

Técnica Híbrida Baseada em TDOA e Energia para Localização de Descargas Parciais

R. M. Duarte, J.M.M. Villanueva, J. M. R. de Souza Neto, E.C.T. Macedo

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal da Paraíba – UFPB

João Pessoa, Brasil

rafael.duarte, jmauricio, mauricio, euler@cear.ufpb.br

Resumo— A detecção de descargas parciais em equipamentos elétricos serve para diagnosticar o envelhecimento destes e identificar a existência de defeitos nas partes isolantes. A posição da fonte de descargas parciais em uma subestação pode ser estimada analisando-se os pulsos de descarga captados por antenas. Neste trabalho, é apresentada uma técnica de localização híbrida, a qual combina as informações de energia e instante de chegada para determinar a localização da fonte. Também são apresentadas simulações com e sem ruído, a fim de demonstrar o funcionamento da técnica. Com essa técnica, pode-se estimar a localização da fonte em uma subestação com um mínimo de três antenas por meio de um sistema linear. O modelo computacional desenvolvido para testar a técnica considera a existência de uma fonte de descargas parciais e de antenas de detecção omnidirecionais.

Palavras-Chave — Descargas Parciais; localização; radiometria; ToA.

I. INTRODUÇÃO

A IEC 60270 [1] define descarga parcial (DP) como uma descarga localizada, a qual não chega a romper o material isolante entre os eletrodos. Isso ocorre quando o campo elétrico é mais intenso em uma região específica do isolante. É o caso de uma cavidade preenchida com um gás com permissividade inferior à do material isolante que a engloba.

Uma descarga parcial se manifesta por meio de diversos efeitos físicos e químicos. A emissão de pulsos de corrente, acústicos e eletromagnéticos são alguns dos efeitos físicos. Os efeitos químicos são reações que resultam no aumento da concentração de certos elementos, como o dióxido de carbono (CO₂), o gás metano (CH₄) e o gás ozônio (O₃). Várias técnicas de detecção foram desenvolvidas com base nesses efeitos físicos e químicos, tais como a análise de gases dissolvidos em óleo de transformadores [2] e as técnicas baseadas na detecção com sensores piezoelétricos [3].

A escolha das técnicas de detecção e de localização de descargas parciais depende, entre outras coisas, do equipamento e do ambiente que se deseja avaliar. Em cabos de alta tensão de linhas de transmissão, por exemplo, o defeito pode ser localizado de formas não invasivas, com transformadores de corrente de alta frequência (HFCT). No caso de uma subestação, técnicas radiométricas podem ser as mais adequadas para estimar a localização da fonte de DP.

As técnicas radiométricas são baseadas na detecção e na análise dos pulsos eletromagnéticos emitidos pela fonte de

descargas. Certas características desses pulsos podem ser usadas para estimar a localização da fonte. Existem técnicas que se baseiam na diferença entre os instantes de chegada (TDOA) dos mesmos pulsos de descarga em antenas diferentes [4], enquanto outras usam a direção de chegada (DOA) dos sinais. Recentemente, as energias dos pulsos foram usadas para estimar a localização de fontes de descargas parciais em um laboratório [5].

Neste trabalho, foi desenvolvido um procedimento para estimar a localização de fontes de descargas parciais com base em duas informações que podem ser extraídas dos pulsos: a energia e o instante de chegada (ToA). Assim, o objetivo foi de verificar a aplicabilidade à localização de fontes de DP em uma subestação, usando três antenas para chegar a um sistema linear. Para tanto, um modelo computacional do cenário de medição foi construído usando MATLAB/Simulink ©. Nesse modelo, a fonte de descarga se comporta como uma antena omnidirecional. Foram obtidos resultados da localização pela técnica híbrida considerando ambientes com ruídos do tipo gaussiano, os quais serão expostos na seção IV. O desempenho da técnica proposta foi comparado com o desempenho da técnica de localização por TDOA [6].

II. LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE DESCARGA PARCIAL USANDO TOA-ENERGIA

A. Descrição do Cenário de Medição

Na Fig. 1, está esquematizado o cenário de medição de pulsos de descargas parciais usando antenas omnidirecionais e considerando uma fonte de descargas também omnidirecional. Nesse cenário, os raios R_1 , R_2 e R_3 correspondem às distâncias entre a fonte de DP e as antenas posicionadas no espaço livre. Sabe-se que o pulso viaja com a velocidade da luz no vácuo (c) e que o tempo de propagação do sinal é igual à diferença entre o instante de emissão (t_o) do pulso de descarga e o ToA do sinal. Essas grandezas estão relacionadas por meio da seguinte equação:

$$c = \frac{R}{\Delta t} = \frac{R}{(ToA - t_o)} \quad (1)$$

Para determinar a localização da fonte de uma fonte de DP em duas dimensões usando a técnica híbrida, é necessário um mínimo de três antenas. Cada antena está associada a uma

circunferência. A fonte está localizada na região de interseção das circunferências. Nada impede que mais antenas sejam utilizadas. Caso se trabalhe com mais que três antenas, pode-se trabalhar com os sinais recebidos de maior relação sinal-ruído (SNR).

A atenuação sofrida por um sinal transmitido pode ser calculada por meio de um modelo de propagação. Os modelos de propagação mais complexos normalmente levam em consideração fenômenos de difração, reflexão e dispersão, os quais podem se mostrar importantes em certos cenários [7]. Uma vez que o objetivo do trabalho é verificar o desempenho da técnica híbrida na localização de uma fonte de pulsos como os de DP, os obstáculos e dificuldades comuns em um cenário real (subestação) não foram incluídos. Por esse motivo, foi escolhido o modelo de propagação de Friis, o qual é suficiente para validar a técnica híbrida ToA-Energia de localização de fontes de DP. O modelo de propagação de Friis no espaço livre é dado pela seguinte equação:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r \lambda^n}{(4\pi)^2 R^n} = \frac{k}{R^n} \quad (2)$$

em que λ é o comprimento de onda do sinal e G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente. Considera-se, neste modelo, que a fonte de DP e as antenas receptoras estão na mesma altura.

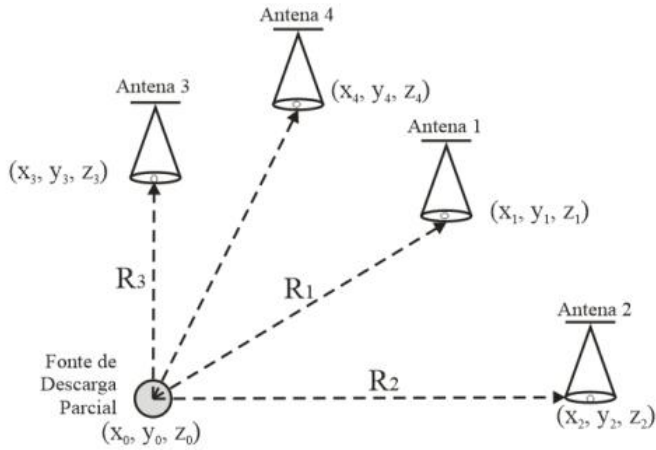


Figura 1. Representação do cenário de simulação.

Partindo-se do fato de que o mesmo pulso é detectado pelas quatro antenas em instantes diferentes, pode-se usar o instante de transmissão do sinal (t_o) para relacionar os instantes de chegada nas quatro antenas por meio das distâncias percorridas pelos mesmos:

$$t_o = ToA_1 - \frac{R_1}{c} = ToA_2 - \frac{R_2}{c} = ToA_3 - \frac{R_3}{c} = ToA_4 - \frac{R_4}{c} \quad (3)$$

A partir de (2) e (3), pode-se chegar a uma equação relacionando a diferença entre as distâncias à diferença entre os instantes de chegada em duas antenas:

$$(R_4 - R_3) = c \cdot (ToA_4 - ToA_3) = c \cdot TDOA \quad (4)$$

A estimativa de ToA de sinais com SNR elevado normalmente é mais exata. Por esse motivo, o cálculo do TDOA foi feito usando os pulsos das antenas 4 e 3.

Uma vez que o termo kP_t é igual para todas as antenas, as potências dos sinais recebidos podem ser relacionadas pela seguinte igualdade:

$$P_t k = R_1^n P_{r1} = R_2^n P_{r2} = R_3^n P_{r3} = R_4^n P_{r4} \quad (5)$$

Portanto, as distâncias R_4 e R_3 podem ser relacionadas por meio da seguinte equação:

$$R_4 = R_3 \sqrt[n]{\frac{P_{R3}}{P_{R4}}} \quad (6)$$

Em que P_{R4} e P_{R3} são as potências dos sinais recebidos pelas duas antenas. Substituindo (6) em (4), obtém-se (7), a qual permite o cálculo da distância R_3 a partir da diferença entre os instantes de chegada e a razão das potências:

$$R_3 = \frac{c(ToA_4 - ToA_3)}{\left(\sqrt[n]{\frac{P_{R3}}{P_{R4}}} - 1\right)} = \frac{TDOA}{\left(\sqrt[n]{\frac{P_{R3}}{P_{R4}}} - 1\right)} \quad (7)$$

Finalmente, a distância R_4 pode ser calculada por (6) e as distâncias R_1 e R_2 podem ser calculadas por usando (8) e (9):

$$R_1 = R_3 \sqrt[n]{\frac{P_{R3}}{P_{R1}}} \quad (8)$$

$$R_2 = R_3 \sqrt[n]{\frac{P_{R3}}{P_{R2}}} \quad (9)$$

A localização aproximada da fonte de DP pode ser encontrada resolvendo-se um sistema composto pelas equações de pelo menos três circunferências.

B. Localização de Fontes de Descarga Parcial em Duas Dimensões

Como ilustrado na Fig. 1, a fonte de DP está localizada nas coordenadas (x_0, y_0) , as quais podem ser calculadas a partir da interseção das circunferências centradas em (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) e (x_4, y_4) . O sistema de equações formado a partir das antenas com maior SNR é dado por:

$$\begin{aligned} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 &= R_1^2 \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 &= R_3^2 \\ (x_0 - x_4)^2 + (y_0 - y_4)^2 &= R_4^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Expandindo-se esse sistema, obtém-se:

$$\begin{aligned} x_0^2 - 2x_0x_1 + x_1^2 + y_0^2 - 2y_0y_1 + y_1^2 &= R_1^2 \\ x_0^2 - 2x_0x_3 + x_3^2 + y_0^2 - 2y_0y_3 + y_3^2 &= R_3^2 \\ x_0^2 - 2x_0x_4 + x_4^2 + y_0^2 - 2y_0y_4 + y_4^2 &= R_4^2 \end{aligned} \quad (11)$$

A segunda equação do sistema pode ser reescrita da seguinte forma:

$$x_0^2 + y_0^2 = R_3^2 + 2y_0y_3 - y_3^2 + 2x_0x_3 - x_3^2 \quad (12)$$

Substituindo (12) em (11), obtém-se um sistema linear de duas equações:

$$\begin{aligned} R_3^2 + 2y_0y_3 - y_3^2 + 2x_0x_3 - x_3^2 - 2x_0x_1 + x_1^2 - 2y_0y_1 + y_1^2 &= R_1^2 \\ R_3^2 + 2y_0y_3 - y_3^2 + 2x_0x_3 - x_3^2 - 2x_0x_4 + x_4^2 - 2y_0y_4 + y_4^2 &= R_4^2 \end{aligned} \quad (13)$$

Em que x_0 e y_0 são as coordenadas da fonte de DP.

As constantes do lado direito das equações do sistema podem ser reunidas em apenas duas constantes, α e β :

$$\alpha = R_3^2 - y_3^2 - x_3^2 + x_1^2 + y_1^2 \quad (14)$$

$$\beta = R_3^2 - y_3^2 - x_3^2 + x_4^2 + y_4^2 \quad (15)$$

O sistema pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} (2y_3 - 2y_1)y_0 + (2x_3 - 2x_1)x_0 &= R_1^2 - \alpha \\ (2y_3 - 2y_4)y_0 + (2x_3 - 2x_4)x_0 &= R_4^2 - \beta \end{aligned} \quad (16)$$

Esse sistema pode ser resolvido por meio seguinte equação:

$$X = A^{-1}b \quad (17)$$

Em que:

$$A = \begin{bmatrix} (2x_3 - 2x_1) & (2y_3 - 2y_1) \\ (2x_3 - 2x_4) & (2y_3 - 2y_4) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$b = \begin{bmatrix} R_1^2 - \alpha \\ R_4^2 - \beta \end{bmatrix} \quad (19)$$

A técnica híbrida de localização pode ser resumida em um simples fluxograma, ilustrado na Fig. 2.

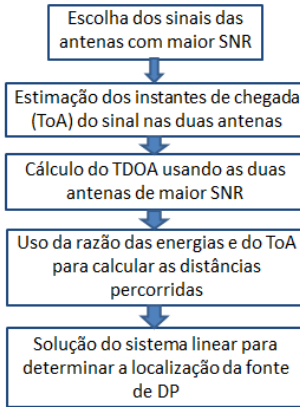


Figura 2. Sinal de DP e a sua respectiva curva EC.

C. Método do Critério da Energia (EC) para Estimacão do ToA

Entre os métodos de estimacão de ToA, foi escolhido o método do critério da energia (EC). Realizando algumas aproximações, é possível demonstrar que o ToA estimado praticamente independe do nível de ruído do cenário [8]. Esse

método consiste em, a cada iteração, subtrair da energia acumulada uma parcela da média do sinal, como na equação abaixo, usada para construir a curva EC:

$$EC_k = \sum_{k=1}^N (x_k^2 - kP_x) \quad (20)$$

Em que P_x é a potência do sinal x , N é o número total de amostras da série. Na Fig. 3, ilustra-se um pulso de descarga parcial e a sua respectiva curva EC. O mínimo dessa curva coincide com o instante de chegada do pulso de DP.

Como pode ser observado na Fig. 4, enquanto o pulso de DP não chega ao sensor, a curva EC tende a acompanhar o segundo termo de (20), uma vez que a energia cumulativa nesse ponto é insignificante. No momento em que o pulso é recebido, a curva EC cresce rapidamente, acompanhando o crescimento da energia cumulativa.

III. MODELO COMPUTACIONAL

Um modelo computacional do cenário proposto foi desenvolvido usando o *software* MATLAB/Simulink©. Efeitos de propagação, como as reflexões dos pulsos de DP foram desconsideradas. O modelo de Friis, apesar de simples, é suficiente para analisar o desempenho da técnica híbrida frente a uma técnica consagrada, como a de localização por TDOA.

Para simular o pulso de descarga parcial, foi usada uma função de transferência de segunda ordem subamortecida que recebe como sinal de entrada um único impulso unitário. Outros blocos são usados para modificar a amplitude do pulso.

O diagrama de blocos do gerador de pulsos de descarga está ilustrado na Fig. 5. O pulso produzido por esse programa possui uma característica de oscilação amortecida. O modelo é composto ainda por blocos auxiliares, os quais simulam a atenuação do canal (Att) e o tempo que o pulso leva para percorrer a distância R (Delay). O atraso e a atenuação são calculados por meio das seguintes equações:

$$Delay = \frac{R}{c} \quad (21)$$

$$Att = \sqrt{\frac{k}{R^n}} \quad (22)$$

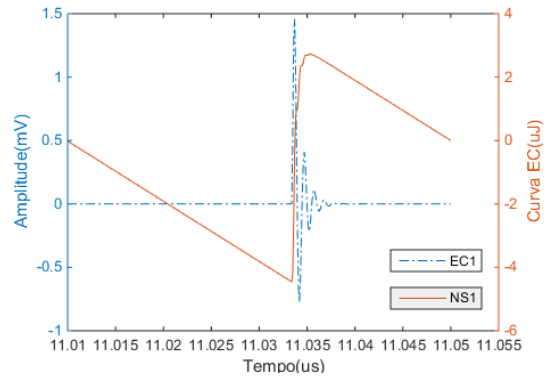


Figura 3. Sinal de DP (NS1) e a sua respectiva curva EC (EC1).

TABELA I. COORDENADAS DAS ANTENAS.

Antena Coordenadas	Coordenadas (m)		Distância (m)
	X	Y	R
Antena 1	8.0000	6.0000	10.0000
Antena 2	12.0000	0.0000	12.0000
Antena 3	0.0000	6.0000	6.0000
Antena 4	0.0000	-8.0000	8.0000

Inicialmente, o modelo computacional foi simulado sem ruído, usando as coordenadas elencadas na Tabela I, enquanto a fonte de DP foi posicionada na origem do plano cartesiano. Na Fig. 5, encontram-se ilustrados os pulsos de descarga recebidos pelas quatro antenas.

O modelo computacional desconsidera certos detalhes práticos, como o tempo que o sinal leva para se propagar da antena para o aparelho de medição e as interferências eletromagnéticas externas.

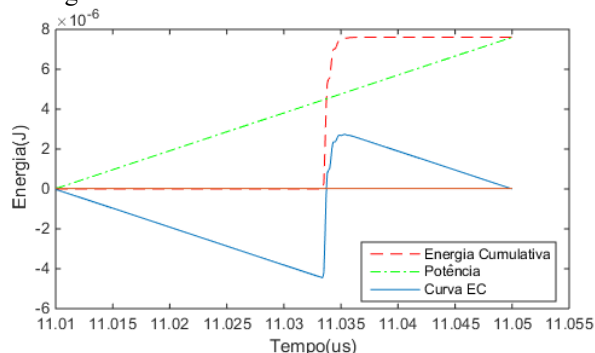


Figura 4. Evolução da curva EC e seus componentes de energia no tempo.

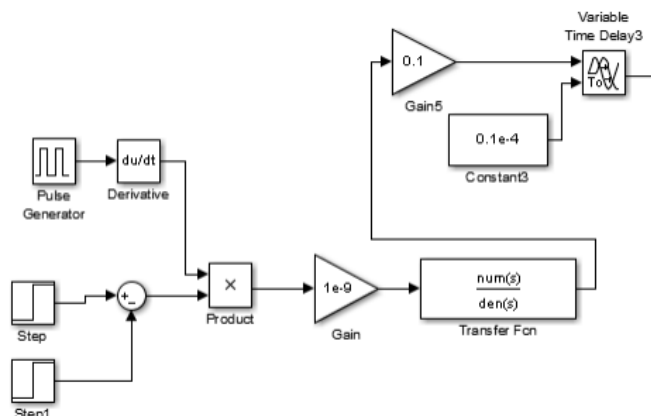


Figura 5. Gerador de pulsos de DP implementado em Simulink®.

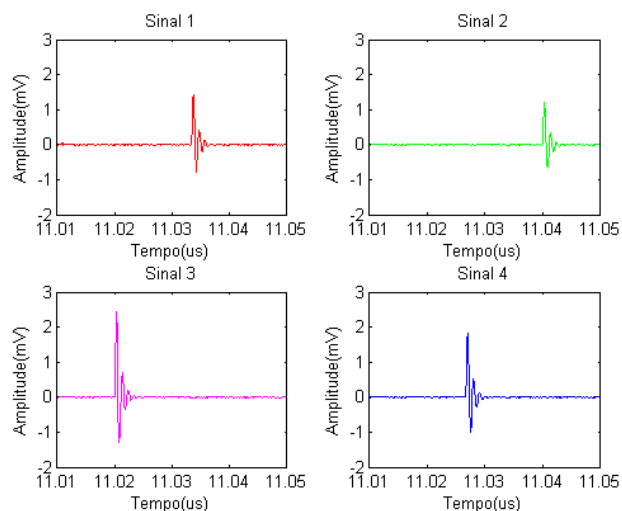


Figura 6. Pulsos de DP detectados pelas quatro antenas.

IV. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações no cenário da Fig. 1, usando o modelo computacional construído. Nas simulações foi adicionado ruído gaussiano com média nula aos pulsos da Fig. 4. As relações sinal-ruído (SNR) dos sinais captados pelas quatro antenas estão elencadas na Tabela II.

TABELA II. SNR DOS SINAIS CAPTADOS PELAS QUATRO ANTENAS.

Std (μV)	Relação Sinal-Ruído (SNR)			
	SNR1	SNR2	SNR3	SNR4
31.191	18.2996	12.7911	51.3296	28.4439
50	7.5614	5.3305	21.1971	11.7430
80	2.9630	2.0711	8.3111	4.6055
100	1.8882	1.3222	5.2355	2.9670
120	1.3323	0.9109	3.6193	2.0552
150	0.8306	0.5850	2.3487	1.3294
180	0.5828	0.4081	1.6159	0.9157
200	0.4718	0.3256	1.3046	0.7389

O menor nível de ruído simulado foi calculado por meio da equação do ruído térmico de uma resistência:

$$\sigma_{ruído} = \sqrt{KTBR} \quad (23)$$

Em que K é a constante de Boltzmann, T é a temperatura em Kelvin, B é a largura de banda observada e R é o valor da resistência da antena. A largura de banda é igual à metade da frequência de amostragem. Neste trabalho, foi adotada uma frequência de amostragem de 5 GHz. A temperatura foi fixada em 27°C e a impedância da antena em 50 Ω .

Além do nível mínimo de ruído, foram realizadas simulações com outros níveis de ruído, admitindo-se a possibilidade de existirem outras fontes de ruído no ambiente. Na Fig. 7, ilustra-se o pulso de DP captado pela primeira antena e corrompido por dois níveis de ruído.

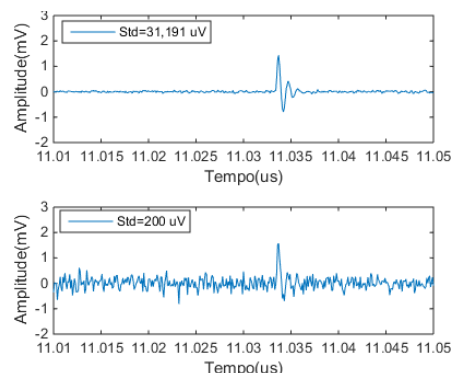


Figura 7. Pulsos de descarga parcial corrompidos por ruído.

Neste trabalho, foram realizadas três simulações. A primeira apresentou a localização de fontes de DP envolvendo o sinal captado pela antena 4, o sinal de maior SNR, captado pela antena 3, e o sinal de menor SNR, captado pela antena 2. O objetivo dessa simulação é demonstrar a qualidade da localização pela técnica híbrida quando não são usados os sinais de maior SNR. A segunda simulação envolveu a localização por meio da técnica híbrida usando os sinais de maior SNR. Finalmente, a terceira simulação consistiu na localização da fonte usando a técnica de TDOA com os sinais de maior SNR.

O erro teórico usado para avaliar os resultados das simulações é dado pela distância entre a posição estimada e a posição exata da fonte de DP.

É importante frisar que os valores de TDOA e de potência usados para calcular as distâncias em todas as simulações foram obtidos calculando-se o valor médio de cem pulsos. A janela temporal de todas as séries é de 40 ns.

a) Simulação 1

Primeiramente, a técnica de localização foi aplicada a uma combinação das antenas 2, 3 e 4. O cálculo do TDOA realizado com base nas informações das antenas 2 e 3. Em outras palavras, a distância R_3 foi calculada primeiro e as demais – R_2 e R_4 – foram a partir dela, usando (5).

Com os raios R_2 , R_3 e R_4 , a localização da fonte de DP pôde ser estimada resolvendo-se um sistema linear. Os erros teóricos estão indicados no gráfico da Fig. 9.



Figura 8. Distância entre a localização estimada na simulação 1 e a localização exata no plano.

b) Simulação 2

A segunda simulação foi realizada calculando-se R_3 com base nos sinais captados pelas antenas 3 e 4, as quais recebem os sinais de maior SNR. Dessa forma, a contribuição do ruído para a estimativa da energia do sinal pode ser minimizada. Por apresentar uma baixa SNR, a antena 2 não foi considerada nesta simulação. No seu lugar, foi usada a antena 1.

Os erros teóricos da localização no plano em função dos níveis de ruído estão indicados na Fig. 8. Neste caso, a troca de apenas uma antena foi suficiente para reduzir pela metade o erro teórico, evidenciando a influência da SNR do sinal para a estimativa da localização da fonte.

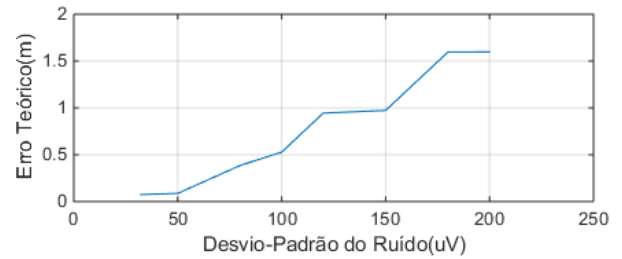


Figura 8. Distância entre a localização estimada na simulação 2 e a localização exata no plano.

c) Simulação 3

Visando avaliar o desempenho da técnica híbrida, foi realizada a localização pela técnica do TDOA, a qual se baseia na interseção de hipérboles descritas pelas seguintes equações:

$$\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} = d_{13} \quad (24)$$

$$\sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} = d_{43} \quad (25)$$

Em que d_{13} e d_{43} são, respectivamente, as distâncias entre as antenas 1 e 3 e a distância entre as antenas 4 e 3.

Neste trabalho, o sistema não-linear foi resolvido pelo método de Newton-Raphson. Os erros teóricos obtidos nesse cenário estão indicados na Fig. 9. A técnica de localização por TDOA foi escolhida como técnica de referência pelo fato de ser a mais usada comercialmente e pela sua exatidão. O erro teórico, nesse caso, é inferior a 10 cm.



Figura 9. Distância entre a localização estimada na simulação 3 e a localização exata no plano.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada uma técnica híbrida de localização de fontes de DP. Ela combina as informações de energia e ToA dos sinais para determinar a localização da fonte. Apesar de ser inferior em exatidão à técnica de localização por TDOA e necessitar do mesmo número de sensores, a técnica híbrida não envolve a resolução de sistemas não-lineares, os quais podem convergir para soluções alternativas ou mesmo divergir, dependendo do conjunto de condições iniciais.

Além da comparação entre a técnica híbrida e a técnica de localização por TDOA, também foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos com duas combinações diferentes de antenas usando a técnica híbrida. A primeira combinação foi feita com as antenas de maior SNR: 1, 3 e 4. A segunda foi feita com as duas antenas de maior SNR – 3 e 4 – e a antena 2, que apresenta a menor SNR. Nesse caso, observou-se que a

opção pela antena 2 deteriora bastante os resultados. O erro máximo de dois metros do primeiro caso não chega a representar metade do erro observado na presença do sinal de menor SNR. Por esse motivo, deve-se usar a SNR dos sinais captados pelas antenas como um critério de escolha da posição das antenas, pois uma escolha adequada influenciara positivamente no desempenho da técnica.

TRABALHOS FUTUROS

Tem-se como proposta de trabalho futuro a avaliação da técnica aqui apresentada utilizando dados reais, por meio de experimentos em laboratório, em que os efeitos físicos de propagação, como a reflexão e a difração influenciam os resultados.

REFERÊNCIAS

- [1] IEC 60270, High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements, 3rd ed, 2000.
- [2] M. Wang, A.J. Vandermaar, K.D. Srivastava, "Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service" in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.18, n.6, pp. 12-25, 2002.
- [3] L.E. Lundgaard, Partial Discharge. XIII. Acoustic partial discharge detection-practical application. IEEE Electrical Insulation Magazine, n. 5, vol. 8, p.34-43, 1992.
- [4] H.H. Sinaga, B.T. Phung, T.R. Blackburn, "Partial discharge localization in transformers using UHF detection method," IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, G.T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271-350.
- [5] J.M.R. de Souza Neto, E.C.T. de Macedo, J.S. da Rocha Neto, E.G. da Costa, S.A. Bhatti, I.A. Glover, "Partial Discharge Localization using Unsynchronized Radiometer Network for Condition Monitoring in HV Substations – A Proposed Approach. Journal of Physics. Conference Series (Online), v. 364, p.012053, 2012.
- [6] P.J. Moore, I.E. Portugues, I.A. Glover, "Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant", in IEEE Transaction on Power Delivery, v. 20, No.3, 2005.
- [7] T.S. Rappaport, Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas, 2ª Ed, Prentice Hall, 2002.
- [8] P. Wagenaars, P.A.A.F. Wouters, P.C.J.M. van der Wielen, E.F. Steenis, "Accurate Estimation of the Time-of-Arrival of Partial Discharge Pulses in Cable Systems in Service", in IEEE Transaction Dielectrics and Electrical Insulation, v.15, No.4, 2008, pp. 1190-1199.
- [9] C. Herold, T. Leibfried, S. Markalous, and I. Quint, "Algorithms for automated arrival time estimation of partial discharge signals in power cables," in Proc. Int. Symp. High. Volt. Eng. (ISH), 2007, paper T7-332.