DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2396

Otimização Matemática para o Método Radiométrico de Estimação da Localização de Descargas Parciais Baseado em Razão das Potências

J. M. R. de Souza Neto * **H. D. M. Braz** *

* *Departamento de Engenharia Elétrica - DEE, Centro de Energias Alternativas de Renováveis - CEAR, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, (e-mail: {mauricio, helon}@cear.ufpb.br).*

Abstract: The measurement process of partial discharge has a long history as a tool for aging evaluation of high voltage equipment. Location, however, is yet a problem to be overcome. To identify an insulation faulty equipment within a power substation it is often made by a measuring campaign or by an extreme case where operators inevitably detect a high level of partial discharge, using their personal experience. For such matter, achieve a partial discharge location tool, is a necessity to the process of equipment and resources management. In this paper it is described a mathematical optimization process applied to solve radiometric location estimation methods for partial discharge detection. It was considered signal propagation models, as well as, solving optimization strategies for error mitigation.

Resumo: O processo de medição de descargas parciais tem uma longa história como ferramenta de avaliação de envelhecimento de equipamentos de alta tensão. A localização, porém, ainda é um problema a ser superado. Identificar um equipamento com falhas de isolamento dentro de uma subestação é realizado por meio de campanhas de medição através de toda a subestação, ou no caso de um equipamento cujo nível de descarga parcial já esteja alto o suficiente para despertar desconfiança dos operadores. Desse modo, ter uma ferramenta de localização de descargas parciais é uma necessidade para o processo de gestão de equipamentos e recursos. No presente trabalho é descrito o processo de otimização matemática aplicado na solução de algoritmos de localização para metódos radiométricos de detecção de descargas parciais. São considerados modelos de propagação do sinal, bem como estratégias de minimização de erro para otimização da solução.

Keywords: Partial Discharge; Location; Optimization; Power Ratio.

Palavras-chaves: Descargas Parciais; Localização; Otimização; Razão de Potências.

1. INTRODUÇÃO

As técnicas para detecção de faltas de isolação em subestações comuns ou isoladas por gás (GIS - *Gas Insulated Substations*) Hampton (1999) estão bem estabelecidas e o uso de sinais UHF (*UHF - Ultra High Frequency*) para localização e diagnóstico de faltas em transformadores já foram discutidos anteriormente, Mohamed et al. (2019). A teoria de Descargas Parciais (DP) e uma visão ampla de sensores e tecnologia de medição foi recentemente sintetizada por Bartnikas (2002). Dentre as formas não invasivas de monitoramento, a detecção radiométrica de DP tem uma longa história. Em sua forma mais simples, quando cargas elétricas movem-se com qualquer velocidade não constante, irradiação eletromagnética ocorre e um sinal espalha-se a partir do ponto da descarga em todas as direções, Kuppuswamy (2003), desse modo um receptor de radio pode ser usado para determinar a intensidade e a posição geral de uma descarga dentro de uma subestação de energia elétrica. A detecção sem fio de DP usando um receptor de radio tem a vantagem de que nenhuma conexão com a parte de alta ou baixa tensão de operação do equipamento necessita ser feita, o isolamento primário e o secundário se mantêm sem modificação e a instalação/manutenção do equipamento de detecção não requer que qualquer item da planta seja retirado de serviço. Por isso cresce cada vez mais o interesse na rotina de detecção e de medição contínua da interferência de RF (RFI - *Radio Frequency Interference*) para o diagnóstico de defeitos em equipamentos de transmissão e distribuição, que além do mais foi recentemente intensificada devido à queda nos custos de processamento digital de sinais de rádio frequencia (RF) e as vantagens adquiridas em mudar as características de manutenção baseadas na condição, ao invés do tempo.

Em um sistema radiométrico, cada radiômetro (nó sensor) realiza a aquisição de um pulso de DP na sua largura de banda receptora usando um tempo de integração pré definido. Este tempo deve ser curto para armazenar mudanças na atividade da DP devido a mudanças no estado físico do isolamento, mas longo o suficiente para armazenar de forma confiável o nível de intensidade da DP. Um sinal de

DP ocorrendo próximo de um radiômetro terá intensidade muito maior neste do que nos outros radiômetros da rede.

A localização de fontes de DP é refinada, por uma rotina de estimação de localização que usa inversão da lei de perdas de transmissão, de Souza Neto et al. (2010), para dar uma estimativa da razão de distâncias a partir de uma fonte de DP para quaisquer outros dois radiômetros. Uma fonte de DP detectada por três ou mais radiômetros pode, portanto ser localizada a partir da intersecção de dois ou mais círculos de influência. Na prática essa localização será sujeita a erros determinados, principalmente, pela variabilidade espacial do índice de perdas do caminho. Para mais de dois círculos de influência isso é diferente, portanto, haverá, teoricamente, um único ponto de intersecção e neste caso uma estimativa de localização baseada na minimização de uma métrica apropriada será usada. Diante dos fatos apresentados, entende-se que, o processo de coleta de dados por meio de um sistema radiométrico é uma alternativa aos já utilizados métodos cabeados, dado que o processo de coleta ainda é custosa em termos de tempo envolvido na preparação dos equipamentos, dos gastos associados a instalação, da susceptibilidade a falhas de montagem, e além de tudo, envolve riscos durante a operação dos equipamentos, desde que estes funcionam submetidos a alta tensão.

Além disso, entende-se que o processo de localização de uma fonte de descargas parciais ainda necessita de soluções simples, de baixo custo, quando comparado com o item da planta monitorado, e com um nível de exatidão que torne o sistema confiável. Dessa forma, neste trabalho, propõe-se um estudo comparativo de dois métodos de estimação de localização de modo a obter uma minimização do erro. Tais métodos são consagrados matemáticamente e utilizado em outros contextos de sistemas de localização em redes de sensores sem fio. O trabalho esta organizado de modo que o leitor possa entender os mecanismos de localização de descargas parciais, o ambiente de simulação desenvolvido, as otimizações realizadas, os resultados levantados, as conclusões obtidas e os trabalhos futuros propostos.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

De maneira geral pode-se dizer que: um nó rastreável com posição desconhecida emite um sinal que é recebido por seus vizinhos nós âncoras. O nó âncora mede a potência do sinal recebido (RSS - *Received Signal Strength*), o tempo de viajem (TOA - *Time of Arrival*), ou o ângulo de chegada (AOA - *Angle of Arrival*) do sinal recebido. Estes valores medidos são usados como entradas para o algoritmo de localização utilizado que, determina aproximadamente a localização do nó rastreável. O algoritmo usa apenas uma dessas três entradas. A determinação do tempo de viajem, requer um *clock* de alta precisão. Encontrar o ângulo de chegada requer modificações de *hardware* o que pode aumentar os custos. A maioria dos algoritmos de localização baseados em *links* RF usa apenas o RSS para estimar a localização devido a sua simplicidade e pouca ou nenhuma mudança de *hardware* Farahani (2008). No contexto de DP, o método radiométrico baseado em RSS tem como fundamento o conhecimento de que o sinal transmitido por uma descarga é atenuado pelo meio de propagação à medida que este se distancia da sua origem. Este meio de propagação é nomeado canal e liga o transmissor (Fonte da descarga parcial) ao receptor (Nó sensor). As características do canal de transmissão definem a forma como ocorre essa atenuação, sendo representadas por um modelo de canal.

Muitas vezes, a complexidade e variabilidade do canal torna difícil a obtenção de um modelo de canal determinístico preciso. Para esses casos, modelos estatísticos são usados frequentemente Goldsmith (2005). O modelo mais simples de comunicação via radio-frequência assume que a propagação ocorre no espaço livre. A complexidade desse modelo de canal aumenta quando a superfície da terra ou o meio ambiente são considerados. A fórmula básica para a potência recebida em *Watts,* por uma antena A devido a uma descarga parcial D, no espaço livre é dada pela Equação 1 Glover and Grant (2004):

$$P_r(A, D) = P_t G_t (\frac{\lambda_t}{4\pi r})^2 G_r \tag{1}$$

em que, P_t é a potência transmitida em *Watts*, G_t é o ganho da antena transmissora (admensional), G_r é o ganho da antena receptora (admensional), λ_t é o comprimento de onda do sinal de radio-frequência em m, obtido pela razão entre a velocidade de propagação do sinal ve sua frequência f_T, e r é a distancia entre A e D em m. A quantidade $P_t G_t$ é chamada potência radiada isotrópica efetiva (EIRP - *Effective Isotropic Radiated Power*) e a quantidade $[\lambda_t/(4\pi R)]^2$ é chamada de perdas de caminho do espaço livre (FSPL - *Free Space Path Loss*).

Observe que as grandezas relacionadas com a descarga D foram identificadas com o subscrito t de transmitido, enquanto as grandezas relacionadas com a antena A foram identificadas com r de recebido. r de pende das localizações de $D(x_D, y_D)$ e $A(x_A, y_A)$, sendo calculada diretamente por:

$$r = \sqrt{(x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2} \tag{2}$$

Uma versão mais genérica do modelo descrito na Equação 1 pode ser gerada subtituindo o expoente 2 válido para o espaço livre, pelo parâmetro n, que depende do canal de propagação. Em cenários mais próximos da realidade, tal como dentro de uma casa, a equação para espaço livre poderá não ter uma precisão suficiente. Isso porque parte do sinal transmitido poderá sofrer absorção de diferentes materiais, o sinal pode ser refletido múltiplas vezes por vários objetos e versões atrasadas do sinal podem ser adicionadas ao sinal original. Todos esses incidentes mudam a potência do sinal.

O valor de n (chamado expoente ou índice de perdas no caminho) pode ser determinado experimentalmente, na Tabela 1 podemos observar alguns valores de n segundo Daeyoung et al. (2003); Rappaport (2002). Porém, deve-se observar que o uso de tal equação insere um erro no calculo do RSS inerente à caracterização do ambiente ao qual a aplicação é implementada visto que os valores de n representam um cenário particular onde o experimento foi realizado.

De modo geral o problema de estimação de localização pode ser associado a um problema de melhor modelar

Tabela 1. Expoente de perdas no caminho para diferentes ambientes.

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

o canal de propagação do sinal do ambiente, que vai resultar, consequentemente, no menor erro de estimação de distância entre fonte e receptor. Neste contexto, pode-se reescrever a Equação 1 de maneira genérica, como (Equação 3):

$$P_r(A,D) = \frac{K(A,D)}{r^n} \tag{3}$$

em que:

$$K(A,D) = \frac{P_t G_t G_r \lambda_t^n}{(4\pi)^n} \tag{4}$$

Supondo que ocorre uma unica descarga D por vez, o problema consiste em determinar sua localização (x_D, y_D) com exatidão, utilizando o menor numero possível de medições de P_r (Equação 3).

3. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

No presente trabalho são propostos dois algoritmos baseados em RSS visando a localização de DP: O algoritmo 1 (A1) é uma melhoria simples do método proposto por Neto, 2014 Souza Neto (2014), que dispensa a exigência de posicionar os eixos de modo que uma das antenas esteja posicionada na origem do sistema coordenado; o segundo algoritmo (A2) proposto, busca melhorar a exatidão de A1 pela utilziação do Método dos Mínimos Quadrados Ponderado (MMQP).

3.1 Algoritmo 1 (A1)

Considere que m antenas foram posicionadas em diferentes locais de um campo de testes e então houve uma descarga parcial. De acordo com a Equação 3, cada antena pode ser referenciada por um índice $i = \{1, 2, 3, ..., m\}$; Por uma questão de simplicidade e também pelo fato de ser assumido aqui, a ocorrência de uma unica descarga, estas não foram indexadas. Supondo que G_r de todas as antenas sejam iquais, K_i, pode ser considerado como uma constante. Assim, escolhendo a antena 1 como referência:

$$\frac{P_{r1}}{P_{ri}} = \frac{\frac{k}{r_1^n}}{\frac{k}{r_i^n}} \rightarrow \frac{P_{r1}}{P_{ri}} = \frac{r_i^n}{r_1^n} \rightarrow r_i = r_1 (\frac{P_{r1}}{P_{ri}})^{(\frac{1}{n})} \tag{5}$$

Aplicando a Equação 2 e a Equação 5 para cada uma das antenas:

$$(x_i - x_D)^2 + (y_i - y_D)^2 = r_1^2 P_i \tag{6}$$

Em que:

$$P_i = (\frac{P_{r1}}{P_{ri}})^{(\frac{2}{n})} \tag{7}$$

observe que para *i=1*, a Equação 6 representa a equação da circunferência semelhante a Equação 2. Tomando $j = \{2, 3, ..., m\}$ e subtraindo a Equação 6 para antena 1:

$$[(x_j - x_D)^2 + (y_j - y_D)^2] - [(x_1 - x_D)^2 + (y_1 - y_D)^2] = r_1^2 (P_j - 1) \tag{8}$$

Manipulando a Equação 8 assumindo como incógnitas (x_D, y_D) e r_1^2:

$$r_1^2(P_j - 1) + 2(x_j - x_1)x_D + 2(y_j - y_1)y_D = (x_j^2 + y_j^2) - (x_1^2 + y_1^2) \tag{9}$$

Fazendo $Z_i = x_i^2 + y_i^2$ e organizando de forma matricial, tem-se:

$$HX = b \tag{10}$$

Em que:

$$H = \begin{bmatrix} P_2 - 1 & 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ P_3 - 1 & 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_m - 1 & 2(x_m - x_1) & 2(y_m - y_1) \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$X = \begin{bmatrix} r_1^2 \\ x_D \\ y_D \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$b = \begin{bmatrix} Z_2 - Z_1 \\ Z_3 - Z_1 \\ \vdots \\ Z_m - Z_1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

Observe que há nesse sistema m-1 equações e 3 incognitas, porém cada equação traz consigo uma incerteza provocada pelas simplificações adotadas no desenvolvimento:

- Simplificação 1 (S1): supor que λ_t é o mesmo para qualquer descarga;
- Simplificação 2 (S2): Adoção de um índice de perdas típico no inicio do algoritmo, para viabilizar o cálculo da Equação 7 e consequentemente de H.

Em síntese, há 3 condições possíveis para o sistema definido na Equação 10:

(1) *m<4:* significa que há infinitas soluções do sistema, logo não há como localizar a descarga parcial;
(2) *m=4:* o sistema possui uma única solução que pode ser obtida diretamente, uma vez que H é quadrada e possui inversa:

$$X = H^{-1} b \tag{14}$$

(3) *m>4*: nesse caso há redundâcia de medições. o problema é formulado como uma otimização que busca minimizar o errro quadrático total ocasionado por X, sendo escolhido para sua solução o Método dos Minimos Quadrados (MMQ), que na sua formulação matricial pode ser representado por:

$$\begin{aligned} H^T HX = H^T b \ \rightarrow \\ X = (H^T H)^{-1} H^T b \end{aligned} \tag{15}$$

Em 2 e 3, a localização obtida (x_D^*, y_D^*) depende das incertezas embutidas nas equações por S1 e S2. A exatidão da localização é medida como a distância entre (x_D^*, y_D^*) e (x_D, y_D), que pode ser calculada usando 2. Além disso, observe que a antena 1 foi escolhida como referência na construção do sistema da Equação 10, o qual acabou sendo formulado com *m-1* equações. Qualquer uma das m antenas poderia ser escolhida como referência, logo existem m sistemas factíveis para localização. Portanto, m localizações para a descarga parcial podem ser obtidas, cada uma com um grau de exatidão: $\{(x_D^*, y_D^*)_1, (x_D^*, y_D^*)_2, ..., (x_D^*, y_D^*)_m\}$.

Por fim é valido destacar que não são necessarias de fato m antenas para implementação de A1. Essa formulação foi escolhida devido a sua simplicidade, de modo que a Equação 5 pudesse ser escrita assegurando apenas que S1 fosse atendida. No extremo oposto ao adotado, A1 pode ser implementado com uma única antena. Nesse caso, o indice i adotado a partir da Equação 3 se refere ao local da antena e as medições obtidas posicionando a antena em quaisquer outros locais, são oriundas de diferentes descargas. Logo o erro obtido na Equação 5 poderia ser elevado. A solução proposta para minimizar esse erro é usar o valor médio obtido após uma bateria de medições como sendo a potência do sinal recebido. Quanto maior o número de descargas medidas mais se espera um K_i constante Souza Neto (2014).

3.2 Algoritmo 2 (A2)

No desenvolvimento da Equação 15, o problema de otimização foi formulado como minimizar o erro quadrático total, obtido pela soma dos erros quadráticos de cada uma das equações que formam o sistema linear, Equação 10. Uma variação desse método nomeada de MMQ Ponderado, utiliza pesos diferentes para os erros quadráticos das equações. Nesse caso, a formulação matricial da Equação 15 deve ser reescrita como:

$$X = (H^T W H)^{-1} H^T W b \tag{16}$$

Sendo W uma matriz diagonal cujo elemento W_{kk} é o peso atribuído a equação k no erro quadrático total. No caso da localização das DP, a motivação no uso de A2 é investigar se há ganho na exatidão de A1 quando são adotados pesos para as medições das antenas $j = \{2, 3, ..., m\}$. Caso seja observada vantagem, uma segunda etapa consiste em generalizar a escolha dos pesos. Entretanto essa segunda etapa não é o foco deste trabalho.

4. RESULTADOS

Foram utilizados dados simulados, em que se supõe uma única descarga e cinco antenas. As localizações da descarga e das antenas foram escolhidas de forma aleatória, tendo sido definidos valores típicos para os demais parâmetros (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Parâmetros escolhidos para representação de uma fonte de DP.

ID	x	y	P_t	G_t	f_t (MHz)	n
1	0,0	0,0	1,0	1,0	550	1,8

Tabela 3. Informações referentes as antenas receptoras.

ID	x	y	G_r
1	9,70	6,95	1,0
2	0,30	7,15	1,0
3	0,30	18,15	1,0
4	4,70	10,25	1,0
5	8,90	1,20	1,0

Os resultados foram organizados em três sub-seções: A1 sem erros de medição, A1 com erros de medição e A2. Em cada uma dessas seções os algoritmos foram testados variando a equação de referência (1, 2, 3, 4 e 5) e o índice de perdas n (de 1 até 3 com passos de 0,1). Por se tratar de um caso simulado, a localização exata da descarga é conhecida e consequentemente, foi possível utilizar o erro cometido pelo localizador como métrica de exatidão.

4.1 A1 sem erros de medição

Os resultados obtidos podem ser observados na Fig. 1, em que o índice de perdas n foi alocado no eixo das abscissas e o erro de localização foi alocado nas ordenadas. Uma curva de erro foi gerada quando cada uma das antenas foi escolhida como referência. Observa-se que nesse cenário sem erros de medição a escolha da antena de referência afetou o resultado de forma pouco significativa, enquanto o índice de perdas se mostrou determinante para a efetividade do método de localização. O erro de localização foi praticamente nulo quando o localizador foi iniciado com o mesmo n dos dados simulados, independente da referência adotada. Em casos reais, um n típico precisa ser assumido pelo localizador sem o conhecimento do índice de perdas exato do meio. Nesse caso, o erro de localização cometido seria maior quanto maior fosse o erro cometido no valor de n assumido. Esse erro é observado na Fig. 2, assumindo que a resposta do localizador é calculada pela média das respostas obtidas pelas diferentes antenas de referência. Assumindo uma tolerância de 1 m, o resultado obtido seria válido para um intervalo aproximado: 1,6 < n < 2,0.

4.2 A1 com erros de medição

Na seção anterior, observou-se que o método de localização proposto teve uma exatidão inferior a 1 m, para uma faixa de n assumido de 1,6 até 2,0. Nesse teste, havia um único n que modelava o canal de comunicação e foi testada a

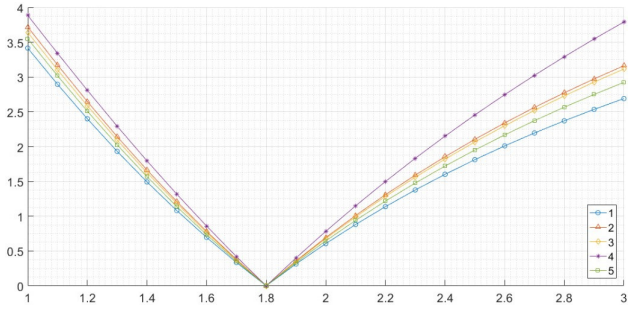

Figura 1. Erro de localização considerando a influência da mudança de referência e do indice de perdas do ambiente.

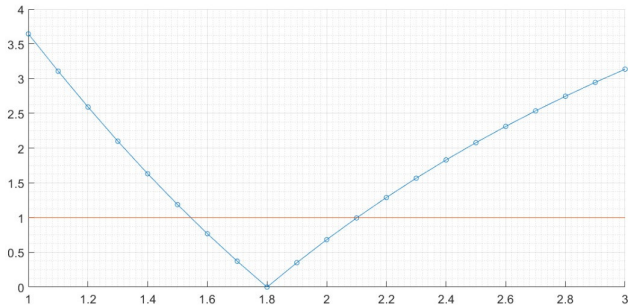

Figura 2. Média dos erros considerando diferentes antenas como referência.

possibilidade do localizador usar um n assumido diferente do correto. Essa seção visa investigar uma condição diferente: considere que houve um erro de $p\%$ em apenas uma das medições de potência realizadas, seja porque o ganho dessa antena difere dos ganhos das demais, ferindo S1; ou o n do canal apresentou uma leve discrepância em relação às demais medições, em virtude de algum obstáculo extraordinário. Foram simulados erros apenas na antena 1 com p = {-10%, -5%, 5%, 10%} em relação ao seu valor medido originalmente e os resultados são apresentados na Fig. 3, adotando o mesmo procedimento da Fig. 2. Observe que continua havendo um intervalo de n assumido que atende a precisão desejada de 1 m em todas as condições testadas. A largura dessa faixa foi menor quando o erro na medição foi negativo e maior em caso contrário, contudo essa variação foi pouco expressiva. Mais significativo foi o deslocamento de faixa, que na condição -10% foi de 1,4 até 1,7, enquanto para 10% foi de 1,9 até 2,7. Logo, não houve um n assumido capaz de atender a precisão de 1 m nas 5 condições testadas. Conforme esperado, a melhor precisão dentre os ajustes simulados (erro = 1,2 m) ocorreu com n = 1,8. A conclusão desse teste é que o método é muito sensível aos erros em uma única antena, restando testar outras situações para confirmar esse comportamento. De qualquer modo, assumindo que fosse utilizada a mesma faixa de n sugerida na seção anterior, a exatidão obtida ficaria em, aproximadamente, 2 m. Considerando as dimensões usuais dos equipamentos em sistemas de potência, ainda seria uma exatidão útil.

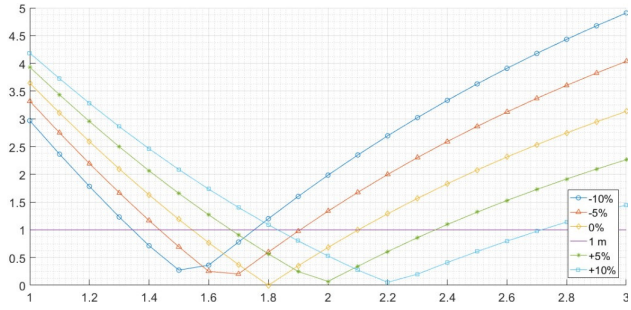

Figura 3. Erro de localização estimado considerando uma incerteza de medição em relação ao dado aferido de uma antena.

4.3 A2

Conforme observado na Fig. 3, o desempenho de A1 é significativamente influenciado pela presença de erros de medição. O pior resultado dentre os casos simulados foi na situação de variação da potencia de sinal recebido em -10%, tanto avaliando a faixa de valores de n que atendem a exatidão desejada (de 1,4 até 1,7) quanto analisando o erro mínimo cometido (0,25 m). Por isso, essa foi a condição escolhida para avaliar A2. A hipótese levantada é que os resultados obtidos por A1 podem ser melhorados se o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MMQP) for adotado. Para investigar essa hipótese, foi realizada uma busca exaustiva variando os pesos da matriz de pesos W no intervalo de 0,50 até 1,50 e com passo 0,25. Por se tratar de um caso com cinco antenas (m = 5), o sistema de equações possui quatro equações e o número total de matrizes testadas é 5^4 = 625 . Foi obtida uma curva de erro versus n para cada matriz W testada, semelhante ao que foi feito para obter as curvas das Figs. 1 e 2, sendo armazenados o número de n's cujo erro atendia a precisão de 1 m e também o menor erro obtido. O número de ajustes de n que atendem a precisão de 1 m é observado na Fig. 4, ordenado de forma decrescente. Uma linha vertical pontilhada foi desenhada para identificar o resultado obtido quando W é uma matriz identidade, pois nessa condição A2 é equivalente a A1. Aproximadamente 50 matrizes W foram capazes de melhorar o resultado obtido por A1, de 4 para 5 valores com a exatidão desejada. Percentualmente, o ganho foi modesto: 25%. Na Fig. 5, são apresentados os erros mínimos obtidos em ordem crescente. Novamente, a condição em que A2 é equivalente a A1 foi destacada por uma linha pontilhada vertical. Observe que mais da metade das matrizes W testadas foram capazes de melhorar o resultado de A1 (362 matrizes). Comparando com o melhor ajuste obtido, a melhoria foi significativa: o erro mínimo saiu de 0,273 m para 0,022 m (redução de aproximadamente 92%). Tal resultado foi obtido com W = [0.7500 1.5000 0.5000 1.5000]. Recapitulando a ideia inicial: 1) Estimar um n de entrada; 2) executa (Souza Neto, 2014) usando todas as referências possíveis; e 3) faz uma média das localizações obtidas. Tem-se que, quando a estimativa é n = 1.8, W é capaz de diminuir o erro de 1.20 m para 0.72 m, que ainda não parece um grande resultado.

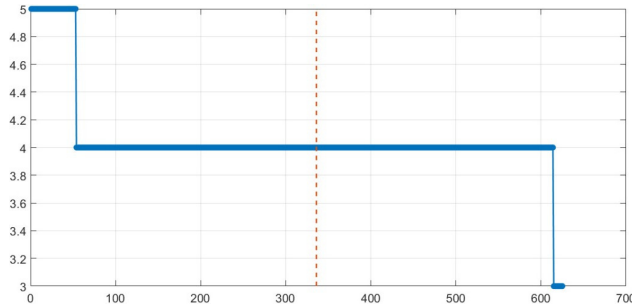

Figura 4. Ajustes de n para o Métodos do Mínimos Quadrados Ponderado.

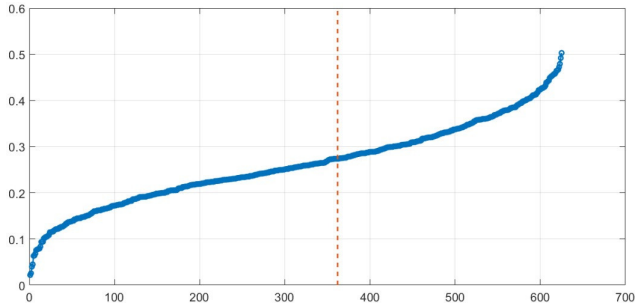

Figura 5. Erro mínimo obtido para cada teste.

Para cada n chutado no princípio, tem-se um valor sem usar W e outro obtido usando W. Desse modo, e observando o erro para todos os n's em vez de restringir a n = 1.8, o melhor resultado obtido sem W para n = 1.5. Usando esse n com W, o erro obtido foi 0.02 m, Figura 6. Com base nos resultados apresentados e também em outros testes realizados, há uma indicação de que A2 pode efetivamente melhorar os resultados de A1, para qualquer valor de n. A próxima meta é buscar um procedimento sistemático para seleção dos pesos, uma vez que é impraticável implementar busca exaustiva quando o número de antenas cresce.

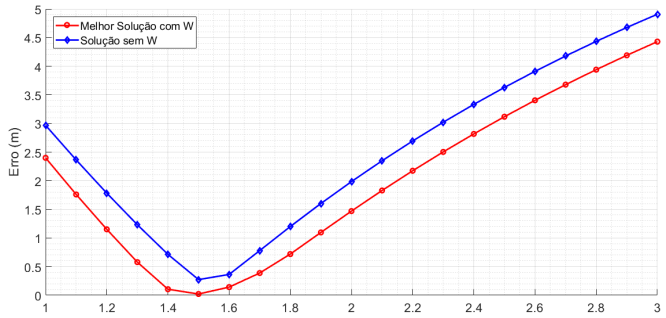

Figura 6. Erro comparativo entre os métodos A1 e A2.

5. CONCLUSÃO

O processo de estimação de localização de descargas parciais foi estudado e implementado considerando aspectos de propagação do sinal no ambiente. Esse processo é altamente influenciado pelas características do meio, mas pode ser otimizado considerando algumas restrições. As restriçoes impostas para os cenários testados dizem respeito a aproximações factíveis em aplicações reais, mas que geram incertezas na localização. No caso dos testes realizados, pode-se observar que a potência do sinal recebido, para o modelo de propagação escolhido (Modelo de propagação no espaço livre), tem uma incerteza associada, não apenas as caracteristicas do indice de perdas, mas também aos pontos de reflexão do sinal no meio, que poderiam ter sido modelados considerando um modelo de propagação mais robusto como o modelo de propagação dos dois raios. De modo geral, pode-se observar também que o erro pode ser mitigado com a implementação de um algoritmo de otimização. Vale salientar que essa otimização, foi possível pelo fato de que a resposta correta é conhecida, essa premissa, não necessariamente é verdadeira para uma aplicação em campo. Tais aspectos, são importantes para que uma generalização possa ser realizada de modo a se obter uma ferramenta de localização que se adapte as diferenças de ambiente e condições de geração das descargas.

REFERÊNCIAS

Bartnikas, R. (2002). Partial discharges. their mechanism, detection and measurement. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 9(5), 763 – 808. doi: 10.1109/TDEI.2002.1038663.

Daeyoung, K., Ingram, M., and Smith, W.W., J. (2003). Measurements of small-scale fading and path loss for long range RF tags. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 51(8), 1740 – 1749. doi:10.1109/TAP.2003.814752.

de Souza Neto, J., Silva, J., Cavalcanti, T., Rodrigues, D., da Rocha Neto, J., and Glover, I. (2010). Propagation measurements and modeling for monitoring and tracking in animal husbandry applications. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE*, 1181 –1185. doi:10.1109/IMTC.2010.5488068.

Farahani, S. (2008). *ZigBee Wireless Network and Transceivers*, volume 1. Newnes, 30 corporate drive, suite 400, burlington, MA 01803, USA, 1 edition.

Glover, I.A. and Grant, P.M. (2004). *Digital Communications*, volume 1. Prentice Hall, second edition edition.

Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge University Press, Cambridge; New York.

Hampton, B. (1999). UHF diagnostics for gas insulated substations. In *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467)*, volume 5, 6 –16 vol.5. doi:10.1049/cp:19990874.

Kuppuswamy, R. (2003). On the UHF partial discharge measurement in transformers. In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003. Annual Report. Conference on*, 349 – 352. doi:10.1109/CEIDP.2003.1254865.

Mohamed, H., Lazaridis, P., Mather, P., Tachtatzis, C., Judd, M., Atkinson, R., and Glover, I.A. (2019). Partial discharge detection and localization: Using software-defined radio. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 13(4), 77–85.

Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*, volume 1. Prentice Hall, second edition edition.

Souza Neto, J.d. (2014). *Localizacao de Descargas Parciais Baseada em um Metodo Radiometrico - Prova do Principio*. PHD thesis, Federal University of Campina Grande, Department of Electrical Enginering.