

# Avaliação de Erros de Localização de Emissores em Ambiente Urbano: Um Estudo de Caso no Rio de Janeiro

Antonio Carlos G. Thomé\*, José Carlos A. Santos\*\*, André G. Adami<sup>+</sup>, Luiz Carlos S. Zamprogno<sup>++</sup>.

Universidade federal do Rio de Janeiro- UFRJ\*, Instituto Militar de Engenharia- IME\*\*, Universidade de Caxias do Sul- UCS<sup>+</sup>, Centro Federal de Ensino Tecnológico Celso Suckow da Fonseca- CEFET-RJ<sup>++</sup>

**Resumo** — Este artigo apresenta um estudo sobre a precisão na localização de um radiotransmissor num ambiente eletromagnético onde o posicionamento relativo dos sistemas de detecção de direção é variado. Os métodos para determinação da posição do emissor são investigados visando-se propor uma estratégia de ação que produza, na prática, uma melhor acurácia na localização do emissor. São apresentadas simulações e análises para algumas situações de interesse. No desenvolvimento teórico, o cenário considerado é ideal: o terreno é plano, o sinal é livre de obstruções e os receptores possuem sensibilidade suficiente para detectar todo e qualquer sinal emitido. Um estudo de caso é realizado na cidade do Rio de Janeiro. Este trabalho integra um projeto maior, denominado Sistema Móvel de Rastreamento de Emissões Rádio – SMER, voltado para órgãos de segurança civis e militares, atuando como uma ferramenta de comando e controle e de apoio a operações de inteligência e operações táticas.

**Palavras-Chave** — Comando e controle, localização de emissores, ambiente urbano.

## I. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento do projeto SMER – Sistema Móvel de Rastreamento de Emissões Rádio, foram investigadas diversas técnicas de determinação de direção de sinais eletromagnéticos (técnicas de DF – *direction finding*) assim como técnicas de localização de emissores passíveis de serem implementadas. O foco da aplicação do SMER é em ambientes urbanos, no combate à marginalidade.

Um cenário urbano é caracterizado por uma grande diversidade de objetos de diferentes formas, tamanhos e atributos. São considerados objetos as edificações, residências ou industriais, a vegetação, os rios e lagos, veículos automotores, áreas de solo exposto, entre outros. De forma geral, a distribuição de tais objetos no terreno não é uniforme e constituem obstáculos a propagação do sinal radioelétrico. Do ponto de vista de propagação de ondas eletromagnéticas, os objetos presentes nos cenários urbanos provocam diferentes efeitos, dependendo de suas dimensões, formas e propriedades elétricas. Para frequências acima de 300 MHz, a propagação é fortemente influenciada por reflexões e difrações nas edificações do terreno. De fato, nesta faixa, em áreas urbanas, o canal de rádio é dominado pela propagação multipercurso.

Antonio Carlos G. Thomé, tgca50@gmail.com; José Carlos A. Santos [araujo@ime.eb.br](mailto:araujo@ime.eb.br); André G. Adami, [agadami@ucs.br](mailto:agadami@ucs.br); Luiz Carlos S. Zamprogno, [Luca.szmp@gmail.com](mailto:Luca.szmp@gmail.com)

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPERJ, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, na modalidade de subvenção econômica.

Os sistemas de DF têm como função a determinação dos ângulos de azimute e de elevação de um emissor a partir da avaliação dos parâmetros do sinal eletromagnético por ele emitido [1]. Na análise de sistemas DF, considera-se que o sinal incidente é uma onda plana. Na maioria dos sistemas, busca-se apenas a informação de azimute, o que corresponde ao cenário onde o receptor e o transmissor encontram-se em um mesmo plano.

Em situações reais, num ambiente urbano, quando um sinal é transmitido, um grande número de ondas secundárias (oriundas de reflexões ou difração) chega ao receptor de diferentes direções, tornando o sinal mais ou menos espalhado. Nestes casos, o sistema de DF deve obter amostras temporais e espaciais da frente de onda do sinal e fornecer o valor estimado para a direção mais provável do emissor [2]. Uma vez determinado o azimute, a reta que liga a antena do sistema de DF ao emissor é chamada de linha de marcação (LOP – *line of position*).

As técnicas de DF podem ser classificadas em grandes grupos, dentre os quais pode-se citar as técnicas de determinação de ângulo de chegada (AOA), de diferença de frequência de chegada (FDOA), de tempo de chegada (TOA) e de diferença de tempo de chegada (TDOA). Uma são mais adequadas a sistemas de radar, outras a sistemas de comunicações com ou sem espalhamento de espectro [3]-[5].

Existem três maneiras básicas para localizar emissores. A primeira abordagem é a triangulação, que utiliza as linhas de marcação que vão de duas ou mais localizações conhecidas até o emissor. A segunda abordagem, medida de ângulo e distância, utiliza uma distância e uma linha de marcação. A terceira, interseção de curvas, usada em sistemas de localização de precisão, envolve a determinação de duas curvas descritas matematicamente que se cruzam na localização do emissor.

Embora seja possível a localização de emissores pela determinação da distância a partir de duas ou mais localizações conhecidas, existem considerações práticas que normalmente limitam esta abordagem à localização de emissores cooperativos. As técnicas de precisão, que usam métodos de interseção de curvas matemáticas, como no método TDOA, têm grande potencial de aplicação em ambientes urbanos (com predominância de propagação por multipercurso), contudo são mais complexas e de mais difícil implementação. As técnicas de determinação de ângulo de chegada funcionam bem em ambientes diversos, inclusive urbanos, segundo os fabricantes, são mais simples tecnologicamente e de mais fácil implementação. Em consequência, equipamentos que usam estas técnicas são

mais acessíveis no mercado, tanto em quantidade quanto em qualidade, a custos razoáveis, mesmo para aplicações militares.

O presente artigo apresenta um estudo sobre a precisão na localização de um radiotransmissor baseado no processo de triangulação, em sistemas de DF que geram a informação de linha de marcação ou ângulo de chegada, fazendo-se variar o posicionamento relativo dos sistemas de detecção. O uso da técnica de triangulação permite uma boa compreensão dos problemas inerentes ao cenário em questão e uma boa avaliação da acurácia na localização de emissores para diferentes posicionamentos de sistemas de DF neste cenário.

A Seção II apresenta as características básicas do SMER. A Seção III apresenta as considerações para as simulações e para as análises realizadas, assim como os métodos utilizados para determinação da posição do emissor. A Seção IV apresenta simulações e análises de situações de interesse, e a Seção V traz os comentários finais e conclusões sobre o trabalho.

## II. O PROJETO SMER

O sistema móvel SMER, concebido para rastrear emissões rádio em ambiente urbano, é constituído por três ou mais estações DF móveis montadas sobre viaturas. Estas se comunicam em tempo-real com um sistema central que processa os sinais recebidos, realiza a triangulação do alvo, processa o áudio para extrair as características da fala, reconhece o locutor e anima uma carta digitalizada que é acompanhada em tempo real por um operador. O SMER ainda registra o instante de tempo e o sinal de áudio da conversação monitorada; acompanha e apresenta no monitor o deslocamento dos emissores no terreno, obtidos no processo de triangulação e também acompanha o deslocamento de uma possível unidade operacional de tropa amiga, através do monitoramento dos GPS de seus integrantes.

O SMER possibilita o planejamento, comando e controle, em tempo real, de operações táticas e mesmo ações de incursão em uma determinada área. Através do rastreamento por triangulação a partir das unidades móveis, é possível acompanhar a movimentação de opositores e, por GPS, a movimentação da tropa amiga, permitindo avaliar as manobras em tempo real e orientar as ações a serem tomadas pelo comandante da operação.

A Fig. 1 apresenta a estrutura funcional do SMER, a qual é composta por oito subsistemas que funcionam de forma assíncrona e em tempo real:

- Subsistema de Rastreamento de Radiofrequências (SRF);
- Subsistema de Recepção e Tratamento de Sinais (SRT)
- Subsistema de Reconhecimento do Locutor (SRL);
- Subsistema de Informação e Análise (SIA);
- Subsistema de Posicionamento por GPS (SPG);
- Subsistema de Localização Geográfica (SLG);
- Subsistema de Persistência e Consultas (SPC) e
- Subsistema de Integração, Controle e Comando (SIC).

A aplicação do SMER é voltada para órgãos de segurança pública, atuando como uma ferramenta de

comando, controle e apoio a operações de inteligência e

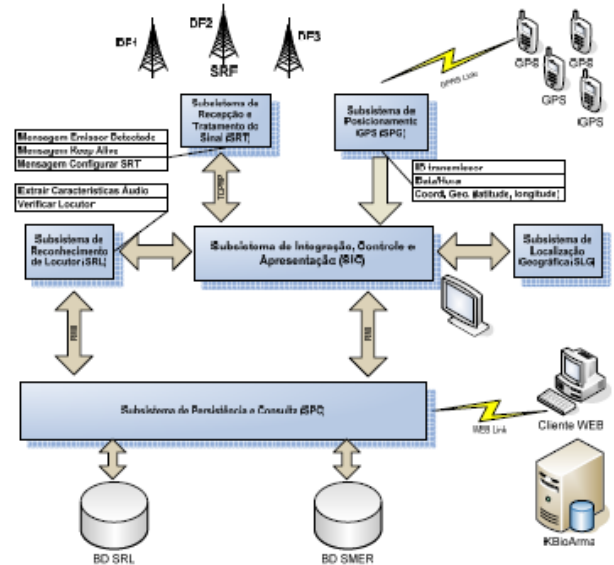


Fig. 1 – Estrutura lógica do SMER.

táticas. Pode, ainda, ter atuação similar quando usado pelas forças singulares na área de guerra eletrônica e segurança interna.

O presente artigo está diretamente relacionado ao funcionamento dos subsistemas SRF e SRT.

## III. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Fig. 2 ilustra a situação onde aparece a linha de marcação de um emissor em relação a um sistema de DF.

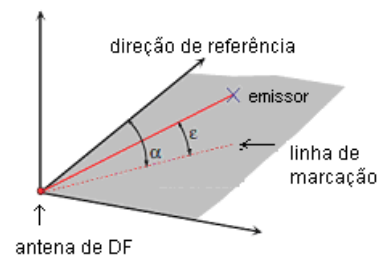


Fig. 2 – Ilustração dos ângulos de azimute ( $\alpha$ ) e elevação ( $\epsilon$ ) e da linha de marcação do emissor a ser usada no processo de triangulação.

O emissor pode estar em qualquer ponto ao longo da linha de marcação. Duas ou mais linhas de marcação devem ser combinadas para permitir a localização (ou, mais precisamente no presente contexto, a geolocalização) do emissor. Se somente duas linhas de marcação são usadas, um único ponto é determinado (a menos que as duas linhas sejam paralelas, naturalmente). Quando três ou mais linhas de marcação são usadas, raramente estas linhas conduzirão a uma única solução.

Sendo a determinação da localização de um emissor um processo estatístico, quanto maior a quantidade de dados independentes, melhor a precisão da solução. Assim, a estimação da posição do emissor com três linhas de marcação

é mais precisa que com duas linhas, e assim sucessivamente. Todavia, no presente estudo são apresentados resultados onde se faz uso de apenas duas linhas de marcação, para fins de comparação com resultados onde há mais de duas linhas disponíveis, e também porque situações práticas como esta podem ocorrer nos teatros de operação em análise.

Na literatura há diversos algoritmos para o cálculo da localização de emissores a partir de múltiplas linhas de marcação. A localização calculada é usualmente chamada de ponto de melhor estimativa (BPE – *best point estimate*). O problema é ilustrado na Fig. 3.

Normalmente, juntamente com o BPE, uma região também é calculada na qual o emissor pode estar com determinada probabilidade, tipicamente de 50 ou 90%. As formas mais comuns desta região são uma elipse (EEP – *elliptical error probable*) e um círculo (CEP – *circular error probable*) [1].

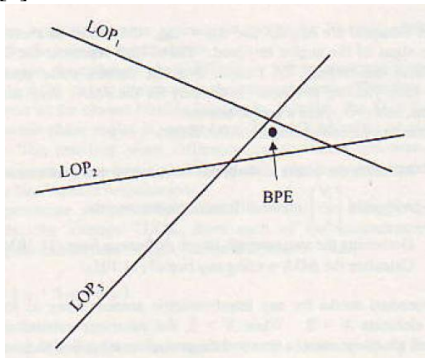


Fig. 3 – Representação de algumas linhas de marcação e do ponto de melhor estimativa para um emissor.

Nos cálculos do BPE, a variância do feixe das antenas, conhecida a priori, normalmente é assumida como a acurácia do equipamento de DF. Se conhecida, a acurácia real deverá ser usada (a qual pode ser obtida de medidas, por exemplo, no processo de calibração do sistema). Para faixas largas de frequência, a variância deve ser caracterizada em toda a faixa de interesse.

Existem fundamentalmente dois métodos para estimação de posição de emissores por triangulação. Um é baseado no método de máxima verossimilhança (ML – *maximum likelihood*) e o outro é baseado no método dos mínimos quadrados (LS – *least squares*). Ambos conduzem a estimativas precisas sobre a posição do emissor. O primeiro é utilizado quando a função densidade de probabilidade dos erros das medidas é conhecida. Não sendo, o segundo método deve ser utilizado. Para uma distribuição Gaussiana, as duas técnicas são equivalentes. Os dois métodos podem ser utilizados com um número arbitrário de sistemas de DF [3].

Quando apenas dois sistemas de DF estão presentes, a determinação do BPE por triangulação pode ser obtida numa primeira aproximação de forma direta, conhecidos os ângulos de chegada do emissor. A interseção dos feixes de 2 DFs corresponde à região onde o emissor possui 46,5% de probabilidade ser encontrado, considerando o feixe de cada DF como o setor angular formado pelas suas linhas de desvio padrão. Tal região é representada pela área hachurada na Fig. 4. Grosseiramente, para fins de estimativa do erro do sistema,

assumindo a interseção das linhas de marcação dos DFs como a posição real do emissor, o CEP de 50% pode ser estimado multiplicando-se por 1,037 o raio do círculo com a mesma área que aquela destacada na Fig.4. Quando três ou mais sistemas de DF estão presentes no cenário em análise, as suas linhas de marcação raramente se interceptam em um ponto.

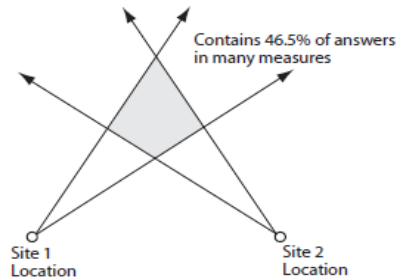


Fig. 4 – Representação da área de localização de dois sistemas de AOA.

Um dos primeiros métodos para determinação da posição de um emissor por triangulação foi apresentado por Stansfield [4] em 1947. Neste método assume-se que os erros das medições de AOA possuem uma distribuição Gaussiana. A melhor estimativa para o BPE para múltiplas linhas de marcação é obtida maximizando-se o expoente da função densidade de probabilidade conjunta resultante.

A solução do método de Stansfield [4] é baseada na Fig. 5, onde o ponto *O* representa a posição real do emissor (não conhecida) e *S* sua posição estimada. A linha de marcação *LOP<sub>i</sub>* se refere ao DF<sub>*i*</sub>.

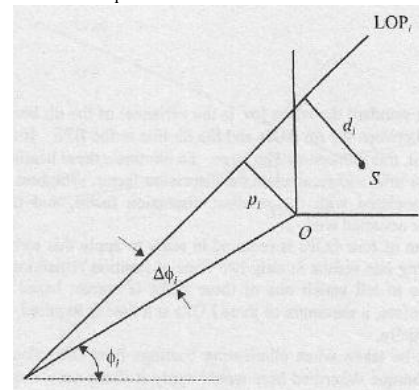


Fig. 5 – Indicação dos erros para a derivação do BPE pelo método de Stansfield (1947).

No método, o BPE é obtido através de

$$x_T = \frac{1}{\lambda\mu - \nu^2} \sum_{i=1}^N p_i \frac{\nu \cos \phi_i - \mu \sin \phi_i}{\sigma_{p_i}^2} \quad (1)$$

$$y_T = \frac{1}{\lambda\mu - \nu^2} \sum_{i=1}^N p_i \frac{\lambda \cos \phi_i - \nu \sin \phi_i}{\sigma_{p_i}^2}$$

onde

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \frac{\sin^2 \phi_i}{\sigma_{p_i}^2}$$

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{\cos^2 \phi_i}{\sigma_{p_i}^2}$$

$$\nu = \sum_{i=1}^N \frac{\cos \phi_i \sin \phi_i}{\sigma_{p_i}^2}$$

$$\sigma_{p_i} = \sigma_{\psi_i} D_i$$

sendo  $N$  o número de linhas de marcação,  $\sigma_{\psi_i}$  a variância do  $i$ -ésimo DF e  $D_i$  a distância deste DF ao emissor.

Os contornos de probabilidade (EEP) rodados de um ângulo  $\phi$  para ficarem paralelos ao eixo das abscissas, são dados por

$$\frac{(x-x_T)^2}{a^2} + \frac{(y-y_T)^2}{b^2} = -2\ln(1-P) \quad (2)$$

onde

$$\frac{1}{a^2} = 2\lambda - \nu \tan \phi$$

$$\frac{1}{b^2} = 2\mu - \nu \tan \phi$$

$$\tan 2\phi = -\frac{2\nu}{\lambda - \mu}$$

sendo  $P$  a probabilidade de o emissor estar dentro da elipse.

O CEP pode ser obtido da elipse do EEP através de

$$r_{CEP} = 0,75\sqrt{a^2 + b^2} \quad (3)$$

onde  $a$  e  $b$  são os eixos da elipse obtidos das expressões anteriores [7]-[9].

#### IV. SIMULAÇÕES E ANÁLISE

As simulações apresentadas neste item têm como finalidade a avaliação da acurácia na localização de emissores num cenário hipotético, onde o terreno é plano, o sinal é livre de obstruções e os receptores possuem sensibilidade suficiente para detectar todo e qualquer sinal emitido. As distâncias selecionadas para os DFs e suas posições relativas são estimadas com base nos possíveis cenários de comunidades da cidade do Rio de Janeiro e no alcance médio de rádios tipo talkabout em ambientes urbanos, de aproximadamente 2 km.

A Fig. 6 apresenta simulações num cenário com um DF na origem do sistema cartesiano e um segundo DF no eixo das abscissas, a 2 km do DF da origem. Os cálculos foram feitos com base no equacionamento da seção anterior.

Os resultados da Fig. 6 mostram a simulação para um emissor na mediatriz entre os dois DFs considerados, com variação de sua distância em relação ao eixo horizontal, para DFs com 1, 2, 4 e 8° de erro RMS. A Fig. 6(a) representa a área de incerteza ( $\text{km}^2$ ) e a Fig. 6(b) representa o raio de incerteza (m). O eixo horizontal da Fig. 6 indica a distância do emissor ao eixo dos DFs. As curvas de mesma cor da Fig. 6(b) foram calculadas com a formulação aproximada, citada

no item anterior, e a equação (3). Os resultados com (3) são os mais pessimistas.

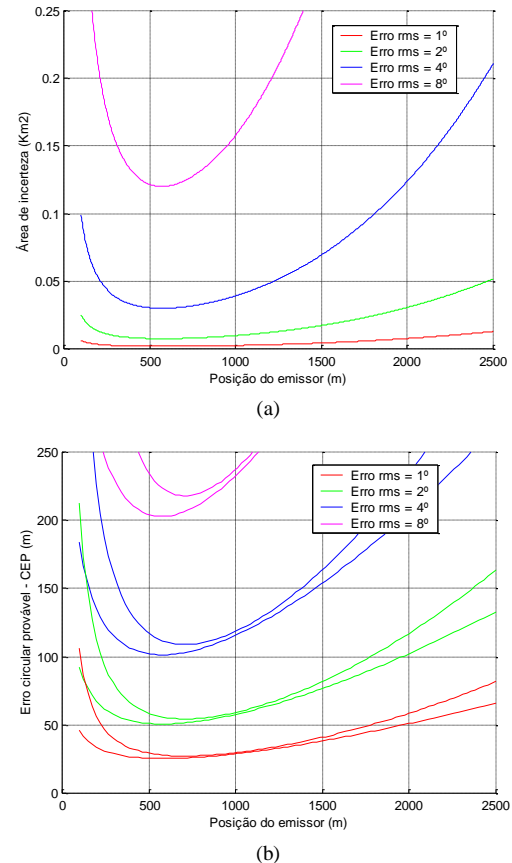


Fig. 6 – Representação da (a) área de incerteza e (b) raio de incerteza de um emissor no eixo central dos dois DFs – em (1 km, y).

Os resultados da Fig. 6(b) mostram que a melhor acurácia na localização do emissor no cenário em questão para sistemas de DF de 1, 2, 4 e 8° de erro RMS são aproximadamente 27, 54, 109 e 218 m, respectivamente, ocorrendo quando o emissor está a aproximadamente 700 m de distância do eixo horizontal, formando ângulo de 90° com os dois DFs. Tais resultados estão apresentados na linha (a) da TABELA I para sistemas com 2 DFs.

Simulações também foram realizadas para os casos em que: o emissor percorre o eixo das ordenadas (eixo y); o emissor se afasta do eixo horizontal, numa posição a 1 km à esquerda do DF situado na origem; e o emissor percorre uma linha horizontal a 500 m do eixo dos 2 DFs (eixo x). Os resultados destas simulações são mostrados nas linhas (b), (c) e (d) da TABELA I para 2 DFs, respectivamente.

Das simulações apresentadas até o momento, a melhor acurácia é de 27 m para um sistema de 1° RMS, quando o emissor está no eixo central dos DFs, a aproximadamente 700 m de distância deste eixo, formando ângulo aproximado de 90° com os dois DFs.

A Fig. 7 apresenta simulações com 2 e 3 DFs, com a formulação das equações (2) e (3) do item anterior. Nas simulações com 2 DFs, os sistemas estão posicionados na origem e a 2 km no eixo horizontal, à direita do primeiro DF,

como nas simulações da Fig. 6. O terceiro DF está posicionado no eixo vertical, a 1 km do DF da origem.

Os resultados da Fig. 7 correspondem àqueles da Fig. 6, com o emissor exatamente entre os dois DFs considerados, variando-se a sua distância em relação ao eixo horizontal. Simulações também foram realizadas com o emissor se afastando do eixo horizontal, numa posição a 1 km à esquerda do DF situado na origem e assim sucessivamente, como nos cenários anteriores. Os melhores valores no cálculo do CEP são apresentados nas linhas (a) a (d) da TABELA I nas colunas de 3 DFs.

Como esperado, o sistema com 3 DFs é mais preciso que o com 2 DFs. Em algumas situações, a incerteza na localização do emissor cai à metade.

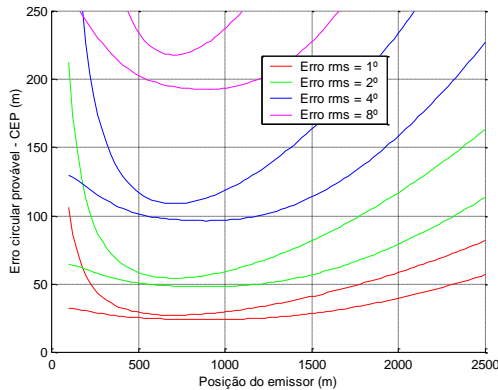


Fig. 7 – Representação do raio de incerteza na localização de um emissor com 2 e 3 DFs para o cenário analisado na Fig. 6.

TABELA I – MELHOR ACURÁCIA (m) DAS SIMULAÇÕES NOS CENÁRIOS ANALISADOS.

	Acurácia do Sistema de DF							
	1°		2°		4°		8°	
	2 DFs	3 DFs	2 DFs	3 DFs	2 DFs	3 DFs	2 DFs	3 DFs
(a)	27	24	54	48	109	96	218	193
(b)	112	92	224	185	447	370	894	740
(c)	29	13	57	26	114	52	228	103
(d)	59	39	117	79	234	159	469	317

Diversas outras simulações foram realizadas no contexto do presente projeto. Por questões de espaço, elas não são apresentadas.

Vale ressaltar que nas simulações realizadas nenhuma análise foi feita para otimizar a posição relativa dos DFs. É importante observar, contudo, que a posição relativa dos DFs influencia significativamente na acurácia do sistema.

Para melhor visualização dos resultados, as regiões de incerteza também foram simuladas. A Fig. 8 apresenta as regiões das elipses de EEP para um sistema com 2 DFs situados na origem e a 2 km no eixo horizontal, como no cenário da Fig. 6. Os pontos com “\*” representam as posições dos DFs. Os valores de acurácia associados correspondem àqueles para 2 DFs da Fig. 6(b) e TABELA I.

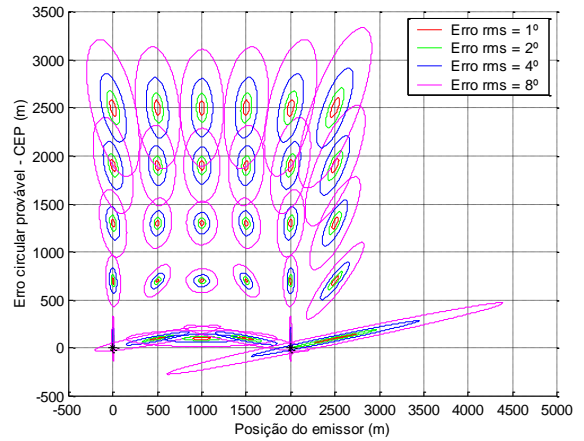


Fig. 8 – Representação das regiões de EEP de um sistema de localização de emissores com 2 DFs.

A Fig. 9 apresenta as regiões das elipses de EEP para um sistema com 3 DFs: um situado na origem, outro a 2 km no eixo horizontal, e um terceiro a 1 km no eixo vertical. Os pontos com “\*” representam as posições dos DFs. Os valores de acurácia associados correspondem àqueles para 3 DFs da Fig. 7 e TABELA I. Os resultados da Fig. 9 mostram uma clara melhoria em relação aos da Fig. 8, particularmente na região interna do triângulo formado pelos 3 DFs.

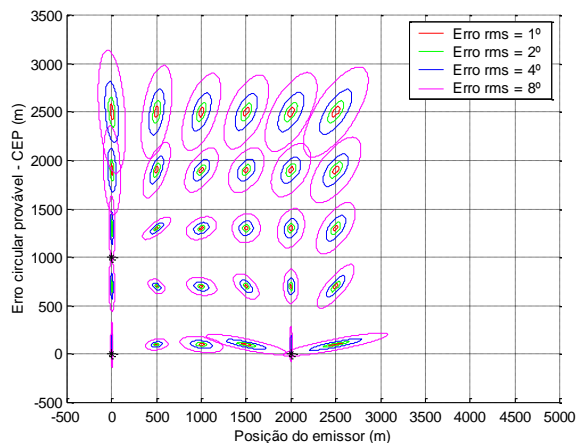


Fig. 9 – Representação das regiões de EEP de um sistema de localização de emissores com 3 DFs em um triângulo retângulo.

Os resultados anteriores reforçam a forte dependência da acurácia do sistema de localização com a quantidade e a distribuição dos DFs. Na prática, isto significa que a aplicação do sistema requer um planejamento prévio, tático, para se obter o melhor desempenho possível, independentemente do grau de acurácia de cada sistema de DF individual.

Uma avaliação do sistema mais realística é realizada utilizando-se a região da Mangueira no Rio de Janeiro como referência. A Fig. 10 mostra esta região, onde estão posicionados 4 DFs (marcados com “\*”) e um emissor (marcado com “\*” – vermelho).

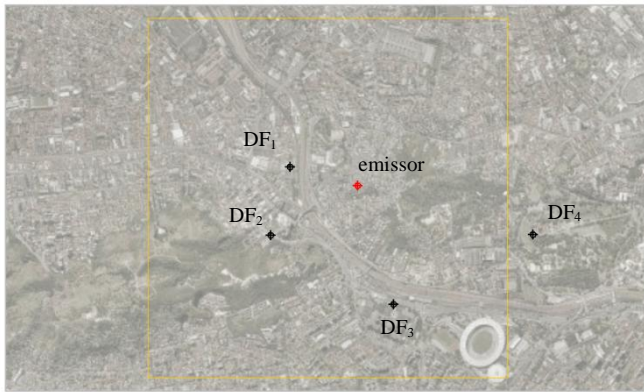


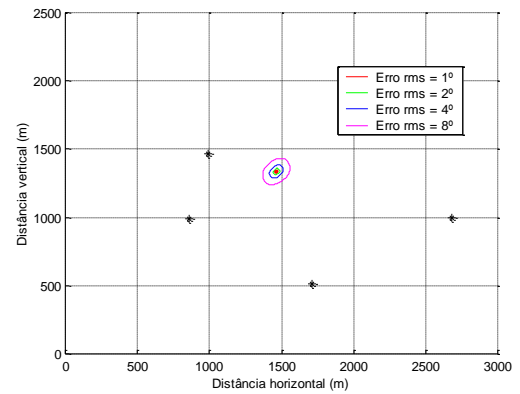
Fig. 10 – Região da comunidade da Mangueira.

Na Fig. 10, o DF<sub>1</sub> está posicionado num prédio do lado oposto da linha férrea, com latitude e longitude dadas por  $(-22,901874^\circ, -43,24223^\circ)$ , o DF<sub>2</sub> está posicionado no morro em frente à comunidade, com coordenadas  $(-22,906143^\circ, -43,243432^\circ)$ , o DF<sub>3</sub> está na UERJ, com coordenadas  $(-22,910452^\circ, -43,23575^\circ)$ , e o DF<sub>4</sub> está numa região da Quinta da Boa Vista, próximo ao Museu Nacional com coordenadas  $(-22,906104, -43,227038)$ . O emissor está posicionado dentro da comunidade, com coordenadas  $(-22,903036^\circ, -43,237996^\circ)$ . A distância entre os DFs 1 e 2 é de aproximadamente 494 m, entre os DFs 2 e 3 é de 980 m, entre os DFs 3 e 4 é de 1084 m e entre os DFs 1 e 4 é de 1197 m. As distâncias dos DFs, 1 a 4, são de 489, 697, 863 e 1267 m, respectivamente. Portanto, teoricamente, os DFs estão dentro do alcance do emissor, considerando este um rádio de alcance de 2 Km.

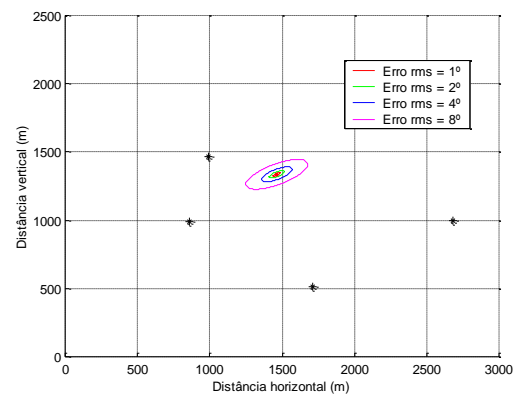
A Fig. 11 apresenta os resultados das simulações do sistema de localização com 2 DFs somente. A origem do sistema de coordenadas apresentado corresponde ao canto inferior esquerdo do quadro laranja da Fig. 10, que tem 2500 m de lado.

Na Fig. 11(a) são utilizados os DFs 2 (morro) e 3 (UERJ). As incertezas neste caso para sistemas de DF de 1, 2, 4 e 8° de erro RMS, são de 17, 34, 67 e 135 m, respectivamente. Na Fig. 11(c) são utilizados os DFs 2 (morro) e 4 (Museu), com incertezas de 30, 60, 120 e 241 m, respectivamente. Simulações também foram realizadas com os demais DFs. Para os DFs 1 (prédio) e 3 (UERJ), por exemplo, as incertezas foram de 17, 35, 69 e 139 m, para sistemas de DF de 1, 2, 4 e 8° de erro RMS, respectivamente. Para os DFs 3 (UERJ) e 4 (Museu), a incerteza foi de 27, 54, 108, 215 m, respectivamente.

Os melhores valores da acurácia do sistema neste cenário são observados para os DFs 2 e 3, situados frontalmente à comunidade. Simulações com os DFs 1 e 2 (não apresentadas), como poderia parecer pelas suas localizações relativas, não produziram melhores resultados.



(a)



(b)

Fig. 11 – Simulação do cenário da Fig. 10 com 2 DFs, sendo (a) DF<sub>2</sub> e DF<sub>3</sub> e (b) DF<sub>2</sub> e DF<sub>4</sub>.

A Fig. 12 apresenta simulações para o caso de 3 DFs. Os resultados de acurácia da Fig. 12(a) e Fig. 12(b) para DFs de 1, 2, 4 e 8° de erro RMS são respectivamente: 12, 25, 49 e 99 m; e 15, 30, 60 e 121 m. Considerando-se os DFs 1, 3 e 4, e 1, 2 e 4, as simulações (não apresentadas) geram erros respectivamente de: 17, 34, 68 e 137 m; e 17, 35, 70 e 139 m. Os DFs utilizados estão indicados nas legendas da Fig. 10. Os melhores resultados no presente cenário foram obtidos com os DFs 1, 2 e 3, situados frontalmente à comunidade.

Os resultados obtidos são aparentemente óbvios, tanto pela proximidade quanto pelo posicionamento dos DFs em relação ao emissor. Contudo, numa situação prática, por questões de restrições quanto ao posicionamento dos DFs ou outras condições do cenário, os resultados poderiam não ser tão evidentes.

Supondo-se hipoteticamente que o relevo da região de interesse produzisse uma obstrução ao DF<sub>1</sub>, por exemplo, o DF<sub>4</sub> deveria ser usado, com conseqüente redução na acurácia do sistema. Por coincidência, no cenário apresentado, o DF<sub>4</sub> é obstruído por um morro, o que não produziria mudanças significativas nos resultados das análises anteriores.

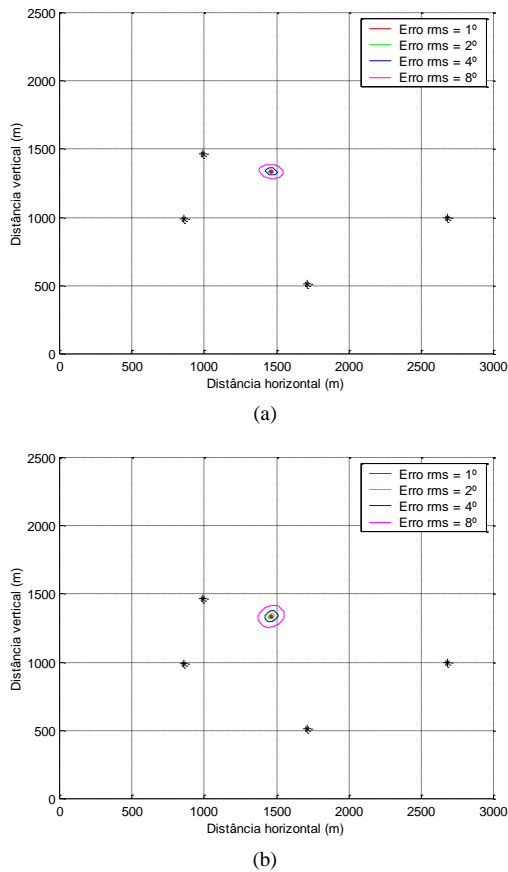


Fig. 12 – Simulação do cenário da Fig. 10 com 3 DFs, sendo (a) DF<sub>1</sub>, DF<sub>2</sub> e DF<sub>3</sub>, e (b) DF<sub>2</sub>, DF<sub>3</sub> e DF<sub>4</sub>.

O ponto levantado tem como objetivo destacar pelo menos uma das demais condições do cenário que podem influenciar na aplicação do sistema de localização adotado no SMER. Efeitos de propagação, atenuação por vegetação ou chuva, ganho das antenas, elevação, entre outros, também podem limitar ou reduzir o número de DFs utilizados em cada medida de AOA.

A Mangueira é uma comunidade típica do Rio de Janeiro, com uma área de aproximadamente 798.128 m<sup>2</sup> e relevo acidentado. É uma comunidade mediana, em relação às demais comunidades do Rio de Janeiro.

Presume-se que a acurácia obtida nas simulações anteriores com o método de triangulação sejam compatíveis com uma aplicação urbana (no cenário em questão), com a ressalva de que os resultados de maior interesse são obtidos particularmente para sistemas de DF de 1° de erro RMS, valor difícil de ser encontrado em sistemas comerciais na faixa de VHF e UHF.

## V. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou uma análise da acurácia de um sistema de localização com 2 e 3 DFs no contexto do projeto SMER para aplicações em uma área urbana. O método utilizado nas análises foi o de triangulação.

Foi observado que sistemas de DF com 1 e 2° de erro RMS produzem acurácia da ordem de poucas dezenas de metros nos cenários analisados. Em todas as simulações, o CEP de 50% foi utilizado.

Verificou-se que a quantidade e a posição relativa dos DFs em relação ao emissor têm forte impacto na acurácia do sistema. Com base no observado, recomenda-se um estudo prévio, minucioso e particularizado para o teatro de operações desejado, para garantir o bom funcionamento de qualquer sistema de localização de emissores, independentemente da precisão dos DFs utilizados no sistema.

Nas análises apresentadas, o cenário foi considerado ideal, onde o terreno era plano, o sinal era livre de obstruções e os receptores possuíam sensibilidade suficiente para detectar todo e qualquer sinal emitido. Numa situação real, efeitos de propagação, relevo, multipercursos e de sensibilidade dos receptores de DF podem afetar os resultados de acurácia previstos na situação ideal. Tais efeitos, naturalmente, devem ser levados em consideração em uma etapa mais avançada de operação do sistema, com o uso de ferramentas de software mais adequadas e dedicadas.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. E. Lipsky, Microwave passive direction finding, 2nd Ed., New York, Scitech Publishing, Inc., 2004.
- [2] Rohde & Schwarz, Co., "Introduction into theory of direction finding", Radiomonitoring and Radiolocation, Products Catalog 2003/2004, pp. 42-58, Germany 2004.
- [3] R. A. Poisel, Introduction to Communication Electronic Warfare Systems, Artech House, Inc., 2002.
- [4] D. Musicki, e W. Koch, "Geolocation using TDOA and FDOA Measurements", Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion, pp. 1987-1994, 2008.
- [5] L. R. Paradowski, "Microwave emitter position location - present and future", Proceedings of the 12th International Conference on Microwaves and Radar - MIKON'98, vol. 4, pp. 97-116, 1998.
- [6] R. G. Stansfield, "Statistical theory of DF fixing", Journal of the IEE (London), Pt. IIIA, 94, 15, pp. 762-770, 1947.
- [7] R. L. Johnson, "Elliptical Error Statistics for Radiolocation Analysis", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-14, no. 4, pp. 663-665, Julho 1978.
- [8] L. R. Paradowski, "Uncertainty Ellipses and Their Application to Interval Estimation of Emitter Position", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-33, no. 1, pp. 126-133, Janeiro 1997.
- [9] Jet Propulsion Laboratories (JPL), "Calculating the CEP", Technical Memo 31, California Institute of Technology, 1987.