vão das coordenadas dos receptores até a fonte de DP, como está ilustrado na Figura 25. As hipérbolas da multilateração também se interceptam na posição da fonte de DP, conforme ilustrado na Figura 26.

Um segundo teste, dessa vez considerando o multipercurso, também foi realizado. No mesmo ambiente, foi escolhido um NR igual a dez, um ângulo de incremento de 1° e o diâmetro da circunferência de recepção fixo em 20 cm.

Os resultados das técnicas de localização no segundo teste estão elencados na Tabela 6. As técnicas de localização por TDOA foram menos afetadas pelo multipercurso, pois dependem inteiramente das estimativas de ToA. Os erros das

técnicas de razão de energias e híbrida se devem à distorção de energia provocada pelos efeitos distintos do multipercurso em cada receptor.

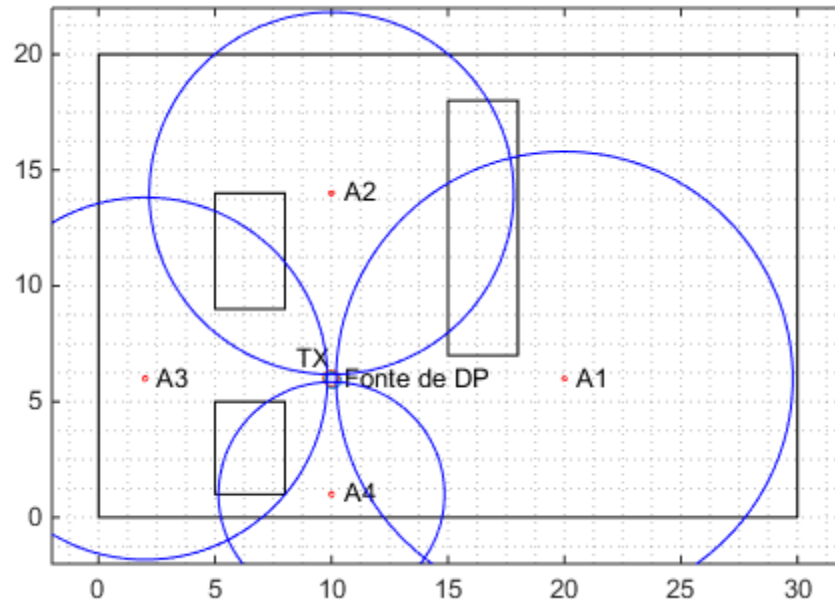


Figura 25 – INTERSEÇÃO DAS CIRCUNFERÊNCIAS NA TÉCNICA HÍBRIDA.
 FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

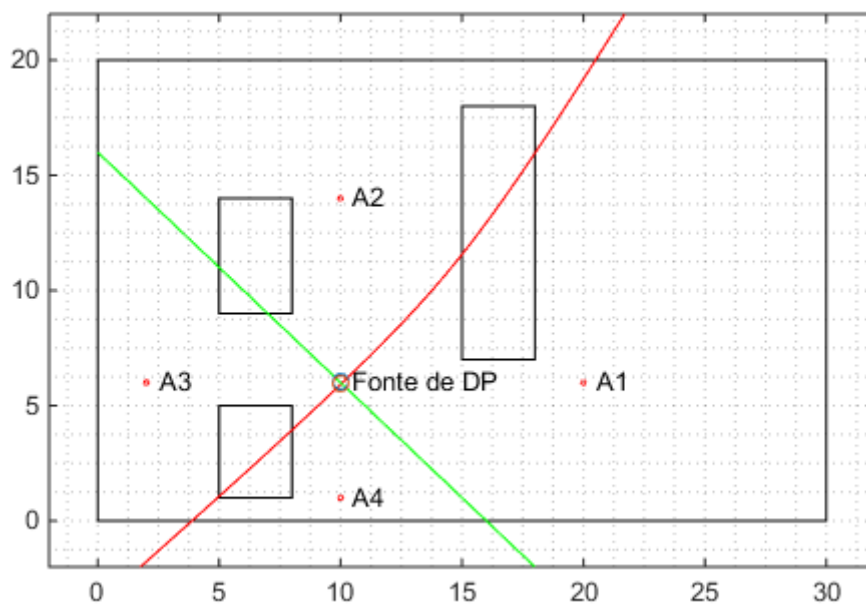


Figura 26 – INTERSEÇÃO DAS HIPÉRBOLES NA MULTILATERAÇÃO.
 FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

TABELA 6 – RESULTADOS DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO COM MULTIPERCURSO.

Técnica	Estimativa das Coordenadas da Fonte (m)		Erro (m)
	X	Y	
TDOA Linear	10,0154	5,9846	0,0218
TDOA Não-Linear	10,0082	5,9758	0,0255
Razão das Energias	9,3480	5,6232	0,7530
Híbrida	9,1462	5,1513	1,2039

5.3 MODELO DA SUBESTAÇÃO DE ALTA TENSÃO

Nas simulações do cenário de subestação, a propagação foi simulada no esboço simplificado ilustrado na Figura 27. Os obstáculos desse esboço representam alguns elementos típicos desse tipo de instalação.

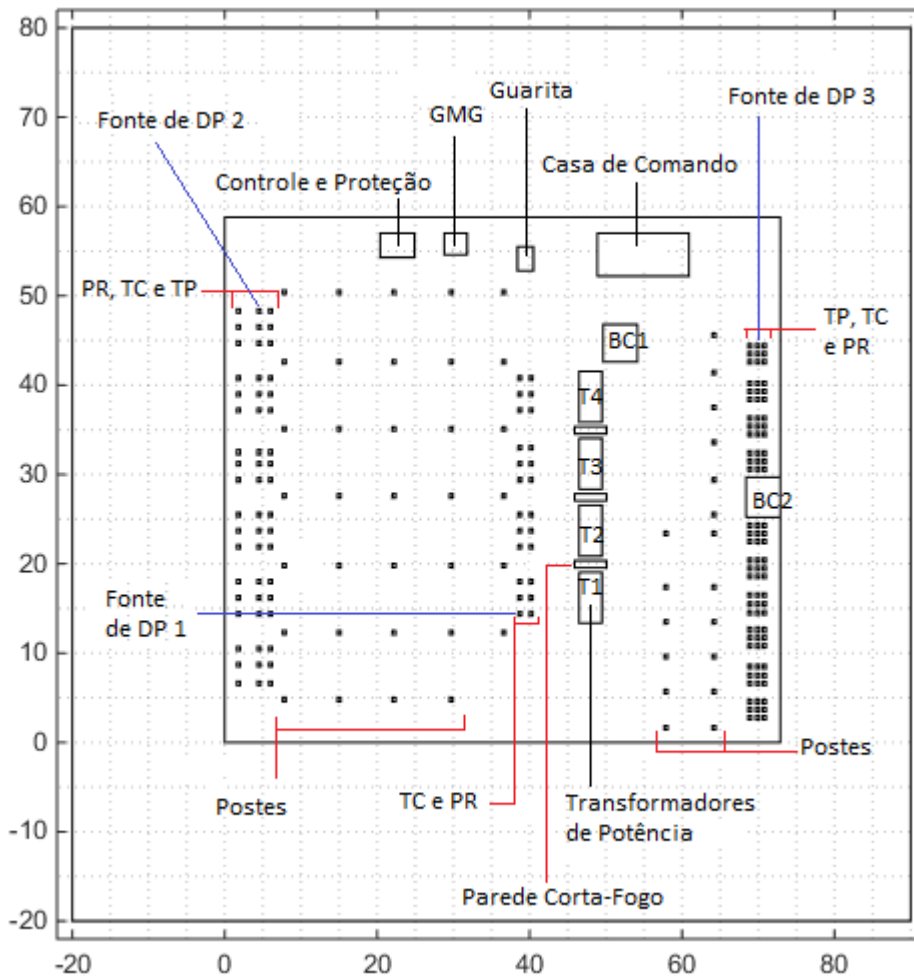


FIGURA 27 – DISTRIBUIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO DE ALTA TENSÃO. FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Os transformadores de potencial (TP), transformadores de corrente (TC) e para-raios (PR) foram modelados como blocos de porcelana; a casa de comando, a guarita, a casa de GMG (grupo motor-gerador), os postes a casa de controle e proteção e as paredes corta-fogo foram modelados como blocos de concreto; os bancos de capacitores (BC) e os transformadores de potência (T) foram modelados como blocos de aço.

As dimensões das paredes corta-fogo foram extraídas da Norma 51 da COELCE (2005), que estabelece padrões para subestações. Os muros de concreto que delimitam o ambiente foram posicionados a 20 m de distância da cerca interna.

Três transformadores de corrente da subestação foram programados como possíveis fontes de DP. As coordenadas das três possíveis fontes de DP estão elencadas na Tabela 7.

TABELA 7 – COORDENADAS DOS TRÊS TRANSFORMADORES USADOS COMO FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS.

<i>Transformador de Corrente / Fonte de DP</i>	<i>Coordenadas da Fonte de DP (m)</i>	
	<i>X</i>	<i>Y</i>
<i>TC1</i>	<i>38,700</i>	<i>14,405</i>
<i>TC2</i>	<i>4,500</i>	<i>48,250</i>
<i>TC3</i>	<i>70,100</i>	<i>44,400</i>

Conclusões:

- O modelo de traçado de raios desenvolvido neste trabalho é capaz de simular a propagação de sinais em ambientes onde existe multipercurso. O espaço livre pode ser simulado simplesmente desabilitando as reflexões nos obstáculos;
- As primeiras simulações usando esse modelo demonstraram que os erros das técnicas que dependem de apenas de ToA são menores em cenários com multipercurso.

O detalhamento do ambiente de simulação é importante para compreender como é produzido o multipercurso. Os resultados das estimativas de localização de

fontes de DP com base em vários pontos de medição serão apresentados no próximo capítulo. A localização também será realizada no cenário semelhante a uma subestação de alta tensão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das técnicas de localização de descargas parciais em quatro cenários distintos estão apresentados e interpretados neste capítulo. Os quatro cenários são:

- Espaço livre com ruído;
- Ambiente genérico com multipercurso e sem ruído;
- Subestação de alta tensão sem ruído;
- Subestação de alta tensão com ruído.

6.1 CENÁRIO 1: ESPAÇO LIVRE COM RUÍDO

O objetivo deste cenário é verificar a influência do ruído sobre o desempenho das técnicas de localização. Por esse motivo, as simulações deste cenário foram feitas desconsiderando o multipercurso. Foram usados quatro níveis de ruído: 5, 10, 13 e 15 mV. O nível máximo de 15 mV se baseou no fato de a maior parte das multilaterações divergir nesse nível de ruído. As relações sinal-ruído dos sinais captados pelos receptores nos quatro níveis de ruído estão elencadas na Tabela 8.

TABELA 8 - RELAÇÃO SINAL-RUÍDO EM DECIBÉIS NOS RECEPTORES NO CENÁRIO 1.

<i>Desvio-Padrão (mV)</i>	<i>Sensor</i>	1	2	3	4
5	Média da SNR	7,7483	4,6923	5,7789	4,6923
10		1,7278	-1,3283	-0,2415	-1,3283
13		-0,5512	-3,6071	-2,5204	-3,6071
15		-1,7940	-4,8505	-3,7634	-4,8505

Neste cenário, a localização foi realizada com dois conjuntos diferentes de antenas, sendo o primeiro composto pelas antenas 1, 2 e 4 e o segundo composto pelas antenas 1, 3 e 4. Para cada conjunto de antenas, foram realizadas duzentas simulações com cada nível de ruído.

Na Figura 28, encontram-se ilustradas as curvas das estimativas de x e y quando é usado o primeiro conjunto de antenas. As médias das estimativas das técnicas de TDOA não linear e de razão das potências pouco são afetadas pelo

ruído, enquanto as técnicas de TDOA linear e híbrida sofrem maiores distorções. Isso ocorre porque o desempenho dos métodos de estimação de ToA passa a ser afetado pelo ruído. As estimativas de energia não são tão afetadas pelo ruído, pois a energia do pulso de DP é mais alta que a energia do ruído. Se as antenas estivessem mais distantes, a atenuação dos pulsos teria sido maior e a estimativa de energia seria dominada pelo ruído, o que afetaria drasticamente a erro de localização.

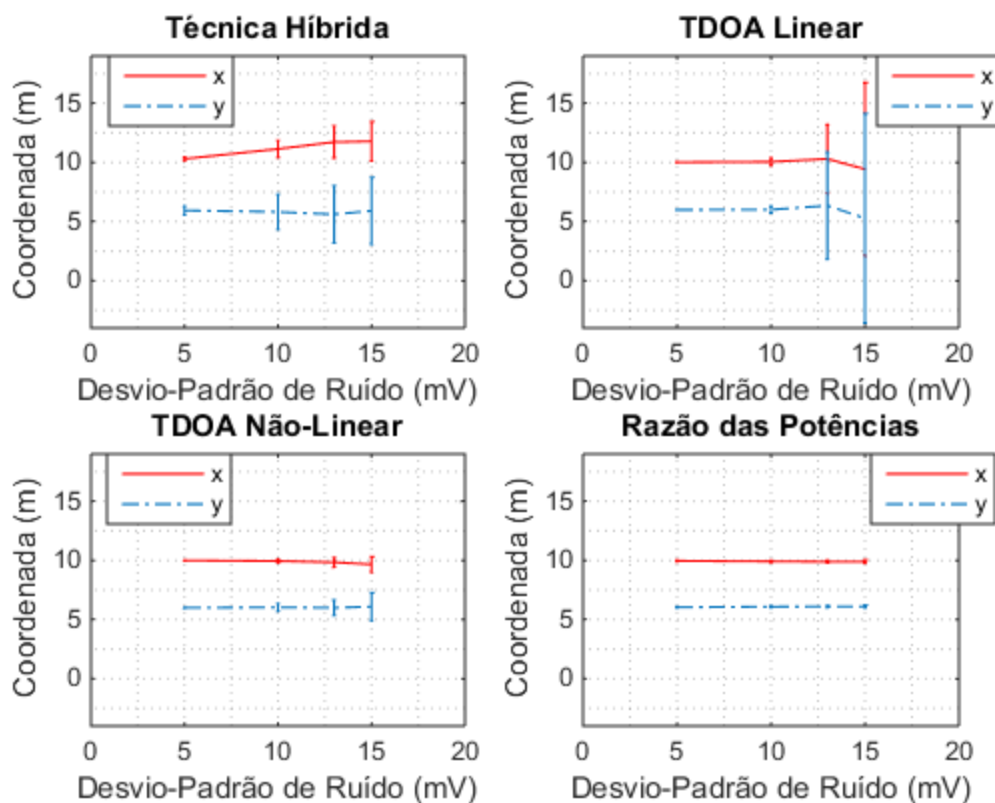


Figura 28 – CURVAS DE MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DAS COORDENADAS USANDO OS DOIS CONJUNTOS DE ANTENAS.

FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Uma forma de melhorar os resultados da localização neste cenário consiste em posicionar o conjunto de antenas em outros pontos do ambiente de medição. Esse reposicionamento foi simulado usando os resultados dos dois conjuntos de antenas citados anteriormente. Os resultados das estimativas fornecidas apenas pelo primeiro conjunto de antenas e dos dois conjuntos estão elencados nas Tabelas 9 e 10, respectivamente. Os erros das técnicas híbrida e de TDOA linear diminuem, enquanto os erros das técnicas de TDOA não linear e de razão de energias sofrem uma pequena variação.

TABELA 9 – RESULTADOS USANDO O PRIMEIRO CONJUNTO DE ANTENAS E $\sigma = 15 \text{ mV}$.

<i>Técnica</i>	<i>Estimativa das Coordenadas da Fonte (m)</i>		<i>Erro (m)</i>
	<i>X</i>	<i>Y</i>	
<i>TDOA Linear</i>	9,0800	4,9848	1,3700
<i>TDOA Não-Linear</i>	9,8200	5,8356	0,2438
<i>Razão das Energias</i>	9,9062	6,1209	0,1530
<i>Híbrida</i>	11,3103	8,1217	2,4937

TABELA 10 – RESULTADOS USANDO OS DOIS CONJUNTOS DE ANTENAS E $\sigma = 15 \text{ mV}$.

<i>Técnica</i>	<i>Estimativa das Coordenadas da Fonte (m)</i>		<i>Erro (m)</i>
	<i>X</i>	<i>Y</i>	
<i>TDOA Linear</i>	9,4256	5,2729	0,9266
<i>TDOA Não-Linear</i>	9,6606	6,0886	0,3508
<i>Razão das Energias</i>	9,8923	6,1121	0,1555
<i>Híbrida</i>	11,7781	5,9065	1,7806

6.2 CENÁRIO 2: AMBIENTE GENÉRICO COM REFLEXÕES E SEM RUÍDO

As simulações deste cenário foram realizadas no ambiente usado para os testes do capítulo anterior. O objetivo foi de verificar as médias dos erros de localização provocados pelo multipercurso em diferentes pontos de um mesmo ambiente. Por esse motivo, a fonte de DP e o conjunto de antenas receptoras foram deslocados para dez posições diferentes. As coordenadas das antenas receptoras e da fonte de descargas parciais nos dez testes realizados na sala estão elencadas na Tabela 11. A multilateração convergiu nas dez amostras

No cenário 2, um número máximo de dez incidências e um ângulo de incremento de $0,1^\circ$. Os obstáculos internos da sala são feitos de aço e as paredes de são feitas de concreto.

Os erros médios das quatro técnicas de localização em todos os testes estão representados a Figura 29. A distância entre a localização estimada e a posição exata da fonte de descargas parciais é o erro global.

TABELA 11 - COORDENADAS DAS ANTENAS E DA FONTE NO CENÁRIO 2.

Antena	1		2		3		4		Fonte	
Coordenada	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	19	2	18	6	14	7	13	1	10	5
2	14	9	13	13	9	14	8	8	10	5
3	22	14	21	8	27	9	26	13	25	4
4	22	14	21	8	27	9	26	13	25	17
5	9	14	8	8	13	13	14	9	10	6
6	8	7	9	3	14	6	13	2	11	10
7	8	7	9	3	14	6	13	2	21	3
8	8	7	9	3	14	6	13	2	11	11
9	22	8	23	4	25	7	26	3	26	15
10	10	9	11	5	13	8	14	4	10	2

Neste cenário, a técnica de localização por razão de energias forneceu boas estimativas para a coordenada *x* em todas as posições, em detrimento da coordenada *y*. Esses erros de estimação da coordenada *y* impactam diretamente no erro global. Isso ocorre porque o multipercurso não afeta as estimativas de energia em cada receptor igualmente.

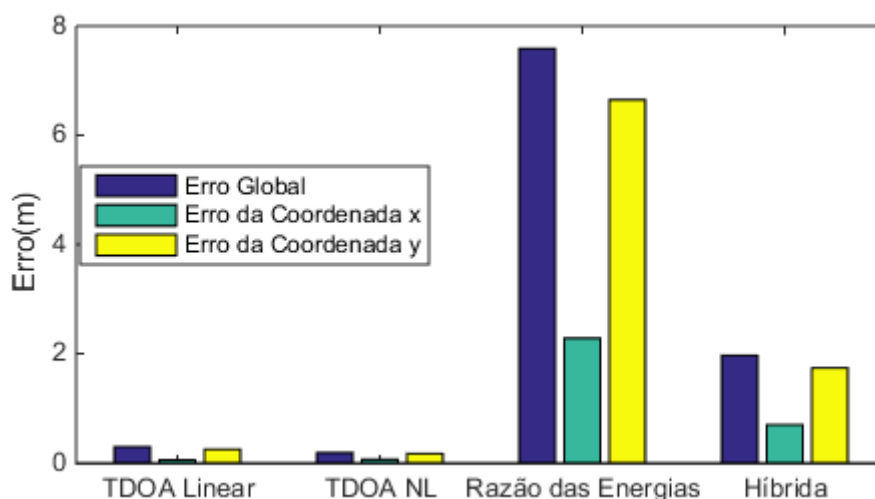


Figura 29 – ERROS DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO NO AMBIENTE COM OBSTÁCULOS.

FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

As estimativas de ToA foram pouco afetadas pelo multipercurso. Por esse motivo, a técnicas de localização por TDOA linear e não linear apresentaram os

menores erros. Diante disso, atribuem-se os erros da técnica híbrida às distorções nas estimativas de energia. Os erros individuais das coordenadas estimadas pela técnica híbrida se mantiveram no mesmo patamar, o que contribuiu para reduzir o erro global dessa técnica.

6.3 CENÁRIO 3: SUBESTAÇÃO COM MULTIPERCURSO E SEM RÚIDO

Neste cenário, foram realizadas simulações no ambiente simplificado de subestação ilustrado na Figura 27, sem ruído. No total, foram realizadas dez simulações com a fonte de DP no lugar dos três transformadores de corrente citados no capítulo anterior. As dez medições foram realizadas com o conjunto de antenas em posições diferentes da subestação. O ângulo de incremento foi de $0,1^\circ$ e o NR igual a dez. O objetivo desse cenário é verificar o aumento dos erros apenas com a distância e o número maior de obstáculos.

A fim de exemplificar a localização neste cenário, as posições das antenas receptoras (A), da condição inicial dada pela técnica híbrida (Hyb) e da fonte de DP (TX) em um dos testes encontram-se ilustradas na Figura 30. Nesse exemplo, foi adotado um ângulo de 30° .

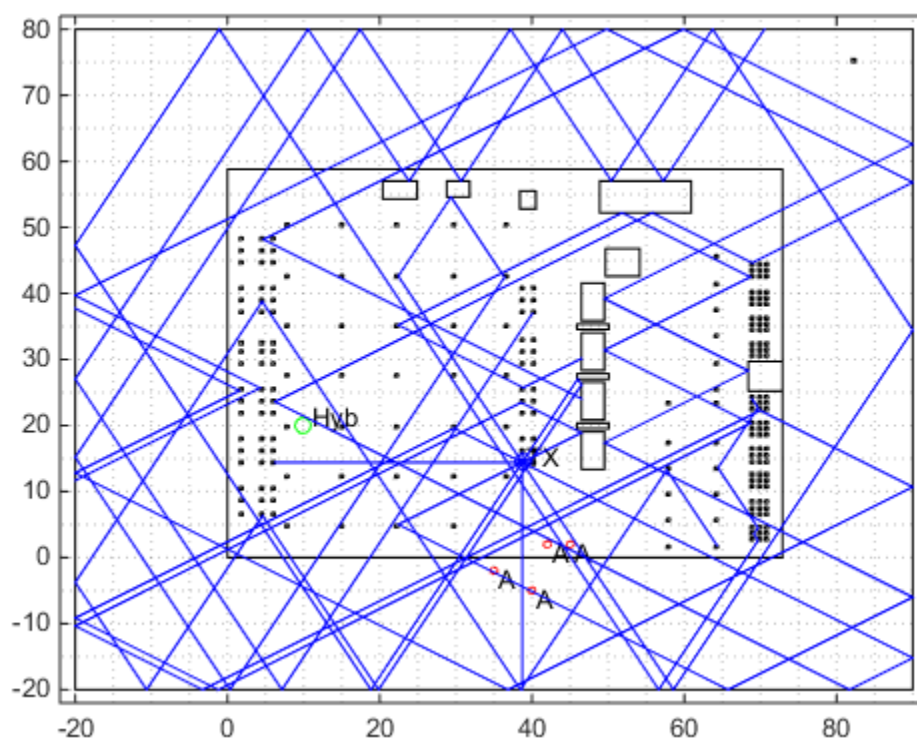


Figura 30 – ERROS DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO NAS TRÊS POSIÇÕES DA SUBESTAÇÃO.

FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Os erros das técnicas de localização nos três pontos da subestação estão indicados na Figura 31. Novamente, os erros da técnica de localização por razão de energias foram os maiores. Entretanto, relativamente ao segundo cenário, os erros das técnicas de localização por TDOA aumentaram. O desempenho da híbrida também piorou, apesar de ter permanecido superior ao da localização por razão de potências.

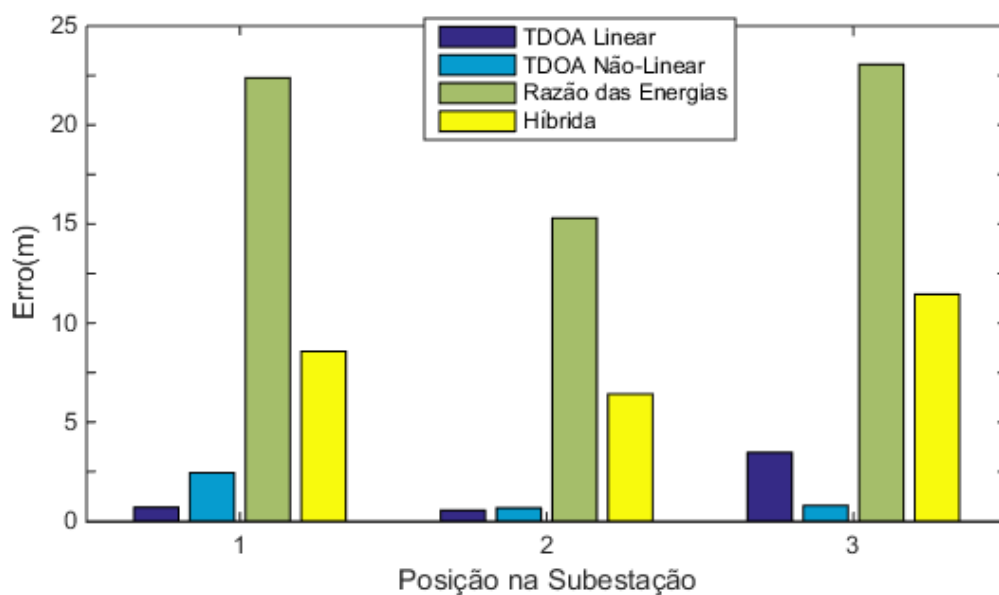


Figura 31 – ERROS DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO NAS TRÊS POSIÇÕES DA SUBESTAÇÃO.
FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Na Figura 32, encontram-se indicados os valores das médias e desvios-padrões das estimativas das coordenadas fornecidas pelas quatro técnicas e os valores exatos das coordenadas neste cenário. Nas três posições, as estimativas da coordenada x pela técnica de razão de energias novamente apresentaram erros inferiores aos das coordenadas y . As estimativas pela técnica híbrida foram superiores àquelas obtidas pela razão das energias e inferiores àquelas obtidas apenas por TDOA.

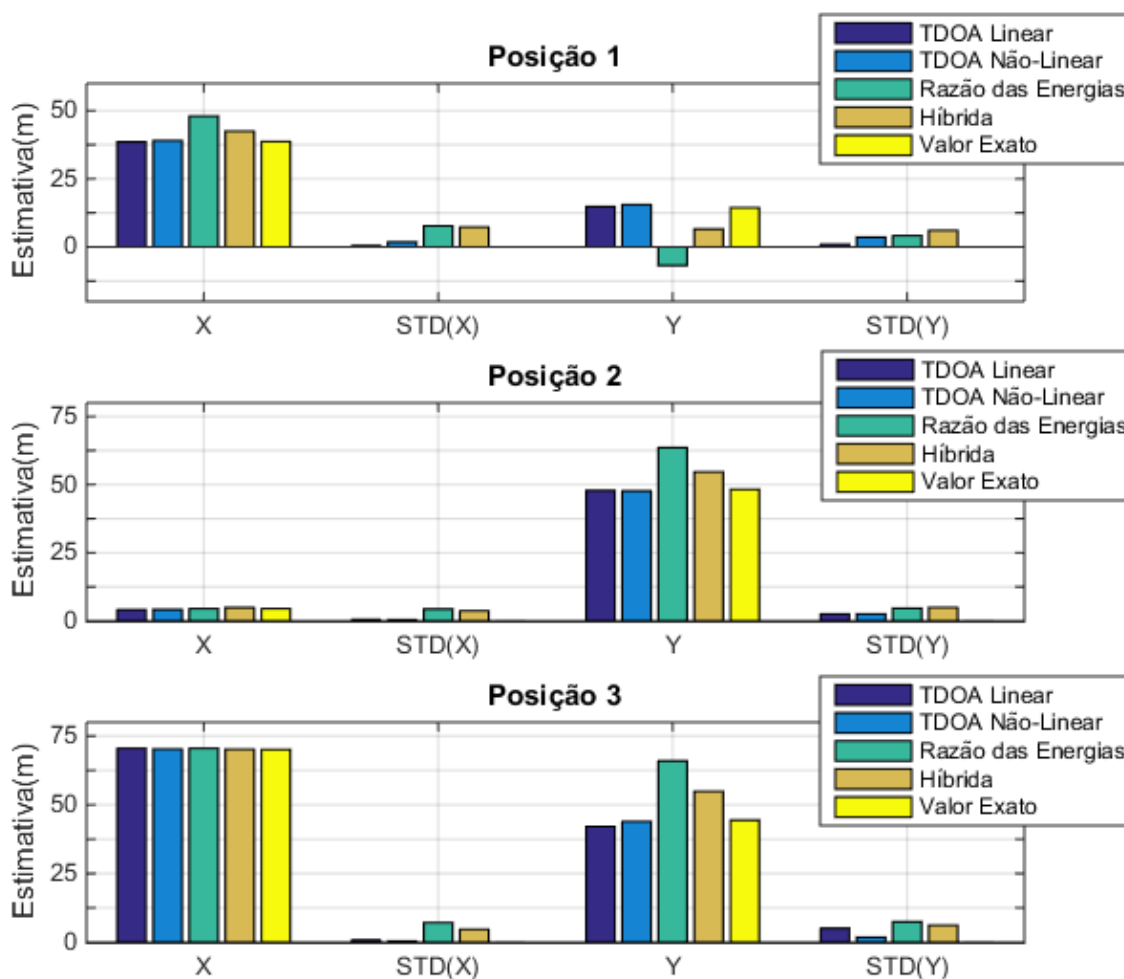


FIGURA 32 – ESTIMATIVAS DAS COORDENADAS DA FONTE DE DESCARGAS PARCIAIS NAS TRÊS POSIÇÕES DA SUBESTAÇÃO SEM RUÍDO.

FONTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

6.4 CENÁRIO 4: SUBESTAÇÃO COM MULTIPERCURSO E RUÍDO

O quarto cenário é o ambiente de subestação com a presença de ruído. O objetivo é verificar a possibilidade de realizar a localização da fonte de descargas parciais em uma versão simplificada de uma subestação de alta tensão.

A fonte DP foi alocada na posição do transformador de corrente localizado nas coordenadas (38,700;14,405). As coordenadas das antenas receptoras estão elencadas na Tabela 12.

Foram realizadas quarenta simulações para cada um dos quatro níveis de ruído: 10, 15, 20 e 25 mV. Quando o nível de ruído é de 25 mV, a multilateração diverge em parte das simulações. É por isso que ele foi escolhido como nível

máximo de ruído permissível. As relações sinal-ruído nas quatro antenas estão elencadas na Tabela 13.

Na Tabela 14, estão elencados os erros de estimação das quatro técnicas para um nível de ruído de 25 mV. Nela, pode-se observar que a média das estimativas da multilateração fornece um erro inferior aos erros das técnicas de razão de energias e híbrida. Uma vez que o nível de ruído não foi suficiente para deteriorar as estimativas de ToA, a técnica de TDOA linear apresentou o menor erro.

Na Figura 33, encontram-se ilustradas as curvas que representam a variação das estimativas de x e y com o nível de ruído. Os erros de estimação da técnica híbrida acabam refletindo nos resultados da multilateração, que começou a divergir para relações sinal-ruído maiores que aquelas alcançadas no primeiro cenário. Por esse motivo, as técnicas de localização por TDOA apresentaram resultados superiores aos das outras duas.

TABELA 12 - COORDENADAS DAS ANTENAS RECEPTORAS NO CENÁRIO 4.

Sensor	1	2	3	4
Coordenada x	40,0000	45,0000	35,0000	42,0000
Coordenada y	-5,0000	2,0000	-2,0000	2,0000

TABELA 13 - RELAÇÃO SINAL-RUÍDO EM DECIBÉIS NOS SENSORES PARA OS QUATRO NÍVEIS DE RUÍDO NO CENÁRIO 4.

Desvio-Padrão (mV)	Sensor	1	2	3	4
10	Média da SNR	8,3193	13,6330	8,9835	13,4004
15		4,7975	10,1112	5,4617	9,8866
20		2,3452	7,7522	2,9645	7,5209
25		0,3607	5,6741	1,0247	5,4415

TABELA 14 – RESULTADOS DAS TÉCNICAS NA SUUBESTAÇÃO COM RUÍDO DE $\sigma = 25 mV$.

Técnica	Estimativa das Coordenadas da Fonte (m)		Erro (m)
	X	Y	
TDOA Linear	38,6481	14,4967	0,1054
TDOA Não-Linear	39,8529	11,0719	3,5269
Razão das Energias	45,0599	16,7355	6,7734
Híbrida	42,3883	8,8398	6,6765

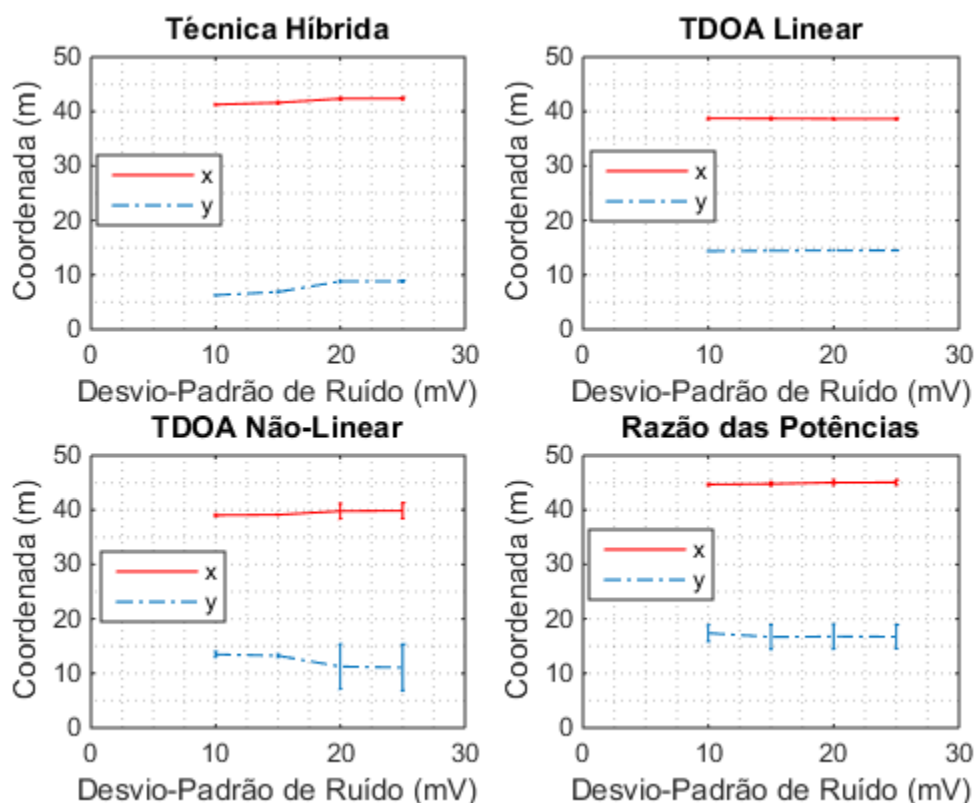


Figura 33 – CURVAS DE MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DAS COORDENADAS ESTIMADAS NA SUBESTAÇÃO, COM MULTIPERCURSO E RUÍDO.

FUNTE: PRODUZIDA PELO AUTOR.

Conclusões:

- As técnicas de localização por TDOA se mostraram mais suscetíveis a erros devido aos altos níveis de ruído;
- a técnica híbrida e a de razão de energias são as mais afetadas pelo multipercurso;
- apesar de a técnica híbrida possibilitar a localização com apenas três receptores, a qualidade da estimativa é inferior à da multilateração – que também é realizada com três receptores – em todos os cenários;
- as condições iniciais fornecidas pela técnica híbrida permitiram a localização da fonte de DP nos quatro cenários. Entretanto, o multipercurso e o ruído do cenário limitam a aplicabilidade dessa condição inicial.

7 CONCLUSÕES

As simulações realizadas neste trabalho permitiram a comparação entre três técnicas de localização de fontes de DP existentes na literatura e a técnica híbrida proposta. As duas técnicas de localização baseadas em TDOA apresentaram erros menores que as demais em cenários com multipercurso, mas foram as mais afetadas pelo ruído. Isso reflete o bom desempenho da estimativa fornecida pelo método do critério da energia. Quando o primeiro pulso de DP é detectado, a tendência de decaimento da curva EC se inverte e surge um mínimo bem definido. As técnicas de energia e híbrida, por outro lado, sofreram com os erros de estimação de energia provocados pelo multipercurso. Enquanto a técnica de razão de energias apresentou erros de estimação maiores em uma das coordenadas, a técnica híbrida apresentou erros semelhantes nas duas coordenadas, o que contribuiu para reduzir o erro global (distância euclidiana).

Na presença de ruído, as técnicas de localização por TDOA só começaram a apresentar erros significativos quando as estimativas de ToA passaram a ser afetadas. A técnica de razão de energias não apresentou grandes erros nesse cenário, pois a energia dos pulsos de DP permaneceu maior que a energia do ruído. Para que ela seja afetada, a relação sinal-ruído precisa ser ainda menor, de forma que a razão das energias dos pulsos recebidos não forneça informações significativas.

A possibilidade de realizar a localização com a técnica híbrida foi demonstrada nos quatro cenários. Entretanto, ela é afetada pelo ruído e pelo multipercurso, o que limita a sua aplicação. Por esse motivo, o seu uso como provedora de condições iniciais para a multilateração parece ser o mais promissor.

Outra conclusão que se pode tirar deste trabalho é que a modelagem por traçado de raios, se aprimorada, pode fornecer informações acerca da propagação dos pulsos de descargas parciais em ambientes como uma subestação, como o ToA e a energia dos pulsos detectados. Além dos efeitos de reflexão, espalhamento e transmissão, outros efeitos físicos podem ser incluídos nesse tipo de modelo, tornando os seus resultados mais confiáveis.

8 TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a otimização das técnicas de razão das energias e híbrida. Testes com diferentes arranjos de antenas e o uso de detecção de envoltória (no caso da híbrida) podem ser úteis para aprimorar os resultados da localização;
- Testar a técnica híbrida, inclusive como condição inicial da multilateração, em laboratório;
- Aprimorar o modelo de traçado de raios da subestação de alta tensão, de forma que as simulações se aproximem ainda mais da realidade.

APÊNDICE I

MÉTODO NUMÉRICO DE NEWTON-RAPHSON

Sistemas não lineares podem ser resolvidos por meio do método numérico de Newton-Raphson (CUNHA, 1993). A solução do sistema é obtida quando as estimativas das variáveis são raízes de todas as equações do sistema:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (3.41)$$

As variáveis e as equações do sistema podem ser representadas por duas matrizes:

$$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.42)$$

$$\vec{F} = (f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (3.43)$$

Uma maneira de representar (3.43) é a seguinte:

$$\vec{F} = \vec{0} \quad (3.44)$$

Equações não lineares podem ser linearizadas usando séries de Taylor. Essa abordagem também é válida para um sistema de equações não lineares. Aplicando esse princípio, obtém-se a seguinte aproximação linear:

$$\vec{F}(\vec{x}) \approx \vec{F}(\vec{x}_k) + \vec{F}'(\vec{x}_k) \cdot (x_k - x_{k+1}) \quad (3.45)$$

Em que \vec{F}' é a matriz Jacobiana de \vec{F} . Essa aproximação de $\vec{F}(\vec{x}_k)$ permite que se calcule uma aproximação para \vec{x}_{k+1} :

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - \vec{J}^{-1} \vec{F}(\vec{x}_k) \quad (3.46)$$

Sendo $\vec{v} = -J^{-1}(\vec{x}_k)\vec{F}(\vec{x}_k)$, um novo valor de x pode ser estimado:

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \vec{v} \quad (3.47)$$

Esses passos podem ser repetidos várias vezes, a fim de se obter novas estimativas para as raízes das equações a cada iteração. São três os possíveis resultados desse método:

- a variável pode convergir para um valor;
- a variável pode divergir;
- apesar de não convergir, a variável pode assumir um valor diferente a cada iteração, indefinidamente.

REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ, F.; GARNACHO, F.; ORTEGO, J.; SÁNCHEZ-URÁN, M.A. Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment. **Sensors**, n. 15, p. 7360-7387, 2015.

ÁARADHI, V.; GAIDHANI K. Partial Discharge in Gas Insulated Substations (GIS): Effects, Mitigation & Analysis. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, vol.4, n. 3, p. 7360-7387, 2013.

BARTNIKAS, R. A Commentary on Partial Discharge Measurement and Detection. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, n. 5, v. E1-22, p. 629-653, 1987.

BARTNIKAS, R. Partial Discharge: Their Mechanism, Detection and Measurement. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, vol. 9, n.5, p.763-808, 2002.

BASHME, N.R.; SALOKHE, B. Partial Discharge Measurement as a Diagnostic Tool for Current Transformer. **International Journal of Advances on Engineering & Technology**, vol. 8, n.3, p.347-355, 2015.

BOCZAR, T. Identification of a Specific Type of PD from Acoustic Emission Frequency Spectra. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, n. 4, v. 8, p. 598-606, 2001.

CHAN, Y.T. HO, K.C. MALEWSKI, R.; TRAIN, D. A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location. **IEEE Transactions on Signal Processing**, vol. 42, n.8, pp.1905-1915, 1994

COELCE 51/2005, Subestação de Distribuição Aérea e Semi-Abrigada. 2005.

CUENCA, W.M.H. Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005. (tese)

DAWES, C.L; HOOVER, P.L. Ionization Studies in Paper Insulated Cables - I. **AIEE Transactions**, vol. 45, p.141-164, 1926.

FOY, W.H. Position Location Solutions by Taylor-Series Estimation, **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, vol. 34, n.5, p.254-256, 1946.

FRIIS, H.T. A Note on a Simple Transmission Formula, **Proceedings of the I.R.E. and Waves and Electrons**, vol. 12, n.2, p.187-194, 1976.

HAYKIN S.; MOHER, M.; Sistemas Modernos de Comunicações Wireless. Editora Bookman, Ed.2, 2009.

HAYT JR, W.H.; BUCK, J.A.; Eletromagnetismo. Editora LTC, Ed.6, 2003.

HAMPTON, B.F.; MEATS, R.J. Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations. **IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution**, vol. 135, n.2, pp. 137-145, 1988.

HEROLD, C; LEIBFRIED, T.; MARKALOUS, S; QUINT, I. Algorithms for Automated Arrival Time Estimation of Partial Discharge Signals in Power Cables. **International Symposium of High Voltage Engineering (ISH)**, paper T7-332, 2007.

HIKITA, M.; YAMASHITA, H.; HOSHINO, T.; KATO, T. Eletromagnetic Noise Spectrum Caused by Partial Discharge in Air at High Voltage Substations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 13, n.2, pp.434-439, 1998.

HOWELLS, E.; NORTON, E.T. Detection of Partial Discharges in Transformers Using Acoustic Emission Technique. **IEEE Transactions in Power Apparatus and Systems**, vol. 97, p.1538-1546, 1978.

IEC Publication-60270, High-voltage Test Technique-Partial Discharge Measurement. Ed.3, 2000.

JOHNSON, J.S.; WARREN, M. Detection of Slot Discharges in High-Voltage Stator Windings Operation. **AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. 70, p.1998-2000, 1951

JUDD, M.D.; PRYOR, B.M.; KELLY, S.C.; HAMPTON, B.F. Transformer Monitoring Using UHF Technique. **Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering**, vol. 5, p.362-365, 1999.

JUDD, M.D.; PRYOR, B.M.; FARISH, O.; PEARSON, J.S; BRECKENRIDGE, T. Power Transformer Monitoring Using UHF Sensors: Installation and Testing. **2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, p.373-376, 2000.

JUDD, M.D.; YANG, Li.; HUNTER, I.B.B. Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation. **IEEE Dielectrical and Electrical Insulation Society Magazine**, vol.21, n.2, p.5-14, 2005.

KAKEETO, P.; JUDD, M.; PEARSON, J.; TEMPLETON, D.; Experimental Investigation of Positional Accuracy for UHF Partial Discharge Location. **International Conference of Condition Monitoring and Diagnosis**, 2008.

KIM, Kwang-Hwa; YI, Sang-Hwa; SUN, Jong-Ho. Study on Frequency spectra of partial discharge according to defects and couplers. **2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007)**, p.1268-1272, 2007.

LEMKE, E.; GULSKI, E.; HAUSCHILD, W.; MALEWSKI, R.; MOHAUPT, P.; MUHR, M.; RICKMANN, J.; STREHL, T.; WESTER, F.J. Practical Aspects of the Detection and Location of Partial Discharges in Power Cables. **ELECTRA**, n. 226, p.63-69, 2006.

- LEMKE, E.; GULSKI, E.; HAUSCHILD, W.; MALEWSKI, R.; MOHAUPT, P.; MUHR, M.; RICKMANN, J.; STREHL, T.; WESTER, F.J. Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270. *ELECTRA*, n. 241, p.61-67, Paris: CIGRE, 2008.
- LI, X. Efficient Ray Tracing Simulation. Universidade de Lund. 2014. (dissertação de mestrado).
- LOPEZ-ROLDAN, J.; FARISH, O.; TANG, T.; GASKIN, M. Optimisation of a Sensor for Onsite Detection of Partial Discharges in Power Transformers by the UHF Method. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 15, n. 6, p.1634-1639, 2008.
- LUNDGAARD, L.E. Partial discharge. XIII. Acoustic partial discharge detection-practical application. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, n.5, vol.8, p.34-43, 1992.
- MACÊDO, E.C.T. Metodologia de Classificação de Descargas Parciais Utilizando Redes Neurais Artificiais. Universidade Federal de Campina Grande. 2014. (tese)
- MARKALOUS, S.M.; TENBOHLEN, S.; FESER, K. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Eletromagnetic Signals. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, n.6, vol.15, p.156-1583, 2008.
- MILLER, F.P.; VANDOME, A.F.; MCBREWSTER, J. Multilateration. Alphascript Publishing, 2010.
- MIZUSAWA, G.A. Performance of Hyperbolic Position Location Techniques for Code Division Multiple Access. Virginia Polytechnic Institute and State University. 1996. (tese)
- MOORE, P.J.; PORTUGUÉS, I.; GLOVER, I.A. Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant. **IEEE Transactions in Power Delivery**, vol.20, n.3, 2005.
- PAOLETTI, G.; GOLUBEV, A. Partial discharge theory and applications to electrical systems. **Record of 1999 Pulp and Paper Industry Technical Conference**, 1999.
- PEARSON, J.S.; FARISH, O.; HAMPTON, B.F.; JUDD, M.D.; TEMPLETON, D.; PRYOR, B.M.; WELCH, I.M. Partial Discharge Diagnostics for Gas Insulated Substations. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 2, n. 5, p.893-905, 1995.
- PEARSON, J.S.; FARISH, O.; HAMPTON, B.F.; SELLARS, A.G. A Continuous UHF Monitor for Gas Insulated Substations. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 26, n. 3, p.469-478, 1991.

PINPART, T.; JUDD. Improving UHF Partial Discharge Location in High Voltage Equipments. **Universities Power Engineering Conference (UPEC)**, p.1-5, 2009.

POLAK, F.; SIKORSKI, W.; SIODLA, K. Location of partial discharge sources using sensor arrays. **International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**, p.1-4, 2014.

PORTUGUES, I.E.; MOORE, P.J.; GLOVER, I.A.; JOHNSTONE, C.; MCKOSKY, R.H.; GOFF, M.B.; VAN DER ZEL, L. RF-Based Partial Discharge Early Warning System for Air-Insulated Substations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 24, n.1, p. 20-29, 2009.

QI, Bo; LI, C.; HAO, Z.; GENG, B. Partial Discharge Detection for GIS: A Comparison Between UHF and Acoustic Method. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)**, p.1-5, 2010.

RAPPAPORT, T.S. Comunicações sem Fio: Princípios e Práticas. Prentice Hall, Ed. 2, 2002.

RENGARAJAN, S.; PARMAR, B.J.; BHOOMAIHAH, A.; KUNTIA, J.S.; Development of an UHF Detection System for Partial Discharge Measurement in Transformer Insulation. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)**, p.100-103, 2008.

REZA, R.I. Data Fusion for Improved TOA/TDOA Position Determination in Wireless Systems. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000. (tese)

ROBINSON, D.M. Dielectric Phenomena in HV Cables. Chapman & Hall; Ed. EX-LIBRARY, 1936.

ROBLES, G.; MARTINEZ-TARIFA, J.M. Separation of Radio-Frequency Sources and Localization of Partial Discharge in Noisy Environments. **Sensors**, n.15, p.9882-9898, 2015.

SAEIDI, C.; HODJATKASHANI, F.; FARD, A. New Tube-Based Shooting and Bouncing Ray Tracing Method. **The 2009 International Conference on Advanced Technologies for Communications**, 2009.

SCHETTINO, D.N.; MOREIRA, F.J.S.; REGO, C.G. Efficient Ray Tracing for Radio Channel Characterization of Urban Scenarios. **IEEE Transactions on Magnetics**, vol.43, n.4, p.1305-1308, 2007.

SCHWARZ, R.; MUHR, M.; PACK, S. Partial discharge detection in oil with optical methods. **2006 IEEE International Power Engineering Society General Meeting**, 2006.

SHEN, Z.B.; EL-SAADANY, E.F. Localization of Partial Discharges using UHF sensors in Power Transformers. Partial discharge detection in oil with optical

methods. **IEEE International Conference on Dielectrics Liquids (ICDL) 2005**, p.245-248, 2005.

SLEEMAN, R.; VAN ECK, T.; Robust automatic p-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. **Phys. Earth Planet Inter.**, v. 113, p. 265-275, 1999.

SOUZA NETO, J.M.R. Localização de Descargas Parciais Baseada em um Método Radiométrico - Prova do Princípio. Universidade Federal de Campina Grande. 2014. (tese)

SOUZA NETO, J.M.R. Partial Discharge Location using Unsynchronized Radiometer Network for Condition Monitoring in HV Substations - A Proposed Approach. **Journal of Physics (Conference Series)**, v.364, p.012053, 2012.

TANAKA, T. Internal Partial Discharge and Material Degradation. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, n. 6, v. E1-21, p. 899-905, 1986.

UNAR, M.H.; VACCARO, G.; GLOVER, I.A. Ray-Tracer for Outdoor Microcellular Propagation Modelling and Channel Characterisation. **The Second European Conference on Antennas and Propagation**, p. 1-7, 2007.

UNAR, M.H. Wideband mobile propagation channels: modelling, measurements and characterisation for microcellular environments. University of Bath (Reino Unido). 2006. (tese)

VAN VEEN, L.W. Comparison of Measurement Methods for Partial Discharge Measurement in Power Cables. Delft University of Technology. 2014. (tese)

VILLANUEVA, J.M.M. Detecção e Análise de Descargas Parciais para Equipamentos de Sistemas Elétricos de Alta Tensão. Universidade Federal de Campina Grande. 2012. (tese)

WAGENAARS, P.; WOUTERS, P.A.A.F.; VAN DER WIELEN, P.C.J.M.; STEENNIS, E.F. Accurate Estimation of Time-of-Arrival of Partial Discharge Pulses in Cable Systems in Service. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 15, n. 4, p.1190-1199, 2008.

WANG, M.; VANDERMAAR, A.J.; SRIVASTAVA, K.D. Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 18, n. 6, pp.12-25, 2002.

YUN, Z.; ISKANDER, M.F. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications. **IEEE Access**, vol. 3, pp.1089-1100, 2015.

ZHANG, Y.; UPTON, D.; JABER, A.; HAMD, A.; BAHGHAR, S.; MATHER, P.; LAZARIDIS, P.; MOPTY, A.; TACHTATZIS, C.; ATKINSON, R.; JUDD, M.; VIEIRA, M.F.Q.; Radiometric Wireless Sensor Network Monitoring of Partial Discharge

Sources in Electrical Substations. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, vol. 2015.

ZHOU, L.; LI, W.; SU, S.; The Deduction of Partial Discharge Pulse Current from Its Radiating UHF Signal. **2005 International Power Engineering Conference**, 2005.

ZUBERI, M.U.; MASOOD, A.; KHAN, M.F.; HUSAIN, E.; ANWAR, A. Estimation of Partial Discharge Inception Voltages due to Voids in Power Cables. **3rd International Conference on Energy & Environment**. 2008.