

Calibragem de Modelos de Propagação Aplicados à Localização em Telefonia Móvel Celular

Lizandro Nunes, Francisco Madeiro, Emerson Lima e Waslon Lopes

Resumo— Este artigo apresenta o cálculo da localização de celulares a partir da calibragem dos modelos de propagação COST-231 e ECC-33. Por meio de medições do nível de recepção de um celular, os valores de potência são aplicados nestes modelos. A localização é obtida por trilateração de potência e pelo método matemático de Nelder-Mead. Os resultados dos cálculos são comparados com a localização real do celular. Em seguida, para otimizar o Erro Médio de Localização (EML), aplica-se uma calibragem nos parâmetros dos modelos de propagação de modo a se adequarem ao ambiente de testes. Após este processo, verifica-se diminuição do erro entre a posição geográfica do ponto real e do calculado em torno de 55% com relação aos valores obtidos antes da calibragem.

Palavras-Chave— Calibragem, Localização, Modelo de Propagação, Nelder-Mead, Telefonia Celular, Trilateração.

Abstract— This article presents localization calculus of cellular from propagation models COST-231 and ECC-33. The localization strategy is based on measurements of the signal strength at the mobile phone in conjunction with the propagation models. The geographic localization is obtained using trilateration power and Nelder-Mead method. Results are compared with real location of the cellular. Then, to optimize the Location Average Error (LAE), calibrage is applied on the parameters of propagation model according environments tests. After this process, the error between real geographic position and calculated point decreases around 55% in relation to obtained values before calibrage.

Keywords— Calibrage, Localization, Propagation Model, Nelder-Mead, Mobile Telephony, Trilateration.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de localização podem ser aplicados para encontrar a posição geográfica de pessoas, cidades, estabelecimentos comerciais, entre outros. Numa situação de emergência, como por exemplo, um acidente automobilístico, o conhecimento do local permite a economia de um tempo valioso às equipes de resgate para salvar vidas. A precisão nestes casos é fundamental. Ao se levar em consideração serviços de emergência, que são utilizados por milhares de pessoas diariamente ao redor do mundo, o desenvolvimento de sistemas que auxiliem na localização de vítimas é muito importante.

Um grande aliado que surgiu para o avanço dos sistemas de localização foi o telefone celular, embora tenha sido desenvolvido para prover mobilidade às comunicações. Baseado nesse aspecto, em 1996, a Comissão Federal de Comunicações dos Estados Unidos (FCC – *Federal Communications Commission*) adotou regras, em que ligações de emergência originadas

por celular deveriam conter a localização do usuário [1]. A Europa também passou a fazer a mesma exigência. Com objetivo de definir as regras sobre localizações de usuários, no ano de 2000, foi criado o Grupo de Coordenação para acesso à informação de localização de serviços de emergência (CGALIES – *Coordination Group on Access to Location Information for Emergency Services*). Ficou determinado que a precisão na localização dos usuários fosse 50 m e 150 m para 67% e 95% das ligações, respectivamente [2].

Este artigo apresenta o problema da localização do celular com o uso dos modelos de propagação COST-231 e ECC-33 [3], técnica de localização de trilateração de potência e método matemático de Nelder-Mead, com realização de medições do nível de recepção do celular em ambientes de testes reais, mais precisamente em áreas urbanas da região metropolitana da cidade do Recife-PE.

Nos primeiros resultados, as posições geográficas calculadas dos celulares estavam fora das especificações da FCC/CGALIES, portanto para reduzir o EML, ou seja, a distância entre o ponto real e o calculado, foi realizada a calibragem de alguns parâmetros dos modelos de propagação. A mesma fez uso do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), em que se calculou o valor mais adequado para o ambiente de propagação. A calibragem reduziu o EML em torno de 55% com relação aos valores obtidos antes do processo.

II. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Os modelos de propagação são ferramentas matemáticas utilizadas para estimar o valor médio do nível de sinal de uma onda eletromagnética em sistemas de comunicações sem fio [4].

A. Modelo Cost-Walfisch-Ikegami (COST-231)

O Modelo COST-Walfisch-Ikegami, conhecido também como Modelo COST-231 (*Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*), resulta da combinação entre os modelos Walfisch-Bertoni e Ikegami [5]. A combinação foi realizada pela Cooperação Européia no campo da Pesquisa Técnica e Científica (COST) e descreve o ambiente de propagação por meio dos seguintes parâmetros: Altura média dos edifícios (em metros); largura média das ruas (em metros); separação média entre edifícios (em metros); orientação da rua em relação à onda incidente; distância (em km); faixa de frequência: 150 – 2000 (em MHz); altura das antenas da Estação Radiobase (ERB) e do móvel (em metros).

Em síntese, o modelo calcula a perda de propagação, em dB, que o sinal sofre da ERB até a Estação Móvel (EM). Essa

Lizandro Nunes, Francisco Madeiro e Emerson Lima, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas-PPGES, Universidade de Pernambuco- UPE, Recife-PE, Brasil, E-mails: lsilva@poli.br, madeiro@poli.br e eal@poli.br. Waslon Lopes, Departamento de Engenharia Elétrica-DEE, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, E-mail: waslon@dee.ufcg.edu.br.

perda é formada por três parcelas:

$$L = L_0 + L_{rts} + L_{msd}, \quad (1)$$

em que L_0 é a perda no espaço livre, dada por [5]

$$L_0 = 32,4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f), \quad (2)$$

d é a distância em que o ponto se encontra, f é a frequência do transmissor, L_{rts} é a perda por difração do topo das edificações até a rua (*roof-to-street*), dada por

$$L_{rts} = -8,2 - 10[\log_{10}(W_s) + \log_{10}(f) + \log_{10}(\Delta h)], \quad (3)$$

em que W_s é a largura da rua, Δh é a relação entre a altura das edificações e a antena de um aparelho celular e L_{msd} é a perda por multidifração ou multipercurso, calculada por

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b_s), \quad (4)$$

em que b_s é o recuo entre edificações, k_a e k_d são os coeficientes médios de alturas entre edificações e corpo dos usuários, k_f é o coeficiente de ambiente de propagação, L_{bsh} é a perda por espalhamento do sinal de radiofrequência, h_b é a altura média dos edifícios, h_r é a altura média das residências, h_m é a altura de uma pessoa adulta. As expressões para o cálculos desses coeficientes são mostradas a seguir:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h), & \text{para } h_b > h_r \\ 0, & \text{para } h_b < h_r \end{cases}, \quad (5)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_b > h_r \\ 54 - 0,8\Delta h, & h_b \leq h_r \text{ e } d \geq 500 \text{ m} \\ 54 - 0,8\Delta h \left(\frac{d}{0,5}\right), & h_b \leq h_r \text{ e } d < 500 \text{ m} \end{cases}, \quad (6)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & \text{para } h_b > h_r \\ 18 - 15 \left(\frac{h_b - h_r}{h_r - h_m}\right), & \text{para } h_b < h_r \end{cases}, \quad (7)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0,7(f/925 - 1), & \text{subúrbios} \\ 1,5(f/925 - 1), & \text{regiões centrais} \end{cases} \quad (8)$$

A potência recebida (P_r) é igual à diferença entre a potência equivalente isotropicamente radiada (EIRP – *Equivalent Isotropically Radiated Power*) na direção de maior ganho da antena, $EIRP = 69,15$ dbm, valor padronizado pela VIVO S/A na região, e a perda no percurso (L). Logo, o cálculo da distância pode ser formulado a partir de

$$P_r = EIRP - L. \quad (9)$$

Utilizando $f = 1900$ MHz, que é a frequência utilizada durante os testes de campo, e adequando as equações aos parâmetros exigidos pelo COST-231, o cálculo da distância entre o celular e a ERB é dado por

$$d = 10^{\left(\frac{EIRP - P_r - 156,6}{38}\right)}. \quad (10)$$

B. Modelo ECC-33

Desenvolvido pelo Comitê de Comunicações e Eletrônica (ECC – *Electronic Communication Committee*), o Modelo ECC-33 é mais adequado para regiões suburbanas e pequenos trechos urbanos na faixa de 900 a 1900 MHz. A conclusão foi obtida após estudos em cidades da Europa. O cálculo das perdas são regidos pelas equações a seguir [3]:

$$PL = EIRP - Pr - PL_{fs} + PL_{bm} - G_b - G_m, \quad (11)$$

em que PL é perda de propagação do sinal, PL_{fs} é atenuação por espaço livre dada por

$$PL_{fs} = 92,4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f), \quad (12)$$

d é distância, f é frequência em GHz, PL_{bm} é a perda média por espaço livre,

$$PL_{bm} = 20,4 + 9,8 \log_{10}(d) + 7,8 \log_{10}(f) + 9,6[\log_{10}(f)]^2, \quad (13)$$

G_b é o ganho corrigido da antena da ERB,

$$G_b = \log_{10}(h_b/200) \{13,9 + 5,8[\log_{10}(d)]^2\}, \quad (14)$$

h_b é a altura da antena da ERB, G_m é o ganho corrigido da antena da EM,

$$G_m = [42,5 + 13,7 \log_{10}(f)][\log_{10}(h_m) - 0,1] \quad (15)$$

e h_m é altura da antena do celular.

Utilizando $f = 1,9$ GHz e adequando as equações aos parâmetros exigidos pelo Modelo ECC-33, o cálculo da distância entre o celular e a ERB é dado por

$$d = 10^{\left(\frac{EIRP - P_r - G_b - 118,08}{30}\right)}. \quad (16)$$

III. MÉTODO DIRETO DE OTIMIZAÇÃO NELDER-MEAD

O Método de Nelder-Mead ou Método Simplex Downhill é utilizado para solucionar de equações e sistemas não-lineares. Foi concebido em 1965 por John Nelder e Roger Mead e é usado neste trabalho por ser um método direto de otimização, ou seja, sem uso de derivadas [6].

O objetivo é tornar o processo de localização robusto, ou seja, quando a distância calculada entre a ERB e o celular estiver muito alta, o método convergirá para valores próximos das ERBs que forneceram sinal ao celular. No caso de métodos diretos, o uso de gradientes (derivadas), pode conduzir a soluções incoerentes, como, por exemplo, o método encontra repostas que satisfazem às funções matemáticas utilizadas, porém o erro de localização pode distar quilômetros do ponto real [6].

O Método de Nelder-Mead pode ser usado para encontrar soluções de funções com elevada quantidade de variáveis. No caso de uma função com apenas duas variáveis, $f(x, y)$, o simplex de busca é um triângulo, o método busca comparar os valores da função através dos vértices do triângulo. O pior valor, em que $f(x, y)$ é maior, é descartado e um novo triângulo é formado com tamanho menor. Os triângulos vão sendo formados até se encontrarem as soluções da função. As iterações terminam quando associado um ponto de parada, ou seja, se determina um valor mínimo (v_{min}) entre duas tentativas, caso o resultado seja menor que v_{min} o processo é finalizado.

IV. METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA LOCALIZAÇÃO DO CELULAR

O cálculo da localização do celular é realizado em etapas:

- 1) Utilizar as fórmulas dos modelos de propagação COST-231 e ECC-33 para obter a distância entre o celular e a ERB;
- 2) A partir das distâncias, obtêm-se, por trilateração, o sistema de equações não-lineares, embora não considere a existência de obstáculos entre a ERB e o móvel, o que produz erros na estimação da posição [1];
- 3) Resolver o sistema utilizando o método matemático de Nelder-Mead.

V. CALIBRAGEM DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

É possível calibrar modelos de propagação com a seleção de pontos de testes equidistantes em 100 m aproximadamente, conforme sugerido em [7]. Após a coleta dos dados, os resultados são aplicados às equações dos modelos de propagação. O objetivo é calcular novos valores dos parâmetros dos modelos de propagação, para que haja maior aderência entre os modelos e os ambientes de propagação.

Os passos para calibragem estão descritos a seguir:

- 1) Coletar medições em pontos de testes;
- 2) Tratar os dados calculando a distância entre o celular e a ERB, coordenadas geográficas e erro de localização com os valores dos parâmetros dos modelos de propagação sugeridos pelos modelos, tais como, largura de ruas, relação de altura entre topos de edifícios e aparelhos celulares, entre outros;
- 3) Obter, a partir da potência recebida no celular durante as medições de campo, novos valores para os parâmetros dos modelos de propagação por meio do MMQ.
- 4) Recalcular os valores do item 2 com os novos parâmetros obtidos no item 3 para comparar com os resultados da literatura;
- 5) Aplicar os novos parâmetros em novos pontos de testes, para assim constatar a eficiência da calibragem.

A seleção de ambientes de testes para a calibragem dos modelos foi realizada nos bairros de Boa Viagem, Casa Forte e Torre pelo motivo de serem áreas com alta densidade geográfica e grande concentração de edifícios. Todos se encontram na cidade do Recife-PE, sendo visitados 32 pontos diferentes em cada região.

A. Cálculo dos parâmetros para Calibragem do Modelo de Propagação COST-231

A obtenção dos novos parâmetros para calibragem do modelo de propagação COST-231 foi feita da seguinte forma: observou-se que Δh (variações de altura entre o topo das edificações e a altura do celular) e W_s (largura das ruas), em função de P_r (Potência recebida no celular), geravam reduções significativas no EML quando comparados com os demais parâmetros do modelo, como por exemplo L_{bsh} e k_f , portanto este conjunto de parâmetros foi escolhido para o cálculo dos valores mínimos de uma função por meio do MMQ.

O desenvolvimento matemático é feito da seguinte forma: Deseja-se minimizar o funcional

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2,$$

em que n é o número de medidas realizadas, \hat{P}_i é a i -ésima medida realizada em campo e P_i é a previsão do valor da medida dada pelo modelo.

Considerando a função $P_i = EIRP - L_o - L_{msd} + 8,2 + 10 \log_{10}(W_s) - 10 \log_{10}(f) - 10 \log_{10}(\Delta h)$, em que P_t é a potência transmitida (considerada constante e igual a 69,15 dBm), f é frequência de transmissão (também suposta constante e igual a 1900 MHz), W_s é a largura média das ruas e Δh é a diferença de altura entre o topo das edificações e os aparelhos celulares. Os parâmetros W_s e Δh são, desta forma, as variáveis a serem minimizadas pelo MMQ.

Obtem-se o sistema

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial W_s} = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta h} = 0 \end{cases}$$

e observa-se que

$$\frac{\partial \Phi}{\partial W_s} = \frac{\partial}{\partial W_s} \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2 = 2 \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i) \frac{\partial}{\partial W_s} P_i = 2 \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i) \frac{10}{\ln(10) \log_{10}(W_s)} = \frac{20}{\ln(10)} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - \hat{P}_i)}{\log_{10}(W_s)}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Delta h} = \frac{\partial}{\partial \Delta h} \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2 = 2 \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i) \frac{\partial}{\partial \Delta h} P_i = 2 \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i) \frac{-10}{\ln(10) \log_{10}(\Delta h)} = \frac{-20}{\ln(10)} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - \hat{P}_i)}{\log_{10}(\Delta h)}$$

Igualando simultaneamente ambas as equações a zero tem-se o sistema nas variáveis W_s e Δh :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - \hat{P}_i)}{\log_{10}(W_s)} = 0 \\ \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - \hat{P}_i)}{\log_{10}(\Delta h)} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Ressalta-se que, no sistema 17, deve ser utilizado $P_i = P_t - L_o - L_{msd} + 8,2 + 10 \log_{10}(W_s) - 10 \log_{10}(f) - 10 \log_{10}(\Delta h)$ na efetiva montagem do sistema. Os fatores $\frac{1}{\log_{10}(W_s)}$ na primeira equação e $\frac{1}{\log_{10}(\Delta h)}$ na segunda equação podem ser colocados em evidência (como feito com os fatores $\frac{20}{\ln(10)}$ e $\frac{-20}{\ln(10)}$ nas equações originais) e cancelados quando se iguala cada equação do sistema a zero fornecendo a equação:

$$\sum_{i=1}^n P_t - \hat{P}_i - L_o - L_{msd} + 8,2 + 10 \log_{10}(W_s) - 10 \log_{10}(f) - 10 \log_{10}(\Delta h) = 0$$

Considerando que os termos P_t e f são os mesmos em cada uma das n medidas e que os termos L_o e L_{msd} dependem de cada medida, ou seja, $L_o = L_{o,i} = 32,4 + 20 \log_{10}(d_i) + 20 \log_{10}(f)$ e $L_{msd} = L_{msd,i} = k_a + k_d \log_{10}(d_i) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b_s)$, em que todos esses parâmetros foram explicados na Seção II-A e d_i é a i -ésima distância (conhecida) utilizada para calibragem de W_s e Δh , tem-se que:

$$n P_t - \sum_{i=1}^n \hat{P}_i - 32,4n - 20 \sum_{i=1}^n \log_{10}(d_i) - 20n \log_{10}(f) - n k_a - k_d \sum_{i=1}^n \log_{10}(d_i) - n k_f \log_{10}(f) + 9n \log_{10}(b_s) + 8,2n + 10n \log_{10}(W_s) - 10n \log_{10}(\Delta h) = 0$$

Resolvendo as equações chega-se a $\Delta h = 32,80$ m e $W_s = 5,70$ m. Estes valores estão coerentes com a realidade dos

bairros dos pontos de testes, pois atendem às configurações geométricas do ambiente de medição. O Δh , por exemplo, é a relação entre a altura dos celulares e os topos dos edifícios e o W_s é o recuo que casas e edifícios possuem entre si.

B. Cálculo dos parâmetros para Calibragem do Modelo de Propagação ECC-33

De maneira análoga à Seção II-A, é possível obter novos parâmetros para o modelo de propagação ECC-33. Nele foi escolhido o parâmetro G_b (Ganho corrigido da antena da ERB) e G_m (Ganho corrigido da antena da EM). Os valores calculados são: $G_b = 9,91$ dBi e $G_m = 1,22$ dB. Percebe-se coerência nos valores, pois é a relação entre as perdas que o sinais sofrem no percurso e são corrigidas pelos ganhos das antenas especificados pelos fabricantes [4], [8].

VI. RESULTADOS

Os resultados apresentam as dispersões ao redor do EML e o percentual de pontos dentro das especificações da FCC/CGALIES, antes e depois da calibragem dos parâmetros dos modelos de propagação. O ambiente de testes se caracteriza como urbano, possui 32 pontos, sendo todos situados em bairros da região metropolitana da cidade do Recife-PE, a saber: Atacadão; Avançar; Bomp_in; Bomp_out; Bomp_Piedade; BVG; Carrefour_in; Carrefour_out; Casa Forte; Clinical Center; CREA; Cultura; Edf_Janaina; Edmar; Extra_in; Extra_out; Golden Beach; Guaiamum; Habiserv; Htvila; Jaqueira; Padbv_in; Padbv_out; Pracinha_BVG; QoS; SENAC; SESC; Torre; Trade Center; Trindade; UNICAP e Yeda.

Nos 32 pontos de testes foram realizadas medições do nível de recepção do celular. Ressalta-se que esses pontos são diferentes dos coletados para o processo de calibragem descrito na Seção V. Em seguida, partiu-se para os cálculos das distâncias às ERBs. Por Trilateração de Potência, em que são medidas as contribuições de potência de três ERBs, e pelo método matemático de Nelder-Mead obteve-se a localização geográfica do celular. Finalmente, comparou-se o EML entre os pontos reais e os calculados, os quais são detalhados nas Seções VI-A e VI-B.

A. Resultados Pré-calibragem

As Figuras 1 e 2 mostram as dispersões em torno do EML antes da calibragem dos modelos de propagação COST-231 e ECC-33. Verifica-se a distribuição dos erros nos 32 pontos de testes, bem como EML de 176 m e 255 m para o modelo COST-231 e ECC-33, respectivamente.

A Figura 3 mostra o percentual de pontos do ambiente de testes que estão dentro das especificações internacionais da FCC/CGALIES, em que verifica-se 28% para o COST-231 e 18% para o ECC-33.

Ainda nas Figuras 1 e 2, observa-se que o modelo COST-231 tem desempenho superior ao ECC-33, uma vez que o EML é menor. Essa característica reflete diretamente nos valores da Figura 3, em que o COST-231 também se comporta melhor, haja visto que possui uma maior quantidade de pontos dentro das especificações da FCC/CGALIES. Entretanto, os valores

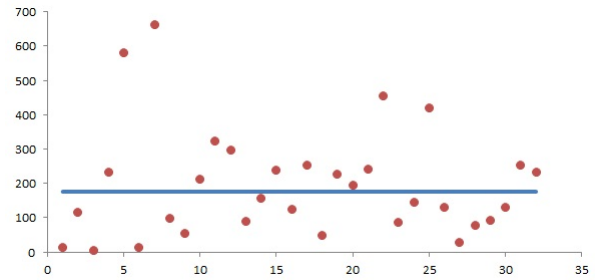


Fig. 1. Dispersão do EML antes da calibragem do modelo COST-231.

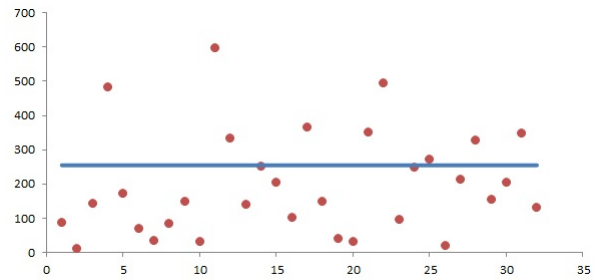


Fig. 2. Dispersão do EML antes da calibragem do modelo ECC-33.

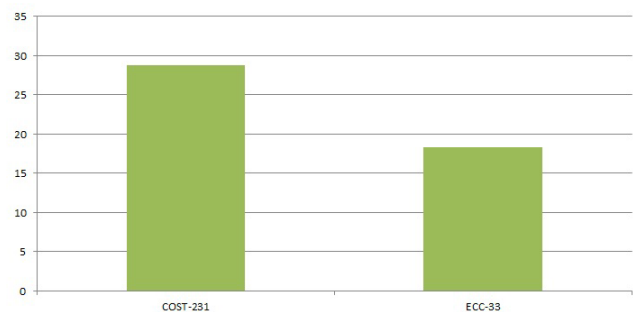


Fig. 3. Percentual de pontos dentro das especificações da FCC/CGALIES antes da calibragem dos modelos de propagação.

apontados nas Figuras 1, 2 e 3 não atendem às especificações da FCC/CGALIES, mesmo para o modelo COST-231, o qual se sobressaiu.

É exatamente nesse ponto em que pode ser constatada a grande contribuição do artigo, ou seja, a aplicação da calibragem nos modelos de propagação COST-231 e ECC-33. A partir dos novos valores dos parâmetros calculados nas Seções V-A e V-B, as posições geográficas dos pontos de teste são reavaliadas, pois o processo visa a aderência dos parâmetros ao tipo de terreno em que estão sendo aplicados, conseqüentemente, a melhoria do desempenho dos modelos de propagação na solução do problema de localização de celulares.

B. Resultados Pós-calibragem

As Figuras 4 e 5 mostram as dispersões do EML depois da calibragem dos modelos de propagação, em que verificam-se melhorias em relação aos valores exibidos nas Figuras 1 e 2, pois o EML do COST-231 caiu de 176 m para 84 m,

melhoria de 52,3%. Por outro lado, o ECC-33 caiu de 255 m para 102 m, obtendo melhoria em torno de 58,8%. Também constata-se que a distribuição dos erros em cada ponto, ficou mais concentrada, o que denota o benefício da calibragem no processo de localização, haja visto que o EML diminuiu em praticamente todos os 32 pontos de testes.

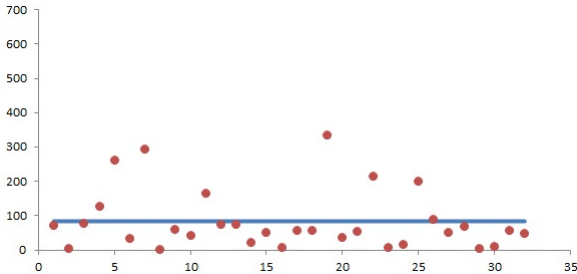


Fig. 4. Dispersão do EML depois da calibragem dos modelo COST-231.

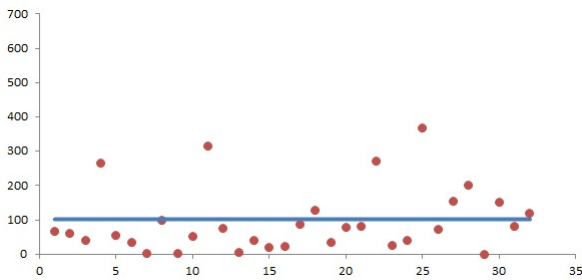


Fig. 5. Dispersão do EML depois da calibragem do modelo ECC-33.

A Figura 6 mostra o comparativo do percentual de pontos do ambiente de testes dentro das especificações internacionais da FCC/CGALIES antes e depois da calibragem dos parâmetros dos modelos de propagação. Verifica-se aumento de 28% para e 72% no Modelo COST-231 e aumento de 18% para 56% no Modelo ECC-33.

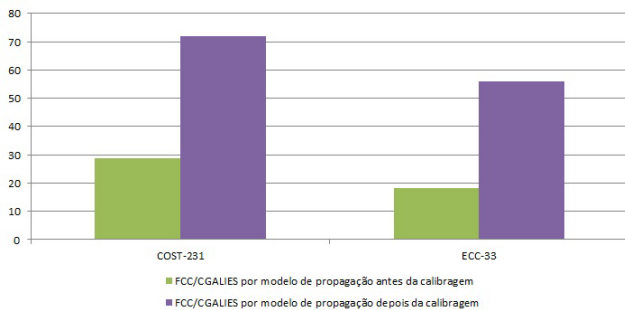


Fig. 6. Percentual de pontos dentro das especificações da FCC/CGALIES depois da calibragem dos modelos de propagação.

Após a calibragem, o modelo de propagação COST-231 mostrou desempenho melhor que o ECC-33, tanto no EML quanto no percentual de pontos dentro das exigências dos órgãos reguladores FCC/CGALIES.

VII. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o cálculo da posição geográfica de celulares em ambientes urbanos a partir do nível de recepção no aparelho, modelos de propagação COST-231 e ECC-33, trilateração de potência, método de Nelder-Mead e principalmente pela calibragem de parâmetros dos modelos de propagação.

Os primeiros resultados, pré-calibragem, não estavam dentro das exigências da FCC/CGALIES, porém depois do procedimento, em que os novos parâmetros substituíram os valores informados pela literatura, o percentual de pontos atendidos pelas normas internacionais subiu de 28% para 73% no COST-231 e elevou-se de 18% para 56% no ECC-33. O EML caiu de 176 m para 84 m no COST-231 e baixou de 255 m para 102 m no ECC-33. Também é importante destacar que outros artigos acadêmicos, como, por exemplo, [9] e [10] possuem erros de localização semelhantes aos deste trabalho.

Como trabalhos futuros, pode-se pesquisar métodos de localização híbridos, aliando telefonia celular a redes sem fio [8] e Sistemas de Posicionamento Global (GPS) [11].

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a VIVO S/A, a CAPES e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] E. M. P. Guedes. Estudo de técnica híbrida de localização de estações móveis baseada em TDoA e PAoA. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Instituto Militar de Engenharia (IME), Janeiro 2003.
- [2] B. Luden, A. Pickford, and J. Medland. Final report on implementation issues related to access to location information by emergency services (E1120) in the European Union. In *Coordination Group on Access to Location Information for Emergency Services - CGALIES*, volume 1, Brussels, Belgium, January 2002. CGALIES plenary.
- [3] M. Alshami, T. Arslan, J. Thompson, and A. T. Erdogan. Frequency analysis of path loss models on WIMAX. In *3rd Computer Science and Electronic Engineering Conference*, pages 1–6, Edinburgh, UK, 2011.
- [4] G. A. Cavalcante. Otimização de modelos de predição da perda de propagação aplicáveis em 3,5 GHz utilizando algoritmos genéticos. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, UFRN-CT, Janeiro 2010.
- [5] J. N. Portela. *Planejamento celular usando diagrama de Voronoi*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, 2006.
- [6] W. H. Press and Saul A. Teukolsky. *Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing*. 3ª Edição, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2007.
- [7] K. Dhondge, H. Park, and B. Choi. Energy-efficient cooperative opportunistic positioning for heterogeneous mobile devices. In *21st International Conference Computer Communications and Networks (ICCCN)*, University of Missouri, Kansas City, Texas, USA, 2012.
- [8] L. Brás, M. Oliveira, and N. B. Carvalho. Improved sectorised antenna for indoor localization systems. In *41st European Microwave Conference*, pages 1003–1006, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, UK, Outubro 2011.
- [9] I. Constandache and L. Cox. Enloc: Energy-efficient localization for mobile phones. In *IEEE International Conference on Computer Communications - INFOCOM 2009*, pages 2716 – 2720, Rio de Janeiro–RJ, Brazil, April 2009.
- [10] E. Grosicki and K. Abed-Meraim. A new trilateration method to mitigate the impact of some NLOS errors in toa measurements for mobile localization. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 4, pages 1045 – 1048, Paris, France, March 2005.
- [11] C. Fritsche and A. Klein. On the performance of hybrid GPS/GSM mobile terminal tracking. In *The IEEE International Conference on Communications Workshops*, pages 1–5, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany, Junho 2009.