SPRad - Sistema de predição de cobertura radioelétrica

Cláudio Garcia Batista, Danielle Mendonça Okamoto e Cássio Gonçalves do Rego
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Eletrônica, Belo Horizonte – MG
e-mails: claudio@cpdee.ufmg.br, danimoto@gmail.com e cassio@cpdee.ufmg.br

***Resumo*—No presente trabalho é apresentada uma ferrramenta computacional para utilização em predição radioelétrica, a qual pode ser aplicada nas faixas de HF, VHF e UHF por meio do emprego de modelos de predição de cobertura radioelétrica diversos (analíticos, semi-empíricos e empíricos), com destaque para uma versão do Método dos Momentos aplicada a terrenos mistos com baixa rugosidade. A referida ferramenta possui banco de dados para armazenamento e análise estatística. Resultados são exibidos para estudos de casos com medidas realizadas em Brasília e regiões da Dinamarca.**

***Palavras-Chave*—Software de predição radioelétrica, propagação em HF, VHF e UHF, equações integrais.**

I. Introdução

A simulação do espalhamento de ondas eletromagnéticas em cenários reais como ferramenta de previsão de cobertura radioelétrica assume papel fundamental no projeto, implantação e gerenciamento de redes de comunicações sem fio. Diferentes métodos de predição radioelétrica foram desenvolvidos e, de maneira geral, podem ser agrupados como analíticos, semi-empíricos e empíricos [1]. No presente trabalho apresenta-se uma ferramenta computacional em cuja implementação se utiliza diferentes métodos de predição da atenuação nas faixas de HF, VHF e UHF. O *software* nomeado SPRad (Sistema de predição de cobertura radioelétrica), foi inicialmente desenvolvido como ferramenta didática para a comunidade acadêmica mas também apresenta aplicações práticas em engenharia de transmissão, e utiliza um modelo baseado na equação integral de Ott [2] e na Recomendação ITU-R 368-7 [4] para utilização na faixa de HF, além de modelo baseado em equações integrais para o campo elétrico (EFIE) e magnético (MFIE) [5]-[6], na Recomendação ITU-R 1546-2 [7] e no modelo da terra plana [1], para as faixas de VHF e UHF.

O destaque na implementação do *software* aqui apresentado é o emprego da formulação de equações integrais, resolvidas por meio da aplicação do Método dos Momentos, em uma abordagem desenvolvida por Batista a partir dos trabalhos de Moreira [8] e Teperino [9], que pode ser encontrada em detalhes em [6]. As equações integrais do campo elétrico (EFIE) e do campo magnético (MFIE) são adaptadas para aplicação em terreno irregular, não-homogêneo, com baixa rugosidade elétrica, nas polarizações vertical e horizontal. Aproximações recorrentes na literatura foram adotadas [10], [11]: o retro-espalhamento da energia foi desprezado (terreno assumido eletricamente suave), permitindo o cálculo recursivo das correntes equivalentes através do Método dos Momentos. Assume-se que o terreno é invariante na direção perpendicular ao plano de incidência dos campos eletromagnéticos sobre o relevo, o que proporciona a aplicação do método da fase estacionária e a consequente redução de integrais de superfície em integrais de linha. O método de aceleração para campos distantes (FAFFA) proposto Chew *et al.* [12], e Brennan *et al.* [13] é utilizado para agilizar o cálculo das correntes equivalentes nas equações integrais (EFIE e MFIE), aumentando a aplicabilidade do *software* em casos práticos.

Os modelos computacionalmente intensivos implementados para as faixas de VHF e UHF foram validados mediante sua aplicação em estudos de caso em duas campanhas de medidas: resultados obtidos por Hviid *et al.* [11] em regiões da Dinamarca e o trabalho realizado por Mayrink *et al.* [14] com medições feitas em Brasília-DF.

O presente artigo está organizado da seguinte forma: na seção II são apresentados os modelos de predição implementados, com maior detalhamento para o método baseado em equações integrais/Método dos Momentos para VHF e UHF; a seção III detalha o *software* de predição; a seção IV exibe os resultados obtidos nos dois estudos de casos considerados; a seção V expõe as conclusões; a seção VI é dedicada a agradecimentos e finalmente a seção VII enumera as referências consultadas.

II. Modelos de Predição

A. Modelo Analítico para VHF/UHF (Método dos Momentos)

O modelo analítico para predição em VHF/UHF é derivado a partir das equações integrais EFIE e a MFIE [15]:

$$\frac{\vec{E}(\vec{r})}{T} = \vec{E}^i(\vec{r}) + Z_0 L_1\left[\vec{J}_s(\vec{r}')\right] + L_2\left[\vec{M}_s(\vec{r}')\right], \quad (1)$$

$$\frac{\vec{H}(\vec{r})}{T} = \vec{H}^i(\vec{r}) + \frac{1}{Z_0} L_1\left[\vec{M}_s(\vec{r}')\right] - L_2\left[\vec{J}_s(\vec{r}')\right], \quad (2)$$

onde $T = 1$ para ponto de observação $\vec{r}$ localizado fora da superfície S' ou $T = 2$ para ponto sobre a superfície, $\vec{E}^i(\vec{r})$ e $\vec{H}^i(\vec{r})$ repesentam os campos incidentes, $\vec{J}_s$ e $\vec{M}_s$ são, respectivamente, a corrente elétrica equivalente e corrente magnética equivalente, e Z_0 é a impedância intrínseca do vácuo. Os operadores L_1 e L_2 aplicados a uma corrente genérica $\vec{I}_s(\vec{r}')$ são definidos como:

$$L_1\left[\vec{I}_s(\vec{r}')\right] = -jk_0 \oint_{S'} \left[\vec{I}_s(\vec{r}')G(\vec{r},\vec{r}') - \frac{\nabla'\cdot\vec{I}_s(\vec{r}')\nabla' G(\vec{r},\vec{r}')}{k_0^2}\right] dS', \quad (3)$$

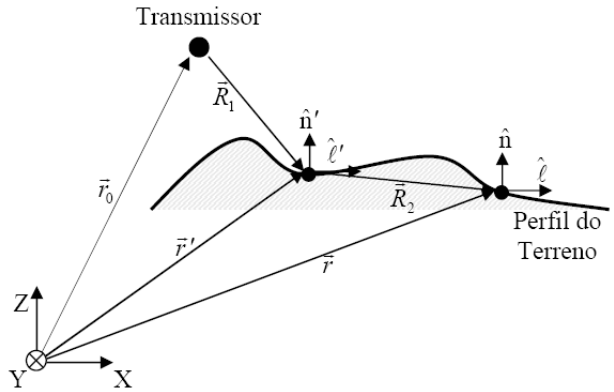


Figura 1. Definições e vetores.

$$L_2\left[\vec{I}_s(\vec{r}')\right] = -\oint_{S'}\left[\vec{I}_s(\vec{r}') \times \nabla' G(\vec{r},\vec{r}')\right] dS', \tag{4}$$

onde $G(\vec{r},\vec{r}')$ é a função de Green tridimensional no espaço livre. As equações integrais apresentadas são utilizadas na situação da Figura 1, onde são exibidos os vetores envolvidos.

Considera-se que o terreno é invariante na direção $\hat{y}$ ortogonal à direção de propagação, assim é possível a aplicação do método da fase estacionária na avaliação das integrais de superfície em (3) e (4). O solo é modelado por trechos homogêneos, localmente planos e as perdas são caracterizadas por uma impedância de superfície $Z_g(\vec{r})$ baseada na condição de contorno de Leontovich [8],[16]:

$$\hat{n} \times \vec{E}(\vec{r}) = Z_g(\vec{r})\hat{n} \times \left[\hat{n} \times \vec{H}(\vec{r})\right], \tag{5}$$

onde $\hat{n}$ é a normal ao terreno. A impedância $Z_g(\vec{r})$ é calculada de maneira distinta para a polarização vertical e horizontal, e é função dos parâmetros parâmetros elétricos do solo [10],[8].

O problema proposto é resolvido através do Método dos Momentos, que consiste na segmentação do perfil do terreno e na expansão de $\vec{M}_A(\vec{r})$ na forma de uma combinação linear de funções de base $\vec{m}_j(\vec{r})$. A solução é imposta através de produtos internos na forma de $\int_\ell \vec{w}_i(\vec{r})\cdot[...]\, d\ell$, com funções de peso $\vec{w}_i(\vec{r})$. Para a obtenção dos coeficientes M_j das correntes, adota-se a forma matricial tradicional:

$$[V_i] = [Z_{ij}]\,[M_j]\ . \tag{6}$$

Observa-se que ao definir um tipo de polarização, deve-se definir as orientações das funções de base e funções de peso de forma coerente. Para polarização vertical, as equações para a EFIE são:

$$\begin{aligned}
V_i &= \vec{E}^i(\vec{r}) \cdot \hat{\ell}, \\
Z_{ij} &= \tfrac{\sin(\alpha)}{\alpha} k_0 \Delta_j \Big\{ (\hat{n}_i \cdot \hat{R}_2) G_2(\vec{R}_1, \vec{R}_2) \\
&- \tfrac{Z_0}{Z_g(j)} \left[(\hat{n}_i \cdot \hat{n}_j) G_1(\vec{R}_1, \vec{R}_2) \right. \\
&\left. + (\hat{\ell}_j \cdot \hat{R}_1)(\hat{\ell}_i \cdot \hat{R}_2) G_2(\vec{R}_1, \vec{R}_2) \right] \Big\}, \\
Z_{ii} &= -\tfrac{e^{-jk_0R_1}}{2} \Big\{ 1 \\
&+ \tfrac{Z_0}{Z_g(j)} e^{j\frac{\pi}{4}} \left[\frac{F\left(\sqrt{a_1 \frac{k_0\Delta_j}{\pi}}\right)}{\sqrt{a_1}} + \frac{F\left(\sqrt{a_2 \frac{k_0\Delta_j}{\pi}}\right)}{\sqrt{a_2}} \right] \Big\}.
\end{aligned} \tag{7}$$

e para a MFIE, tem-se:

$$\begin{aligned}
V_i &= Z_0 \left[\vec{H}^i(\vec{r}) \cdot \hat{y}\right], \\
Z_{ij} &= \tfrac{\sin(\alpha)}{\alpha} k_0 \Delta_j \Big[G_1(\vec{R}_1, \vec{R}_2) \\
&- \tfrac{Z_0}{Z_g(j)} \left(\hat{n}_j \cdot \hat{R}_2 \right) G_2(\vec{R}_1, \vec{R}_2) \Big], \\
Z_{ii} &= \tfrac{e^{-jk_0R_1}}{2} \Big\{ \tfrac{Z_0}{Z_g(j)} + \\
&e^{j\frac{\pi}{4}} \left[\frac{F\left(\sqrt{a_1 \frac{k_0\Delta_j}{\pi}}\right)}{\sqrt{a_1}} + \frac{F\left(\sqrt{a_2 \frac{k_0\Delta_j}{\pi}}\right)}{\sqrt{a_2}} \right] \Big\}.
\end{aligned} \tag{8}$$

onde Δ_j é o tamanho do segmento j e

$$\begin{aligned}
G_1 &= \frac{e^{-jk_0(R_1+R_2)+j\pi/4}}{4\pi\sqrt{\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_2}{\lambda}}}, \\
G_2 &= \left(1 - \frac{j}{k_0 R_2}\right) G_1\ , \\
\alpha &= \tfrac{k\Delta_j}{2} \left(\hat{R}_{1\,j} - \hat{R}_{2\,ij}\right) \cdot \hat{\ell}_j\ , \\
a_1 &= 1 - \hat{R}_1 \cdot \hat{\ell}_j, \\
a_2 &= 1 + \hat{R}_1 \cdot \hat{\ell}_j,
\end{aligned} \tag{9}$$

As correntes M_j são calculadas através do sistema linear expresso em (6). Como o terreno foi assumido eletricamente suave é possível descartar o retro-epalhamento e calcular as correntes de maneira recursiva, evitando a solução do sistema linear com matriz $[Z_{ij}]$ cheia. Assim:

$$M_j = \frac{1}{Z_{ij}} \left[V_i - \sum_{j=1}^{i-1} Z_{ij} M_j \right] \tag{10}$$

Uma vez obtidas as correntes equivalentes os campos $\vec{E}(\vec{r})$ e $\vec{H}(\vec{r})$ podem ser calculados através de (1), (2) observando que agora T=1. Através do princípio de dualidade a formulação pode ser aplicada para a polarização horizontal.

1) Método de Aceleração FAFFA: O método de acelareação consiste na divisão do terreno em grupos de segmentos, no cálculo de elementos da matriz impedância Z_{ij} em relação ao centro do grupo e realização de aproximação de fase e amplitude para os demais segmentos do mesmo grupo. O método é válido para cálculo das correntes de forma recursiva, ou seja, desprezando o retro-espalhamento.

O terreno é dividido em grupos de segmentos conforme a Figura 2, onde os grupos fontes e grupos observadores são representados, respectivamente, pelos índices n e m. Defini-se um segmento central J para grupo fonte e I para grupo observador. O método propõe calcular as correntes pela equação (10) apenas para certos segmentos e realizar uma

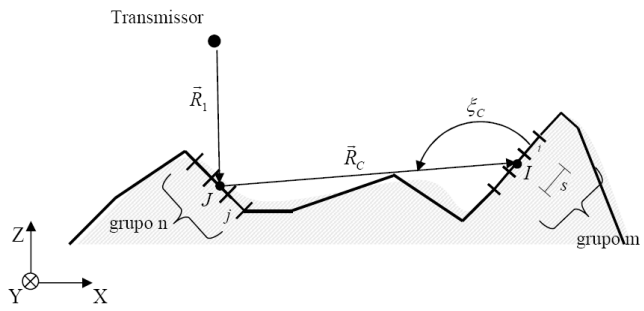


Figura 2. Aplicação do FAFFA .

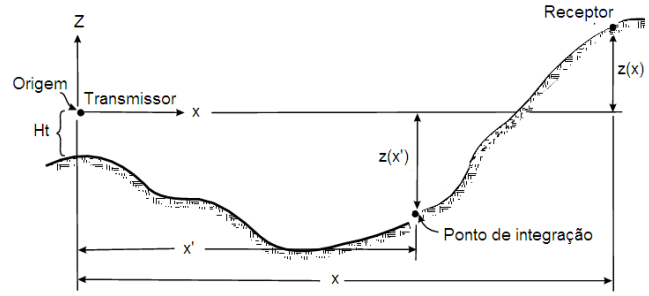


Figura 3. Aplicação de equação integral para faixa de HF.

aproximação de fase e amplitude para os demais segmentos j e i baseados nas correntes dos segmentos centrais J e I.

Defini-se como NF_m os grupos na região de campo próximo em relação a cada grupo observador m e como FF_m os grupos na região de campo distante. Para os segmentos em NF_m o somatório é calculado do modo tradicional pela equação (10), para os demais grupos será aplicado a aproximação descrita.

A equação (10) é reescrita evidenciando a separação de somatórios para grupos considerados em campo próximo e campo distante:

$$Z_{ii}\, M_i = V_i - \sum_{n \in FF_m} A^n_{Ii}\, e^{-j\phi^n_{Ii}} \sum_{j \in n} Z_{Ij} M_j - \sum_{n \in NF_m} \sum_{\substack{j \in n \\ j < i}} Z_{ij} M_j \ , \quad i = 1, 2, \ldots, N \ . \tag{11}$$

onde o termo $A^n_{Ii}\, e^{-j\phi^n_{Ii}}$ é responsável pela aproximação de fase e amplitude nos segmentos do grupo observador em relação ao segmento central e é definido em função dos vetores $\hat{R}_1$ e $\hat{R}_C$, e do ângulo ξ_C [6].

Os elementos Z_{Ij} são obtidos substituindo $\vec{R}_2$ por $\vec{R}_P$ e α por α_P em Z_{ij} , onde:

$$R_P = \mid \vec{r_I} - \vec{r_j} \mid = \sqrt{(x_I - x_j)^2 + (z_I - z_j)^2} \ , \tag{12}$$

$$\alpha_P = \frac{k\Delta_j}{2} \left(\hat{R}_1 - \hat{R}_P \right) \cdot \hat{\ell}_j \ . \tag{13}$$

Assim, o somatório $\sum Z_{Ij} M_j$ pode ser calculado apenas uma vez para cada par (n,m) de grupos fonte e observador. Dessa maneira, o tempo gasto no cálculo das correntes equivalentes é drasticamente diminuído, aumentando a aplicabilidade em enlaces eletricamente longos. Para sinais com polarização horizontal, utiliza-se o princípio da dualidade nas equações apresentadas para a aplicação do método de aceleração.

B. Modelo Analítico para HF (Formulação de Ott)

A formulação desenvolvida por Ott em [2] é utilizada para a predição radioelétrica na faixa de HF. Neste trabalho, o autor utilizou uma função relacionada com a função atenuação de Sommerfeld na segunda identidade vetorial de Green, e desenvolveu uma equação integral para propagação em terrenos irregulares.

O terreno é assumido invariante na direção $\hat{y}$ ortogonal à direção de propagação e o retro-espalhamaneto é desconsiderado. A Figura 3 exibe os elementos envolvidos, onde a função $z(x)$ representa o perfil do terreno. A função atenuação $f(x)$ é calculada por:

$$f(x) = W(x,0) - \sqrt{\frac{jk_0}{2\pi}} \int_0^x f(x') e^{-jk_0\beta(x,x')} \left\{ \frac{\partial z(x')}{\partial x'} W(x,x') - \frac{z(x) - z(x')}{x - x'} \right\} \sqrt{\frac{x}{x'(x-x')}}\, dx', \tag{14}$$

onde Δ é uma impedância de superfície função dos parâmetros elétricos do solo, calculada de maneira distinta para polarização vertical e horizontal e:

$$\begin{gathered} \beta(x,x') = \tfrac{[z(x)-z(x')]^2}{2(x-x')} + \tfrac{z(x')^2}{2x'} - \tfrac{z(x)^2}{2x} \ , \\ W(x,x') = 1 - j\sqrt{\pi} p\, \mathrm{werf}(u) \ , \\ p = \sqrt{\tfrac{jk_0(x-x')}{2}}\, \Delta \ , \\ u = jp \left\{ 1 - \tfrac{z(x)-z(x')}{\Delta(x-x')} \right\} \ , \\ \mathrm{werf}(u) = e^{-u^2} \mathrm{erfc}(-ju) = \tfrac{1}{j\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tfrac{e^{-t^2}\, dt}{\sqrt{u}+t} \ . \end{gathered} \tag{15}$$

A integral é calculada numericamente dividindo o intervalo de integração em segmentos e aproximando a função desconhecida $f(x')$ por um polinômio de segundo grau em cada segmento. Observa-se que a formulação apresentada requer o conhecimento da função $z(x)$ que representa o perfil do terreno. Para estimar tal função para um terreno arbitrário, utiliza-se um algoritmo de interpolação *spline* cúbica.

A amplitude do campo elétrico pode ser obtida por:

$$E(x) = 2\, E_{in}\, |f(x)| \tag{16}$$

onde E_{in} é o módulo do campo elétrico incidente no ponto receptor considerando espaço livre.

C. Demais Métodos

Para a análise da propagação nas faixas de VHF e UHF foram implementados o modelo analítico Terra Plana [1], método semi-empírico da Recomendação ITU-R 1546-2 [7] e o modelo empírico de Okumura-Hata [1]. O Modelo Terra plana utiliza o conceito de raio direto e refletido e o método Okumura-Hata é baseado em medidas. O método ITU-R 1546 tem como principal característica a consulta a curvas baseadas

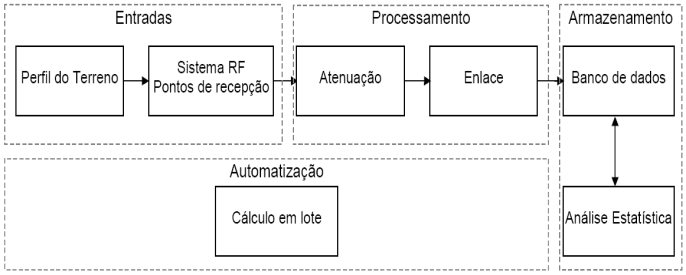


Figura 4. Fluxograma do *software* SPRad.

na análise estatística de dados experimentais, e após encontrado o valor mais próximo da situação requerida, adiciona-se correções com fundamentações analíticas e estatísticas.

A propagação na faixa de HF é analisada pelo método semi-empírico da recomendação ITU-R 368-7, onde utiliza-se modelo terra esférica lisa para a geração das curvas de intensidade de campo.

III. *Software* DE PREDIÇÃO

O SPRad foi elaborado utilizando a seguinte estratégia: as rotinas de cálculo implementadas na linguagem *Fortran* e a interface gráfica escrita em *Visual Basic*. Assim conseguiu-se aliar o alto desempenho de cálculo computacional do *Fortran* às facilidades e recursos gráficos do *Visual Basic*. O núcleo escrito em *Fortran* 90/95 foi compilado em formato de biblioteca dinâmica (DLL-*dynamic link library*) e o programa principal em *Visual Basic 6.0* apresenta a interface gráfica.

A Figura 4 exibe o fluxograma do Sistema, onde se observa seus módulos componentes:

- *Perfil*: Seleção do perfil topográfico do terreno e configuração de suas características elétricas.
- *Sistema RF e Pontos de Recepção*: Definição dos parâmetros das estações Transmissora e Receptora e configuração da variação da posição do receptor.
- *Atenuação*: Cálculo da atenuação total através do modelo selecionado. Comparação entre os diferentes modelos.
- *Enlace*: Exibição do enlace entre os pontos considerados (sinal recebido, elipsóide de Fresnel, etc).
- *Banco de dados*: Armazenamneto de enlaces calculados e possibilidade de inserção de medidas.
- *Análise Estatística*: Análise da performance do enlace calculado em comparação com medidas
- *Cálculo em lote*: Possibilidade de programar o cálculo/armazenamento de enlaces de forma automática.

Uma vez selecionado o perfil do terreno é possível organizá-lo em intervalos com características elétricas distintas. Configurações padrões de solos utilizadas na literatura [1] são disponíveis. O SPRad permite a configuração dos parâmetros do sistema de radiofreqüência das estações envolvidas. Modelos de antenas diversos podem ser utilizados, se fornecidos seus diagramas de irradiação. A posição da Estação Receptora pode sofrer variações ao longo do terreno, bem como sua altura. A Figura 5 exibe a tela do sistema de radio-frequência.

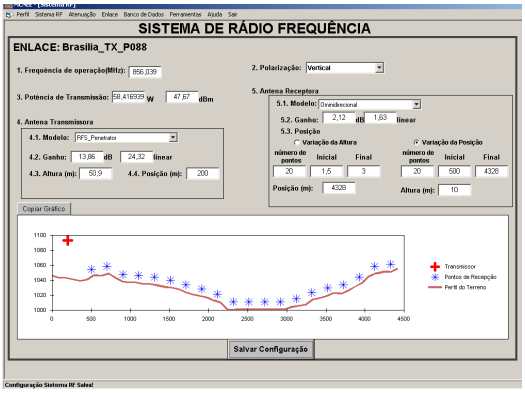


Figura 5. Tela do SPRad - Configuração do Sistema de Radio-Frequência.

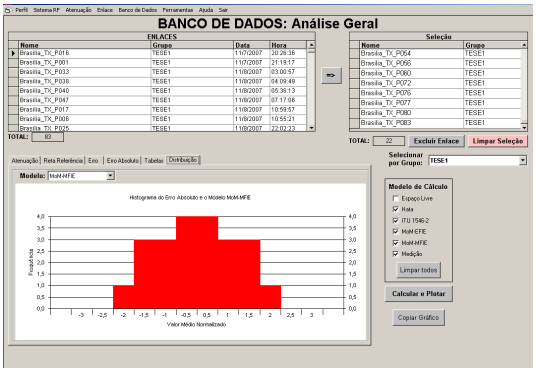


Figura 6. Tela do SPRad - Análise estatística de banco de dados.

A atenuação total do percurso Transmissor-Receptor pode ser estimada utilizando os seguintes modelos de cálculo: Equações Integrais (Método dos Momentos) para VHF/UHF, Equação integral para HF (modelo de Ott), Recomendações ITU-R 1546-2 e ITU-R 368-7, Okumura-Hata, modelo Terra plana e espaço livre. Os parâmetros de cada modelo podem ser modificados e os resultados plotados simultaneamente.

A análise estatística de dados é possível através da implementação de um banco de dados no formato *Microsoft* JET (*Joint Engine Technology*), onde o enlace é salvo após configurado e calculado. O SPRad plota gráficos de distribuição de freqüência, reta de referência, bem como calcula média, desvio padrão e erros médios em relação às medidas.

IV. RESULTADOS

A validação da formulação desenvolvida na seção II-A foi investigada em problemas canônicos em [5] e [6]. Os resultados gerados foram satisfatórios quando comparados com soluções de referência. O modelo HF apresentado na seção II-B obteve resultados idênticos aos encontratos em [2].

As duas campanhas de medidas analisadas nesta seção englobam sinais na faixa de VHF e UHF. O caso da Dinamarca apresenta terrenos irregulares sobre terra e, quando analisado pelo método dos momentos, considera-se o solo como condutor imperfeito. As medidas realizadas em Brasília

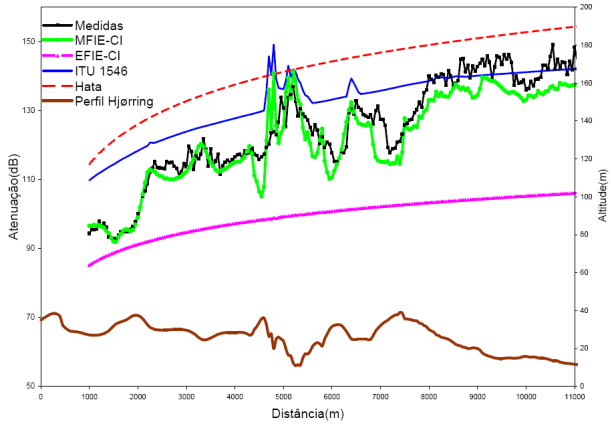
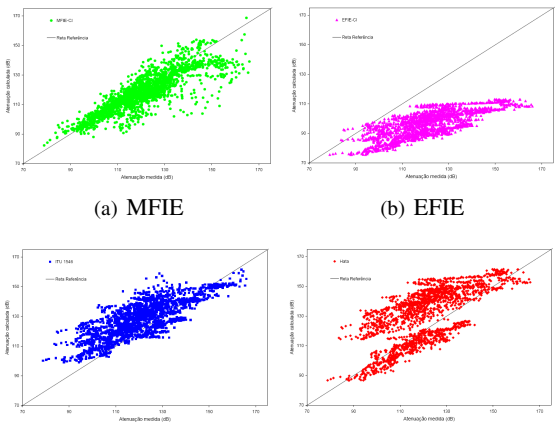


Figura 7. Atenuação: perfil de Hjørring em 435 MHz, polarização vertical.



(a) MFIE (b) EFIE

(c) ITU-R 1546 (d) Hata

Figura 8. Medidas versus valores calculados para casos na Dinamarca.

apresentam enlaces com terrenos mistos (terra e água) e evidencia a diferença dos resultados do método dos momentos considerando solo condutor imperfeito ou solo condutor perfeito (sem perdas). Para ambos os casos utilizou-se outros métodos de predição, citados na seção II-C, como forma de comparação adicional.

A. Dinamarca

O primeiro caso prático engloba cinco perfis situados na Dinamarca, onde medições foram realizadas por Hviid *et al.* em [11]. Os perfis, denominados Hadsund, Hjørring, Jerslev, Mjels e Ravnstru, variam de 6 a 11 km e foram obtidos através de mapas digitais com resolução de 50 m. Os testes foram realizados com dipolo de meia-onda irradiando 10 W, polarização vertical, situado a 10,4 m de altura do solo. A intensidade de campo elétrico foi registrada ao longo dos terrenos por estação receptora com 2,4 m de altura.

A atenuação total dos enlaces é analisada para as freqüências de 144 MHz, 435 MHz e 970 MHz. O cálculo é realizado pelo SPRad utilizando diferentes métodos: método dos momentos considerando perdas do solo (condutor imperfeito - CI), recomendação ITU-R 1546 e método de Hata. A Figura 7 ilustra a atenuação para o perfil de Hjørring através dos diferentes métodos de predição. Para a aplicação do método dos momentos utilizou-se 4 segmentos/λ. Para as perdas do solo utilizou-se: ϵ_g=15ϵ_0 e σ_g=0,012 S/m.

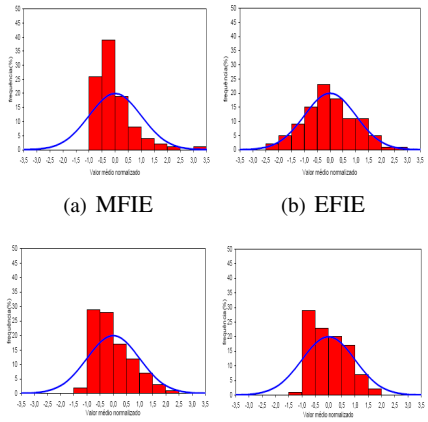
A precisão dos modelos é analisada graficamente pela Figura 8. O gráfico exibe os valores calculados versus os valores medidos. A Figura 9 exibe a distribuição relativa de freqüências dos erros absolutos entre as medidas e os respectivos modelos. Os parâmetros estatísticos são elencados na Tabela I, evidenciando o erro médio (valor predito menos valor medido), erro médio absoluto (módulo do erro médio) e desvio padrão, todos calculados em dB.

B. Brasília

Nesta seção, é analisado um caso de estudo realizado nas proximidades do Lago Paranoá, em Brasília-DF. As medições

Tabela I
PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS CASOS NA DINAMARCA.

Modelo	Erro Médio (dB)	Erro Médio Absoluto(dB)	Desvio Padrão (dB)
Hata	9,71	13,74	13,48
EFIE	-24,48	24,52	10,57
MFIE	-2,91	6,97	7,96
ITU 1546	7,56	9,70	9,30



(a) MFIE (b) EFIE

(c) ITU-R 1546 (d) Hata

Figura 9. Histogramas do erros absolutos para os casos na Dinamarca.

foram realizadas por Mayrink *et al.* [14] em 166 pontos ao longo do lago, resultando em enlaces somente sobre terra e enlaces sobre terra-água (terreno misto).

As medições foram realizadas em 856 MHz com a estação transmissora a 30 m do solo e com potência de saída de 100 W. Na recepção, utilizou-se antena omni-direcional com altura de 1,5 m. Os enlaces envolvidos possuem distância entre a estação transmissora e receptora variando de 1,5 km a 5 km. Para a obtenção dos resultados numéricos, optou-se por escolher 50 enlaces ao acaso percorrendo todo o entorno do lago.

A atenuação total para cada enlace considerando receptor no final do perfil foi calculada pelo SPRad através dos modelos:

Tabela II
PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA CASOS EM BRASÍLIA.

Modelo	Erro Médio (dB)	Erro Médio Absoluto(dB)	Desvio Padrão (dB)
EFIE-CI	-6,71	6,99	5,06
MFIE-CI	-4,06	8,51	9,15
EFIE-CMP	-11,15	11,46	6,63
MFIE-CMP	-5,73	10,36	9,8
ITU 1546	-9,51	9,66	5,69

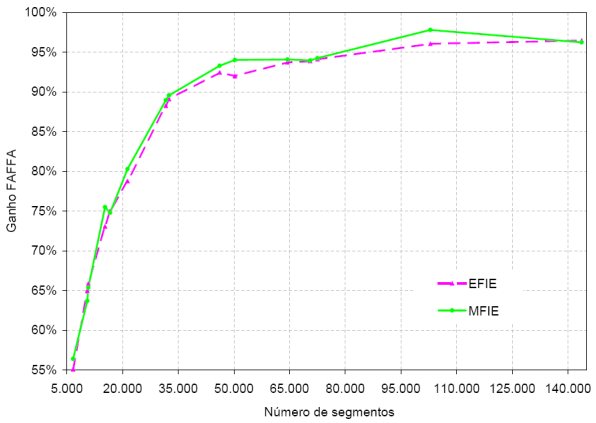


Figura 10. Ganho (diferença percentual) do FAFFA em relação ao algoritmo original.

método dos momentos considerando o terreno sem perdas (condutor magnético perfeito - CMP), método dos momentos considerando perdas do solo (condutor imperfeito - CI) e recomendação ITU-R 1546. Para a geração dos resultados, utilizou-se uma relação de 4 segmentos/λ e as seguintes configurações de solo: ϵ_g=15ϵ_0 e σ_g=0,012 S/m para terra e ϵ_g=81ϵ_0, σ_g=0,01 S/m para água doce [1]. A Tabela II exibe os parâmetros estatísticos de cada modelo. Nota-se a melhor performance da EFIE e MFIE quando considera-se as perdas do solo, uma ves que nesse caso têm-se enlaces mistos.

C. Ganho FAFFA

Nesta Seção, os casos avaliados nas Seções IV-A e IV-B, são recalculados utilizando a técnica FAFFA e os resultados confrontados com o modelo de equações integrais original. Ao considerar todos os pontos para as três freqüências na Dinamarca e os pontos de Brasília, obteve-se 2060 pontos. A técnica mostrou-se eficaz nos casos analisados, apresentando valores quase idênticos ao algoritmo original, com diferenças médias de 0 a 2 dB. Nos casos analisados, obteve-se sistemas lineares variando de 6.000 a 145.000 variáveis (segmentos), com tempo de cálculo de 00:15h até 13:00 horas. As simulações foram realizadas num computador CELERON D a 2,8 GHz com 1 Gbytes de memória RAM.

O ganho de processamento referente à técnica de aceleração alcançou até 97%. A Figura 10 exibe o ganho em relação ao número de segmentos resultantes da discretização do perfil.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o *software* de predição radioelétrica SPRad, para aplicação em terrenos irregulares com diferentes características elétricas (terrenos mistos). Os métodos de predição utilizados englobam as faixas de HF, VHF e UHF, com ênfase para formulação desenvolvida através de equações integrais e método dos momentos. Analisou-se dois casos de estudo envolvendo medidas em Brasília e na Dinamarca. O sistema tem como objetivos tornar-se material didático para estudo e análise de propagação, como também ferramenta auxiliar para projetos em radiofrequencia.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Conor Brennan e Professor Jørgen Bach Andersen pela gentileza de disponibilizar as medições realizadas na Dinamarca.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, sob o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Comunicações sem Fio (INCT-CSF) e Projeto 300938/2008-0.

REFERÊNCIAS

[1] J. D. Parsons, *The Mobile radio Propagation Channel*, John Wiley and Sons, Liverpool-UK, 1998.
[2] R.H.Ott, *An Alternative integral equation for propagation over irregular terrain,2*, Radio Science, Vol.6, N.4, pp.429-435 ,Apr. 1971.
[3] R.H.Ott, *A New Method for Predicting HF Ground Wave Attenuation Over Inhomogeneous, Irregular Terrain*, ITS Research Report N.7 , 1971.
[4] International Communication Union, "ITU-R P.368-7 - Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz", *ITU Recommendation*, 1992.
[5] C. G. Batista, C. G. Rego, "Predição de cobertura em terrenos mistos de baixa rugosidade: uma abordagem via equações integrais", *XXV Simpósio Brasileiro de Telecom. - SBrT'07, Recife, Brasil*, Set. 2007.
[6] C. G. Batista, *Predição de cobertura radioelétrica em terrenos mistos: uma abordagem via equações integrais* ,PPGEE-UFMG, Maio 2008.
[7] International Communication Union, "ITU-R P.1546-2 - Method for point-to-area for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz", *ITU Recommendation*, Agosto 2005.
[8] F. J. S. Moreira, "Aplicação de Equações Integrais para a Predição da Propagação Radioelétrica sobre Solos Suavemente Irregulares e Incidência Rasante", *X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica (SBMO 2002), Recife, PE,*, pp.191–195, Aug. 2002.
[9] R. B. V. Teperino, *Utilização de equações integrais no domínio do tempo na predição da propagação sobre terrenos irregulares*, PPGEE-UFMG, Março, 2003.
[10] G. A. Hufford, "An integral equation approach to the problem of wavepropagation over an irregular surface", *Quarterly Appl. Math.*, vol.9, pp.391-404, Jan. 1952.
[11] J. T. Hviid, J. B. Andersen, J. Toftgård, and J. Bøjer, "Terrain-based propagation model for rural area-An integral equation approach", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.43, pp.41-46, Jan. 1995.
[12] C. Lu and W. Chew, *Fast Far Field Approximation for calculating the RCS of large objects*, Micro. Opt. Tech. Lett. 8(5), pp.238-241 , 1995.
[13] C. Brennan, P. Cullen, *A method to speed up iterative solutions of terrain scattering problems*, 10th International Conference on Antennas and Propagation, pp.14-17 , Abr. 1997.
[14] A. J. M. Soares, C. G. Rego, E. V. Melo, F. J. S. Moreira, G. W. O. Costa, J. P. D. M. Pinto, M. A. S. Mayrink, N. Pasquali, P. H. P. Carvalho, and W. K. Guimarães, "Measurements of a CW Signal in Brazil and Comparison with Prediction using ITU-R P.1546-1", *2005 IEEE/ACES International Conference on Wireless Comm. and Appl. Comp. Electromag., Hawaii, USA*, pp.824-827, Apr. 2005.
[15] A. J. Poggio and E. K. Miller, *Computer Techniques for Electromagnetics.Oxford*, U.K.: Pergamon, 1973, ch. 4.
[16] T. B. A. Senior and J. L. Volakis, *Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics*. London, U.K.: IEE, 1995, ch. 2.