

Análise Crítica do Modelo de Tamir para Predição de Alcance de Rádio-Enlaces em Florestas

Maurício H. C. Dias, Ramon A. Alem e José C. A. Santos

Resumo—O modelo de Tamir para propagação em florestas na faixa de 2 a 200 MHz considera a predominância do mecanismo conhecido da onda lateral para obter a equação de intensidade de campo elétrico recebido em um enlace de antenas infinitesimais. Ao estabelecer os limites de distâncias de validade do modelo, alguns aspectos foram aparentemente desconsiderados, como a influência relativa das demais componentes de propagação de primeira ordem e mesmo a esfericidade da Terra. O presente trabalho tem como objetivo complementar a indicação destes limites analisando aqueles aspectos, em particular para sistemas HF portáteis operados com antenas próximas ao solo. Adicionalmente, fez-se um estudo de caso para estimar alcances de um sistema típico em diferentes tipos de florestas.

Palavras-chave— Comunicações em florestas, propagação de ondas de superfície, propagação de ondas de rádio HF, vegetação.

I. INTRODUÇÃO

SUSTENTABILIDADE é uma das palavras de ordem vigentes na conjuntura sócio-econômica atual. Em decorrência disto, a preocupação com o meio ambiente está cada vez mais presente nas discussões dos grandes projetos nacionais, e como tal, a preservação de nossos biomas tem grande significado neste contexto.

Uma das características mais marcantes de dois dos maiores biomas terrestres brasileiros, a Amazônia e a Mata Atlântica, é que ambos são predominantemente constituídos por florestas [1]-[2]. Ao longo das últimas décadas, os esforços da sociedade brasileira na preservação desses biomas têm sido visíveis, como através da criação e preservação de parques e reservas ambientais. Entretanto, a hostilidade natural do ambiente de floresta e sua grande extensão trazem severas dificuldades para viabilidade logística de sua proteção e manutenção.

Este trabalho contou com apoio da FAPERJ, pelo projeto 101.497/2010. Destacam-se ainda o apoio da CAPES ao segundo autor, na forma de bolsa de mestrado do programa Demanda Social, e o apoio do CNPq ao primeiro autor, na forma de bolsa de produtividade em pesquisa (nível 2).

M. H. C. Dias e J. C. A. Santos são professores dos cursos de pós-graduação em Engenharia de Defesa e em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 22290-270, Brasil (tel: +55 21 3820 {4135, 4146}; e-mail: {mhcdias, araujo}@ime.eb.br).

R. A. Alem é aluno do Mestrado em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 22290-270, Brasil (e-mail: ramon_alem@yahoo.com.br).

Um dos problemas enfrentados por profissionais que atuam em áreas de vegetação densa, tais como fiscais ambientais, policiais, bombeiros, militares e outros, é a dificuldade de estabelecer rádio-comunicações. O ambiente de floresta atenua significativamente o sinal transmitido nas faixas típicas de emprego de rádios portáteis, em especial VHF e UHF, em função da absorção e do espalhamento das ondas de rádio pelas árvores. Além disso, o alcance dos rádios portáteis típicos usados por aqueles profissionais já é naturalmente reduzido pela necessidade de operação em baixa potência, decorrente do uso de baterias ou outras fontes de energia de peso e dimensões reduzidas. No cenário em questão, a operação na faixa de HF surge como uma alternativa viável para enlaces de alguns poucos quilômetros ou mais [3]-[4].

O mecanismo de propagação que explica o sobrealcance observado na faixa de HF é o da onda lateral que se propaga ao longo da copa das árvores. Este conceito foi apresentado e analisado por Tamir, que propôs uma metodologia assintótica de estimação do campo irradiado por uma antena dipolo infinitesimal dentro de uma floresta, modelada como um meio homogêneo com perdas e índice de refração maior que o do ar [5]-[7]. As premissas adotadas nesta metodologia impõem limites gerais de validade para o modelo de Tamir, em especial no que se refere à faixa de frequências (2 a 200 MHz) e às distâncias com relação ao transmissor (1 a 100 km).

Os limites de validade do modelo foram estabelecidos por motivos diversos [5]. Por exemplo, o modelo de floresta como camada dielétrica homogênea com perdas só faz sentido numa faixa de frequências em que a altura média da floresta seja comparável ao comprimento de onda do sinal. Para frequências mais baixas, a floresta atua praticamente como uma perturbação no campo irradiado, que é determinado eminentemente pelo mecanismo de propagação no ar sobre o solo. Em frequências mais altas, as contribuições específicas dos elementos que constituem a floresta (árvores, folhas, galhos, troncos, etc.) já se fazem notar, de modo que a aproximação de camada homogênea deixa de ser realista.

No que diz respeito às distâncias, o limiar superior se refere ao ponto até o qual a contribuição de onda celeste ou ionosférica é menor que a da onda lateral. A partir deste limiar, espera-se que o campo recebido seja dominado pela componente recebida por refração ionosférica [5]. O limiar inferior, por sua vez, tem a ver com a teoria assintótica

utilizada [8], que só é válida quando os limites de integração são grandes. Para as diversas situações consideradas pelo modelo, Tamir observou que o valor de 1 km era bastante representativo para este limiar [5].

Há dois aspectos não abordados explicitamente por Tamir que podem impactar os referidos limiares de distâncias de validade do modelo. O primeiro se refere às contribuições dos demais mecanismos de propagação relevantes esperados, em especial da onda direta e das reflexões no solo e na interface floresta-ar. Estes mecanismos são desprezados nas análises de Tamir, em função da condutividade da floresta. O outro aspecto tem a ver com a hipótese de terra plana assumida, com impacto particular no limite superior de validade do modelo.

O presente trabalho se propõe a complementar a avaliação dos limites de distância em que o modelo de Tamir é válido, considerando os dois aspectos complementares não abordados por Tamir, previamente citados. Foco especial é dado a sistemas HF portáteis com uso de antenas próximas ao solo, pois esta é uma situação bastante usual, e possivelmente a mais crítica de uso. Adicionalmente, um estudo de caso é apresentado para este tipo de sistema, com objetivo de avaliar os limiares de alcance típicos esperados para diferentes tipos de floresta, em comparação com o que seria esperado em ambientes abertos.

A seção II descreve resumidamente os modelos de propagação em floresta pertinentes a este trabalho. Na seção seguinte, a metodologia de análise adotada é apresentada. A seção IV traz a análise dos resultados gerados. Por fim, a seção V conclui o artigo.

II. PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE RÁDIO EM FLORESTAS

A. Floresta como Camada Dielétrica entre Solo e Ar

O modelo de Tamir parte da hipótese de Terra plana e considera a floresta como uma camada dielétrica com perdas, ou seja, com condutividade finita, interposta entre o ar e o solo [5]-[7]. Assume-se, ainda, que as bordas da floresta estão suficientemente afastadas dos rádios (transmissor – Tx e receptor – Rx), de modo que o modelo de camada de comprimento infinito seja uma boa aproximação. A Fig. 1 ilustra a concepção do modelo. A altura média do topo da copa das árvores define a altura da camada h_f . No presente trabalho, considera-se apenas a situação em que ambas as antenas estão dentro da floresta, ou seja, h_T e $h_R < h_f$.

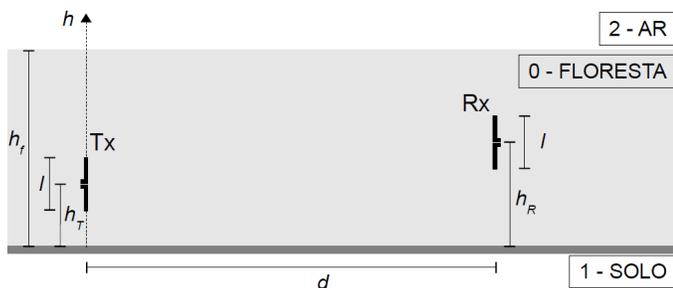


Fig. 1. Modelo de floresta como camada dielétrica com perdas entre o solo e o ar.

A Tabela I apresenta as propriedades elétricas da floresta e do solo e a altura de floresta correspondente para quatro situações típicas. As permissividades relativas da floresta e do solo são dadas respectivamente por ϵ_{rf} e ϵ_{rs} ; as condutividades da floresta e do solo são dadas respectivamente por σ_f e σ_s . As três primeiras florestas (1 a 3) são indicadas por Tamir como representativas de florestas fina, média e densa, respectivamente [6]. Os parâmetros indicados para floresta 4 correspondem aos limites superiores indicados por Tamir em [5] para as características elétricas, com uma altura de floresta média típica das matas equatorial e atlântica brasileiras [9].

TABELA I
PARÂMETROS CONSTITUTIVOS TÍPICOS DE FLORESTAS

Floresta	σ_f (mS/m)	ϵ_{rf}	σ_s (mS/m)	ϵ_{rs}	h_f (m)
1	0,03	1,03	1	5	5
2	0,1	1,1	10	20	10
3	0,3	1,3	100	50	20
4	1	1,5	100	50	30

B. Modelo de Onda Lateral

Segundo o modelo de Tamir [5]-[7], nos limites considerados, o mecanismo de propagação dominante é o de uma onda de superfície que se propaga ao longo da interface floresta-ar, decorrente da refração sob incidência em ângulo crítico θ_c . A Fig. 2 ilustra este conceito, em que a componente geométrica de primeira ordem, usualmente a de intensidade mais significativa, é dada pela trajetória Tx-A-i-B-Rx [6].

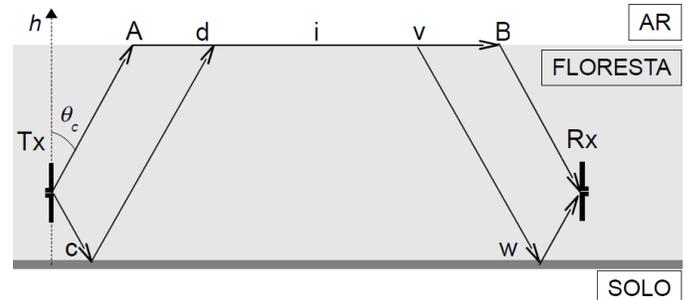


Fig. 2. Conceito da onda lateral de Tamir, com indicação dos percursos de primeira ordem (Tx-A-i-B-Rx) e segunda ordem (Tx-c-d-i-B-Rx e Tx-A-i-v-w-Rx)

Da análise das condições de contorno na interface floresta-ar e tendo em vista que a incidência se dá de um meio mais denso com perdas (floresta) para um meio menos denso sem perdas (ar), o ângulo crítico é dado por:

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\text{Re} \{ \sqrt{\hat{\epsilon}_{rf}} - 1 \}} \right) \quad (1)$$

Em (1) a permissividade relativa complexa da floresta é dada por [10]:

$$\hat{\epsilon}_{rf} = \epsilon_{rf} - j \frac{\sigma_f}{\omega \epsilon_0} \quad (2)$$

em que ω (rad/s) é a frequência angular do sinal irradiado e $\epsilon_0 = 8,85$ pF/m é a permissividade do vácuo. Quando a condutividade é baixa o suficiente, de modo que a parte real da permissividade complexa seja muito maior que a parte imaginária, o ângulo crítico é dado aproximadamente por:

$$\theta_c \cong \text{sen}^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{rf}}} \right) \quad (3)$$

Além das hipóteses assumidas já citadas na seção I e na subseção anterior, há ainda uma importante condição referente às antenas. As expressões de campo avaliadas assintoticamente assumem que as antenas são dipolos infinitesimais, de comprimento $l \ll \lambda_0$ (comprimento de onda no espaço livre). Apenas polarizações lineares vertical e horizontal são consideradas em [5]-[7]. O modelo assume, ainda, que as antenas transmissora e receptora têm a mesma polarização. No presente trabalho, apenas a polarização vertical foi considerada.

É importante reforçar que o modelo considera a contribuição da onda lateral como aquela que domina a composição do campo total recebido. Com isso, a parcela associada à refração ionosférica é desprezada, assim como outras contribuições como a da propagação na direção de visada e as reflexões no solo e na interface floresta-ar. A validação experimental do modelo foi foco de alguns trabalhos, inclusive nacionais, como [1], [2], [9] e [11].

A intensidade do campo E_{lat} recebido por uma antena dipolo infinitesimal polarizada verticalmente (alinhada com o eixo h da Fig. 1) é dada por [6]-[7]:

$$E_{lat} = -j \frac{60Il}{n_f^2 - 1} \frac{e^{-jk_0(d+s)\sqrt{n_f^2-1}}}{d^2} \cdot F_T(90^\circ, h_T) F_T(90^\circ, h_R) \quad (4)$$

em que I (A) é a corrente na entrada da antena, l (m) é o comprimento da antena, k_0 é a constante de fase no espaço livre, d (m) é a distância entre as antenas e $h_{T,R}$ (m) são as alturas das antenas de transmissão e recepção, respectivamente. Os demais parâmetros em (4) são dados pelas expressões [6]-[7]:

$$s = 2h_f - h_T - h_R \quad (5)$$

$$F_T(\theta, h) = \frac{1 + B(\theta, h)}{1 - B(\theta, h)} \quad (6)$$

$$B(\theta, h) = G(\theta) e^{-j2k_0 h \sqrt{n_f^2 - 1}} \quad (7)$$

$$G(\theta) = \frac{n_s^2 \sqrt{n_f^2 - \text{sen}^2(\theta)} - n_f^2 \sqrt{n_s^2 - \text{sen}^2(\theta)}}{n_s^2 \sqrt{n_f^2 - \text{sen}^2(\theta)} + n_f^2 \sqrt{n_s^2 - \text{sen}^2(\theta)}} \quad (8)$$

Em (4), (7) e (8), n_f e n_s são os índices de refração da floresta e do solo, respectivamente, dados por:

$$n_i = \sqrt{\hat{\epsilon}_{ri}} = \sqrt{\epsilon_{ri} - j \frac{\sigma_i}{\omega \epsilon_0}} \quad (9)$$

com o índice $i = f$ ou s , de acordo com o meio (floresta ou solo, respectivamente).

A função indicada em (6) contabiliza os efeitos da proximidade das antenas ao solo. Para antenas elevadas, próximas da copa das árvores, $F_T(\theta, h) \cong 1$ e pode ser desconsiderada. No caso analisado neste artigo, entretanto, as antenas estão próximas ao solo, de modo que as componentes de propagação de segunda ordem indicadas na Fig. 2 passam a ter intensidade de campo similar à componente de primeira ordem, causando no receptor um comportamento interferente modelado por (6). Por atravessar trechos relativamente mais longos de floresta, a atenuação neste caso tende a ser mais expressiva que no caso em que as antenas estão próximas das copas das árvores.

C. Modelo de Raios para Terra Plana

Assumindo o mesmo cenário e hipóteses iniciais do modelo descrito na subseção anterior, a Fig. 3 ilustra as componentes de propagação consideradas em um possível modelo de raios.

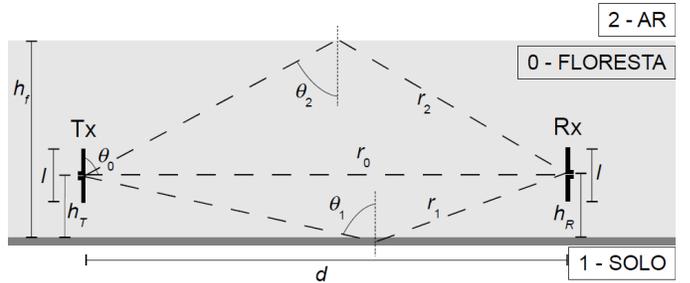


Fig. 3. Modelo de raios no cenário de floresta do modelo de Tamir.

Três trajetórias de propagação (raios) são indicadas na Fig. 3: direta; refletida no solo; e refletida na interface floresta-ar. Além das componentes associadas a estas trajetórias, na faixa de HF e nas frequências mais baixas de VHF, a onda de superfície de Norton [12] pode ser significativa quando a antena receptora está próxima da interface considerada (floresta-solo ou floresta-ar). Estas ondas de superfície se propagam ao longo das respectivas interfaces.

A intensidade de campo total recebido E_{raios} é dada por:

$$E_{raios} = E_d + E_{r1} + E_{s1} + E_{r2} + E_{s2} \quad (10)$$

em que

$$E_d = -j \frac{Ilk_f \eta_f}{4\pi r_0} \sin^2(\theta_0) e^{-jk_f r_0} \quad (11)$$

$$E_{ri} = -j \frac{Ilk_f \eta_f}{4\pi r_i} \Gamma_{vi}(\theta_i) \sin^2(\theta_i) e^{-jk_f r_i} \quad (12)$$

$$E_{si} = -j \frac{Ilk_f \eta_f}{4\pi r_i} [1 - \Gamma_{vi}(\theta_i)] F(w_i) \sin^2(\theta_i) e^{-jk_f r_i} \quad (13)$$

$$\Gamma_{vi}(\theta_i) = \frac{\cos(\theta_i) - v_i \sqrt{1 - v_i^2 \sin^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i) + v_i \sqrt{1 - v_i^2 \sin^2(\theta_i)}} \quad (14)$$

$$v_i = k_f / k_i \quad (15)$$

$$k_i = \sqrt{-j\omega\mu_i(\sigma_i + j\omega\varepsilon_i)} \quad (16)$$

$$w_i = \frac{4p_i}{[1 - \Gamma_{vi}(\theta_i)]^2} \quad (17)$$

$$p_i = -jk_f \Gamma_{vi}(\theta_i) \frac{v_i^2 [1 - v_i^2 \sin^2(\theta_i)]^2}{2\sin^2(\theta_i)} \quad (18)$$

A propagação na direção de visada é representada por (11), enquanto que as reflexões estão expressas em (12) e as ondas de Norton em (13). A função de Norton $F(w_i)$ em (13) é a mesma indicada em [12] para a propagação sobre o solo no modelo de Terra plana, calculada pelas aproximações por expansão em série indicadas na mesma referência. Em (11) a (18), os ângulos θ_i e as distâncias percorridas r_i ($i = 0, 1, 2$) são definidos como indicado na Fig. 3; os demais parâmetros se referem às componentes refletidas e de Norton em cada interface, com $i = 1$ associado à interface floresta-solo, e $i = 2$ à interface floresta-ar. Em (16), portanto, para $i = 1$ consideram-se os parâmetros do solo, e para $i = 2$ os do ar. A permeabilidade dos 3 meios considerados é tomada como a do ar, ou seja, $\mu_i = \mu_0 = 0,4\pi \mu\text{H/m}$. η_f (Ω) é a impedância intrínseca da floresta, dada por:

$$\eta_f = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma_f + j\omega\varepsilon_f}} \quad (19)$$

Cumprir destacar que a componente de superfície de Norton na interface floresta-ar não se confunde com a outra componente de superfície dada pela onda lateral. Ambas as contribuições são de ordem secundária no que diz respeito à análise pela Ótica Geométrica, mas decorrem de singularidades distintas na análise do plano complexo de avaliação assintótica da integral que expressa a intensidade de campo elétrico [8], [12].

A. Descrição do Sistema Típico Considerado

Como indicado na seção de introdução deste texto, o objetivo principal é complementar a análise dos limiares de validade do modelo de Tamir, em particular para sistemas HF operando com antenas próximas ao solo. Para tal, o primeiro passo de definição da metodologia de análise é a limitação do escopo.

Neste trabalho, foi considerada a operação de rádios portáteis HF com potência de 10 W e sensibilidade de -113 dBm. Estes valores são típicos para este tipo de sistema, como pode ser observado nos prospectos de equipamentos de diversas empresas do ramo [13]-[15].

O modelo de Tamir se aplica somente a enlaces que considerem antenas eletricamente curtas, com polarizações idênticas na transmissão e na recepção, limitadas à vertical ou horizontal. Em função disto, e tendo em mente a situação prática do operador de rádio *manpack*, em que o equipamento é carregado em uma mochila nas costas com antena do tipo *whip* (monopolo afilado), assumiu-se antenas dipolo na polarização vertical, com comprimento $l = \lambda_0/50$. Este comprimento corresponde ao limiar máximo do que se considera usualmente como dipolo infinitesimal [16]. Ainda, assumiu-se como altura de referência $h_{T,R} = 3$ m.

B. Teste dos Limiares do Modelo de Tamir

A avaliação complementar do limiar de distância inferior do modelo de Tamir foi realizada a partir da comparação da intensidade de campo elétrico recebido associado à onda lateral, com a intensidade de campo total recebido, considerando todas as contribuições descritas na seção II. Ou seja, comparou-se $E_{total} = E_{lat} + E_{raios}$ com E_{lat} , buscando determinar a partir de que distância o campo total era praticamente determinado pela contribuição da onda lateral. Adotou-se um fator de 10 como limiar de referência, ou seja, a distância mínima de limiar d_{min} foi calculada como o valor a partir do qual $E_{lat} \geq 10 E_{raios}$.

O limiar superior de validade do modelo foi revisto avaliando a aderência do cenário típico considerado à hipótese de terra plana. Para tal, tomou-se como referência a distância de limiar de visada do enlace (d_v), que corresponde à distância em que a linha de visada entre transmissor e receptor tangencia a superfície da Terra, dada por [17]:

$$d_v = \sqrt{2h_T R_{eq_Terra}} + \sqrt{2h_R R_{eq_Terra}} \quad (20)$$

em que R_{eq_Terra} é o raio equivalente da Terra para uma atmosfera padrão ($\cong 8500$ km).

C. Modelo de Cálculo da Potência Recebida em Ambiente Aberto

O outro objetivo proposto neste trabalho foi avaliar o alcance esperado para o sistema típico considerado, em alguns tipos de florestas. Fabricantes de rádios portáteis costumam

especificar o alcance de seus equipamentos para ambientes abertos. Esta forma de avaliação é conservativa, pois desconsidera os efeitos das interações das ondas eletromagnéticas com os obstáculos normalmente presentes.

Esta forma de cálculo do alcance de um sistema de rádio foi considerada neste trabalho para fins de comparação com o cálculo a partir do modelo de Tamir, especificada na subseção seguinte. Em ambiente aberto, o modelo de dois raios para Terra plana é uma abordagem bastante representativa [17]. Para as frequências e alturas das antenas consideradas neste trabalho, a distância de transição do modelo de dois raios, dada por:

$$d_t \cong 12 \frac{h_T h_R}{\lambda_0} \quad (21)$$

é relativamente curta (para 30 MHz e alturas de 2 m, $d_t = 4,8$ m). Com isso, torna-se pertinente a aproximação do modelo de dois raios na zona de difração, em que:

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d^2} \right)^2. \quad (22)$$

Em (22) $P_{R,T}$ (W) são as potências de transmissão e recepção, respectivamente, assumindo cargas casadas às impedâncias das antenas; $G_{T,R}$ são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente; $h_{T,R}$ (m) são as alturas das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, e d (m) é a distância entre as antenas. Para as antenas dipolo consideradas neste trabalho, $G_T = G_R = G$ é dado aproximadamente por [16]:

$$G = 1,5 e_{cd} = 1,5 \frac{R_r}{R_r + R_l} \quad (23)$$

$$R_r = 2\pi \operatorname{Re}\{\eta\} \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2. \quad (24)$$

$$\cdot \left[\frac{1}{3} - \frac{\cos(2kh_{T,R})}{(2kh_{T,R})^2} + \frac{\operatorname{sen}(2kh_{T,R})}{(2kh_{T,R})^3} \right]$$

$$R_l = \frac{l}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma_c}} \quad (25)$$

em que e_{cd} é a eficiência de radiação, R_r (Ω) a resistência de radiação e R_l (Ω) a resistência de perdas de uma antena dipolo infinitesimal sobre solo condutor perfeito. Em (24), a impedância intrínseca do meio η (Ω), a constante de fase k e o comprimento de onda λ (m) são calculados para o espaço livre no presente modelo em ambiente aberto. Em (25), a (m) é o raio da seção reta circular da antena (fio cilíndrico) e σ_c (S/m) é a condutividade do metal do qual a antena é constituída. Neste trabalho, assumiu-se $a = 2$ mm e $\sigma_c = 57$ MS/m (cobre).

D. Modelo de Cálculo da Potência Recebida em Florestas

O cálculo da potência recebida assumindo o modelo de Tamir e as demais condições previamente indicadas remete à abordagem adotada em [6], baseada no conceito de comprimento vetorial efetivo para determinar a tensão induzida nos terminais de saída da antena receptora [16]. Com isso, tem-se:

$$V_R = E_{lat} \cdot l/2 \quad (26)$$

$$P_R = \frac{V_R^2}{R_A} = \frac{E_{lat}^2 l^2}{4(R_r + R_l)} = \frac{(E_{n_lat} l)^2 l^2}{4(R_r + R_l)} \quad (27)$$

$$I = \sqrt{\frac{e_{cd} P_T}{R_r}} \quad (28)$$

em que E_{n_lat} é dado por (4) dividido por l , a resistência de radiação R_r é dada por (24) com η , k e λ calculados considerando os parâmetros constitutivos da floresta, e a resistência de perdas R_l é dada por (25).

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A. Modelo de Tamir \times Modelo de Raios

Seguindo a metodologia descrita na seção anterior, a intensidade de campo total ($E_{lat} + E_{raios}$) foi comparada à intensidade de campo associada à onda lateral somente (E_{lat}), para os 4 tipos de floresta identificados na Tabela I, e para 9 frequências dentro da faixa de validade do modelo de Tamir. A maioria das frequências escolhidas é da faixa de HF, mas foram observadas também a frequência limiar inferior (2 MHz) e duas frequências na faixa de VHF.

As Figs. 4 a 7 ilustram o comportamento do campo recebido para diferentes tipos de floresta e em diferentes frequências na faixa de HF, com a indicação da distância d_{min} . A Tabela II apresenta todos os valores calculados para o conjunto avaliado. Observa-se que quanto mais densa a floresta, mais cedo a onda lateral predomina como mecanismo de propagação. Os valores obtidos ficaram bem abaixo do limiar de 1 km em sua maioria, especialmente para as florestas mais densas (tipos 2 a 4). Há uma tendência de aumento de d_{min} com a frequência, embora a curva exata seja oscilatória. Testes com alturas das antenas mais próximas da interface floresta-ar também levam a valores de $d_{min} < 1$ km. De modo geral, pode-se concluir que a análise complementar do limiar inferior não altera o limiar de 1 km indicado por Tamir.

Com relação ao limiar superior de distância, observa-se que d_v varia de 14,3 km para $h_T = h_R = 3$ m, a 45,2 km para $h_T = h_R = 30$ m. Percebe-se, portanto, que o limite de distância de validade superior proposto por Tamir é de certo modo superestimado, visto que a própria distância de limiar de visada assume valores bem menores que 100 km.

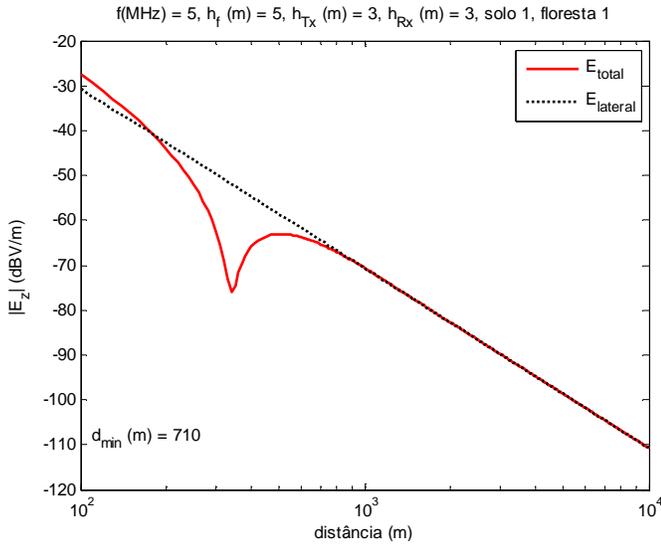


Fig. 4. $E_{total} \times E_{lat}$ para floresta do tipo 1, em 5 MHz ($II = 1$ A·m).

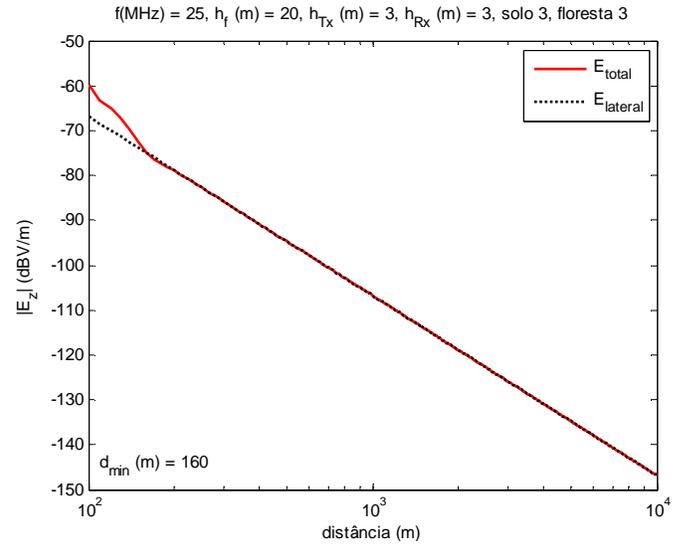


Fig. 7. $E_{total} \times E_{lat}$ para floresta do tipo 3, em 25 MHz ($II = 1$ A·m).

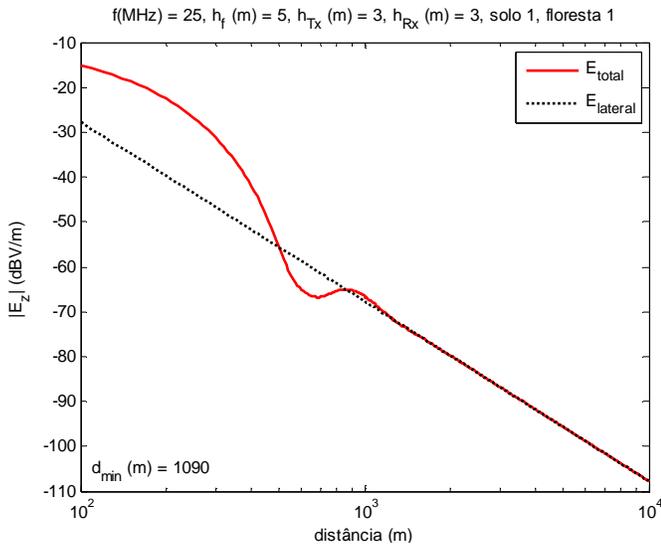


Fig. 5. $E_{total} \times E_{lat}$ para floresta do tipo 1, em 25 MHz ($II = 1$ A·m).

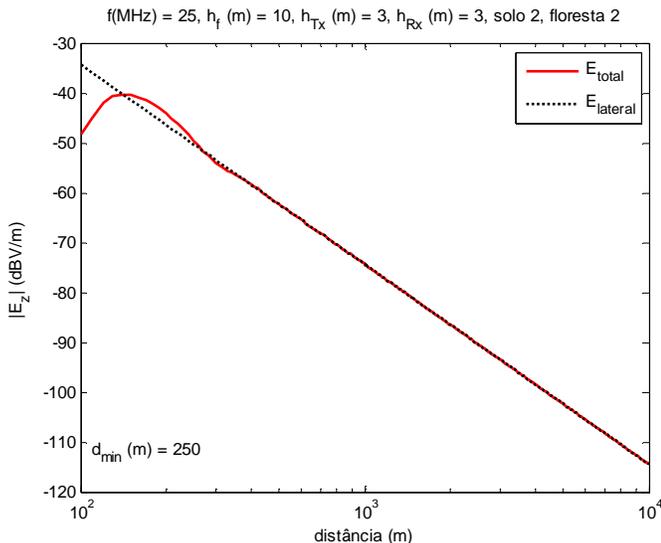


Fig. 6. $E_{total} \times E_{lat}$ para floresta do tipo 2, em 25 MHz ($II = 1$ A·m).

TABELA II
DISTÂNCIAS MÍNIMAS

f (MHz)	d_{min} (m)			
	Floresta 1	Floresta 2	Floresta 3	Floresta 4
2	600	110	150	130
5	710	110	120	110
10	980	230	140	110
15	800	190	150	120
20	1000	280	150	120
25	1090	250	160	120
30	980	300	180	130
90	790	360	170	130
150	1090	380	220	140

B. Potência Recebida \times Distância

A potência recebida foi calculada para o mesmo conjunto de frequências e tipos de floresta da subseção anterior. As Figs. 8 a 10 ilustram alguns dos resultados obtidos. Os cálculos foram realizados para distâncias de até 20 km, um pouco além de d_r calculado para $h_T = h_R = 3$ m.

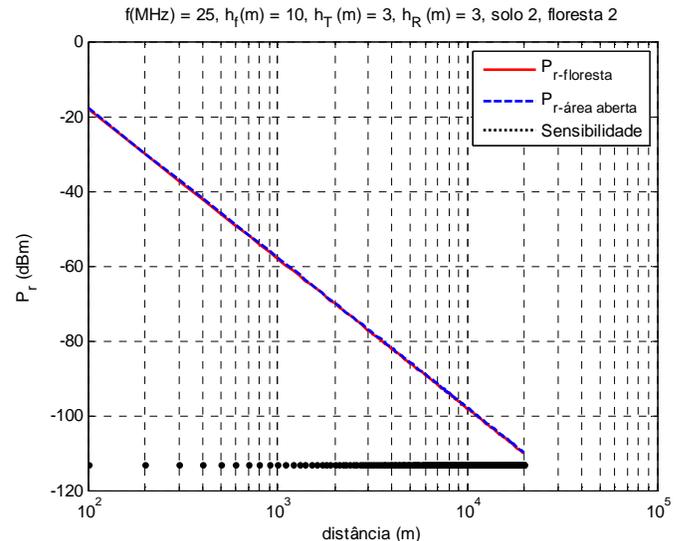


Fig. 8. Potência recebida para floresta do tipo 2, em 25 MHz

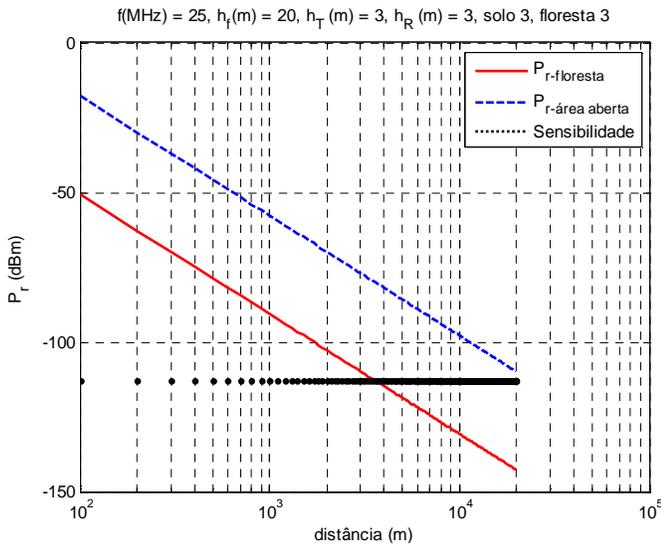


Fig. 9. Potência recebida para floresta do tipo 3, em 25 MHz

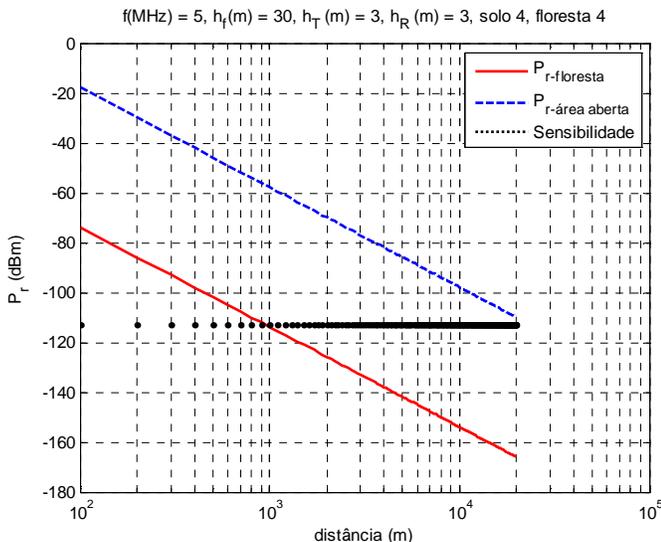


Fig. 10. Potência recebida para floresta do tipo 4, em 5 MHz

Observou-se que a potência recebida calculada pelo modelo de dois raios em área aberta sempre ficou acima do limiar de sensibilidade considerado (-113 dBm), ou seja, o alcance foi maior que 20 km. Com relação à potência recebida segundo o modelo de Tamir, o mesmo foi observado para frequências até 90 MHz na floresta do tipo 1, para frequências até 30 MHz na floresta do tipo 2 e para as frequências de 2 e 5 MHz na floresta do tipo 3. A atenuação na floresta 4 foi bem mais severa para os valores de potência considerados, de modo que apenas nas frequências de 2, 5 e 10 MHz o alcance foi significativo (4000, 900 e 200 m, respectivamente).

V. CONCLUSÃO

O presente artigo abordou o modelo de Tamir para cálculo da intensidade de campo elétrico irradiado por dipolos infinitesimais, nas faixas de HF e VHF, no que se refere às suas distâncias de limiar de validade. O objetivo foi complementar os argumentos que Tamir indicou para definir os limites de distâncias de validade, analisando aspectos não

explicitamente abordados em [5]-[7]. Em particular, verificou-se a potencial influência das demais componentes de propagação da Ótica Geométrica na composição do campo total e a questão da curvatura da terra, tendo em vista que o modelo assume Terra plana.

A análise comparativa das contribuições de campo consideradas corroborou o limiar inferior de 1 km indicado por Tamir. Na realidade, com exceção da floresta fina (tipo 1), as distâncias observadas ficaram bem abaixo deste limiar, ou seja, o argumento original que Tamir adotou para esta definição (limites de integração para avaliação assintótica) é mais restritivo que o argumento testado no presente trabalho (contribuição dos sinais direto, refletidos e de Norton).

Curiosamente, o limiar máximo de validade de 100 km parece ser exagerado. Uma análise simples de um parâmetro que avalia a pertinência da aproximação de Terra plana foi suficiente para apontar distâncias máximas bem menores (14,3 km para antenas a 3 m do solo). A extrapolação do modelo de Tamir para Terra esférica não pode ser tomada sem considerações cuidadosas sobre o efeito da curvatura da Terra.

Por fim, apresentou-se um estudo de caso para avaliar o alcance de um sistema portátil típico nos diferentes tipos de floresta considerados. Constatou-se que a faixa de HF é de fato mais favorável para a viabilidade destes sistemas em florestas, em especial nas florestas densas. Vale destacar que esta análise considerou a (baixa) eficiência das antenas empregadas, um fator usualmente desconsiderado em trabalhos similares.

REFERÊNCIAS

- [1] "Florestas do Brasil em resumo", Serviço Florestal Brasileiro, Ministério do Meio Ambiente, Brasília – DF, 2009.
- [2] ftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_murais (acesso em 09/03/2010).
- [3] J. C. R. Dal Bello, M. S. Assis, "Comunicações táticas na região amazônica – 1ª Parte", *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, vol. IX, no. 3, pp. 12-20, 1992.
- [4] J. C. R. Dal Bello, M. S. Assis, "Comunicações táticas na região amazônica – 2ª Parte", *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, vol. IX, no. 4, pp. 7-19, 1992.
- [5] T. Tamir, "On Radio Wave Propagation in Forest Environments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-15, no. 6, pp. 806-817, Nov 1967.
- [6] D. Dence, T. Tamir, "Radio loss of lateral waves in forest environments", *Radio Science*, vol. 4, no. 4, pp. 307-318, Abr 1969.
- [7] T. Tamir, "Radio Wave Propagation Along Mixed Paths in Forest Environments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-25, no. 4, pp. 471-477, Jul 1977.
- [8] L. M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, Ac. Press, 2nd Ed, 1980.
- [9] J. C. R. Dal Bello, Propagação de Ondas Eletromagnéticas na Floresta Amazônica, dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ, 1984.
- [10] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, 1989.
- [11] R. C. Pinto Filho, Propagação de Sinais Radioelétricos na Floresta Amazônica: Dimensionamento de Sistema, dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ, 1986.
- [12] J. Maclean, G. Wu, *Radiowave Propagation over Ground*, Springer, 1993.
- [13] www.yaesu.com (acesso em 10/09/2010).
- [14] www.harris.com (acesso em 10/09/2010).
- [15] www.tadiran.com (acesso em 10/09/2010).
- [16] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Ed, Wiley, 2005.
- [17] R. E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*, McGraw-Hill, 1985.