

Modelagem de Propagação na Banda UHF para Redes de Sensores sem Fio Aplicadas à Viticultura

Felipe P. Correia
Marcelo S. Alencar
e Waslon T. A. Lopes
Programa de Pós-Graduação
em Eng. Elétrica – COPELE
Campina Grande, PB, Brasil
Email: felipe.pinheiro@fapce.edu.br
malencar@iecom.org.br
waslon@ieee.org

Mauro Assis
Comitê Brasileiro da URSI
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Email: massis@openlink.com.br

Fabício B. S. Carvalho
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa, PB, Brasil
Email: fabicio@cear.ufpb.br

Resumo—As Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) podem ser utilizadas para monitorar grandes áreas agrícolas, por exemplo, as fazendas de uva na região do Vale do São Francisco, no Nordeste do Brasil, onde a principal atividade econômica é o cultivo de uvas para exportação, que demanda produção de alta qualidade para atender aos requisitos do mercado. Este artigo apresenta vários modelos clássicos e o comportamento destes modelos na tentativa de ajustar as medidas em plantações de uva localizadas nessa região. Nos corredores mais largos da plantação, é formado um guia de ondas. Por possuir vegetação mais densa, os corredores mais estreitos possuem decaimento mais rápido da potência do sinal. A propagação na diagonal é afetada pelas múltiplas difrações causadas pelos troncos das videiras.

I. INTRODUÇÃO

A região do Vale do São Francisco no Nordeste do Brasil tem como principal atividade econômica a fruticultura irrigada, cujos produtos competem no mercado internacional. A produção da região atinge o mercado externo, principalmente a Europa, onde as exigências sanitárias e de qualidade são elevadas [1]. A cidade de Petrolina, em Pernambuco, por exemplo, possui o terceiro maior PIB (Produto Interno Bruto) da agropecuária do país com contribuição de R\$ 658.796.000,00. A cidade de Juazeiro-BA ocupa a quinquagésima nona posição com uma contribuição de R\$ 200.937.000,00 [2]. As plantações de uva foram escolhidas para essa pesquisa por serem as que recebem maior investimento e proporcionam maior retorno financeiro.

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são candidatas a melhorar o processo produtivo nessa região, pois fornecem novas formas de gerenciamento das áreas de cultivo. No entanto, antes da implantação de um sistema de comunicações, é importante conhecer a perda de percurso do sinal, que ocorre, por exemplo, devido às diferentes alturas das antenas ou à presença de obstáculos. Fatores como a potência de transmissão, densidade da vegetação e ocorrência de visada direta também influenciam a perda [3], [4].

Devido à falta de modelos específicos para este tipo de aplicação, este artigo apresenta um estudo experimental da perda de percurso do sinal em plantações de uva, realizado com base em valores de potência obtidos *in loco*. Foram escolhidos

modelos clássicos da literatura para ajustes dos parâmetros de maneira empírica. Com base nos ajustes obtidos, é possível prever a potência do sinal em função da distância e estimar o alcance dos nós que pretende-se utilizar para o monitoramento, XBee[®] Pro ZB S2 [5].

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, a modelagem empírica é discutida; os modelos de propagação utilizados são apresentados na Seção III; os ambientes estudados são apresentados na Seção IV; na Seção V e VI são apresentados os resultados obtidos e as conclusões, respectivamente.

II. MODELAGEM EMPÍRICA

Os modelos de propagação empíricos são utilizados em ambientes que seguem alguns padrões, utilizados pelo pesquisador para modelar a perda de percurso do sinal. São estabelecidos parâmetros de ajuste, para que o modelo apresente resultados satisfatórios para o cenário e tenha um custo computacional adequado [6].

Os modelos são obtidos a partir de medições feitas no ambiente, ou por meio de simulação com base em modelos determinísticos ou aleatórios. Algumas técnicas são utilizadas para realizar o ajuste de curvas, como, por exemplo, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e o Método do Menor Valor Absoluto Residual (*Least Absolute Residual (LAR) Method*) [7].

O método LAR é uma alternativa ao MMQ. Em vez de minimizar a soma dos quadrados dos desvios, o método minimiza a soma dos módulos dos desvios. A vantagem do método é que ele é mais robusto quando a amostra possui valores atípicos (*outliers*) [7].

Para o caso unidimensional, o método consiste em estimar o parâmetro β_0 em

$$y_i = \beta_0 + \epsilon_i, \quad (1)$$

de forma que a soma dos erros em valor absoluto é minimizado

$$\min_{\beta_0} \sum_{i=1}^n |\epsilon_i| = \min_{\beta_0} \sum_{i=1}^n |y_i - \beta_0|. \quad (2)$$

O valor de β_0 que minimiza a soma é a mediana da amostra, o que justifica a diminuição da contribuição dos *outliers*. Na regressão linear,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \quad (3)$$

os parâmetros β_0 e β_1 são calculados utilizando programação linear [8] para minimizar

$$\sum_{i=1}^n |y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i|. \quad (4)$$

A Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMSE - *Root Mean Square Error*) é utilizado como medida do erro de previsão e é dado por [7]

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}, \quad (5)$$

em que N é o número de pontos na amostra, e x_i e \hat{x}_i são os valores medidos e previstos, respectivamente.

III. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

A. Propagação em espaço livre

O modelo de espaço livre considerado foi proposto por Friis [9] para a propagação entre duas antenas isotrópicas, quando não há obstáculos entre os terminais. Essa comunicação ocorre, por exemplo, entre satélites, ou via rádio, quando se desconsidera o efeito da Terra.

Para antenas isotrópicas ideais, a equação de Friis é dada por

$$P_r = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{16\pi^2 d^2 L} \right). \quad (6)$$

G_t e G_r são os ganhos do transmissor e do receptor respectivamente; P_t é a potência do transmissor; λ é o comprimento de onda da frequência de operação (metros); d é a distância entre o receptor e o transmissor; L é o fator de perdas do sistema.

Convertendo as unidades para dBm, obtém-se a potência recebida em função da distância e da frequência da portadora

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log(\lambda) - 10 \log(16\pi^2) - 20 \log(d) - 10 \log(L). \quad (7)$$

Utiliza-se, também, uma extensão do modelo de Friis com um expoente α para a distância. Dessa forma, a potência recebida é dada por

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log(\lambda) - 10 \log(16\pi^2) - 10\alpha \log(d) - 10 \log(L). \quad (8)$$

B. Propagação sobre terra plana

De acordo com o modelo da terra plana [10], [11], duas regiões distintas podem ser definidas em função da distância (d) entre o transmissor e o receptor: zona de interferência e zona de difração. A separação entre estas regiões corresponde a uma folga de 0,6 do raio da 1ª zona de Fresnel (R), sendo

$R = \sqrt{\lambda d_1 d_2 / d}$. Pode-se também definir esta separação através de uma distância d_s dada por,

$$d_s = \frac{12\pi h_t h_r}{\lambda}, \quad (9)$$

em que h_t e h_r são as alturas da antena transmissora e receptora respectivamente.

Quando o receptor encontra-se na zona de interferência, a intensidade de campo elétrico oscila em torno do espaço livre devido à soma fasorial do raio direto com o raio refletido. Caso a superfície seja rugosa, o raio refletido pode ser ignorado e a propagação se processa como no espaço livre. Por outro lado, na zona de difração, a potência recebida tem por expressão,

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \right). \quad (10)$$

C. Propagação entre duas placas paralelas

Os guias de ondas estão presentes em diversas aplicações e em diversas formas diferentes. Ambientes de propagação urbanos, suburbanos e *indoor* podem ser modelados dessa maneira se os objetos tiverem geometria semelhante a um guia e possuírem condutividade considerável. Uma das formas é o guia de placas paralelas mostrado na Figura 1. Esses guias são formados por duas placas metálicas com um dielétrico no meio, com permissividade ϵ .

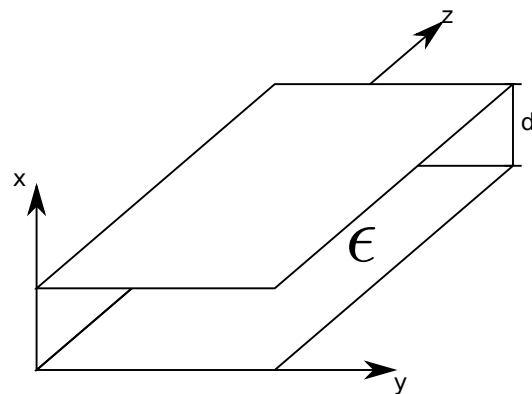


Figura 1. Diagrama de um guia de ondas formado por duas placas paralelas.

A onda eletromagnética se propaga dentro do guia na direção z . Na análise feita, é considerada uma onda eletromagnética transversal (TEM), em que os campos elétrico e magnético são perpendiculares e não há nenhuma componente de campo elétrico ou magnético na direção da propagação.

Nesta seção, é feita uma análise simplificada de como o sinal eletromagnético é atenuado entre duas placas paralelas, por meio de uma comparação com as equações de onda no regime permanente no espaço livre. Partindo das equações de Maxwell, é possível obter as expressões para os campos elétrico e magnético no regime permanente, para o espaço livre, considerando uma solução cosseno simples em que o campo elétrico não varia em função de x ou de y [12],

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(\omega t - k_0 z) \quad e \quad (11)$$

$$H_y(z, t) = E_{x0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos(\omega t - k_0 z), \quad (12)$$

em que E_{x0} é o valor de E_x em $z = 0$ e $t = 0$, ω é a frequência angular, t é o tempo e k_0 é o número de onda no espaço livre dado por $\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$. Os parâmetros ϵ_0 e μ_0 são a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética no vácuo, respectivamente. A impedância intrínseca do espaço livre é dada por $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$.

Na propagação entre placas paralelas, considerando que os planos são perfeitamente condutores e um dielétrico perfeito, os campos \vec{E} e \vec{H} são dados por [12]

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(\omega t - k_0 z) \quad \text{e} \quad (13)$$

$$H_y(z, t) = \frac{E_{x0}}{\eta} \cos(\omega t - k_0 z). \quad (14)$$

Em que $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ é a impedância intrínseca do meio, ϵ é permissividade e μ é a permeabilidade do meio.

Como apresentado na Seção III-A, em espaço livre a potência decai com o quadrado da distância. Comparando as equações 11 e 12, e as equações 13 e 14, percebe-se que elas possuem a mesma forma, exceto pelo fato de que, no caso das placas, deve-se considerar a permissividade e permeabilidade do meio. Dependendo da impedância intrínseca do dielétrico, o decaimento da potência se dará como no espaço livre, ou seja, com d^2 .

D. Modelo Log-Distância

De acordo com o modelo Log-Distância, a potência recebida P_r em uma distância d é dada por [13]

$$P_r = P(d_0) - 10n \log(d/d_0) + X \quad (\text{dB}). \quad (15)$$

Em que $P(d_0)$ é potência medida a uma distância de referência d_0 , n é o expoente de atenuação com a distância e X quantifica o desvanecimento em pequena escala, representada por uma variável aleatória gaussiana de média zero e desvio padrão σ .

Este modelo corresponde a uma variação do modelo de terra plana com a possibilidade de ajustar a dependência com a distância entre o transmissor e o receptor. Neste contexto, a sua validade é restrita ao receptor na zona de difração do transmissor. Por outro lado, como o modelo não leva em conta as alturas das antenas, é aplicável dentro de uma faixa de distância onde há homogeneidade do ambiente considerado. No caso de haver dois ou mais ambientes distintos, ajusta-se a dependência com a distância para cada um separadamente.

E. Propagação em ambientes com vegetação

Ambientes com vegetação influenciam a propagação do sinal devido à presença das folhas, troncos e galhos, que são responsáveis pelo espalhamento, difração e absorção da radiação. Esses mecanismos combinados resultam no excesso de atenuação. O excesso de atenuação é definido como a atenuação causada apenas pela vegetação, sem levar em consideração os outros mecanismos [14].

Existem alguns modelos empíricos de predição de perdas em diferentes tipos de plantação e com diferentes frequências. Em especial, o modelo de decaimento exponencial de Weissberger [15] é utilizado quando o caminho entre o transmissor e o receptor possui vegetação densa composta por árvores com

pouca umidade, encontradas em climas temperados. A perda pela vegetação é dada por

$$L(\text{dB}) = \begin{cases} 1,33f^{0,284}d^{0,588}, & 14 \text{ m} < d \leq 400 \text{ m}, \\ 0,45f^{0,284}d, & 0 \text{ m} \leq d < 14 \text{ m} \end{cases} \quad (16)$$

em que f é a frequência em GHz e d é a distância em metros percorrida dentro da vegetação. A faixa de frequências dentro da qual o modelo é válido é de 230 MHz a 95 GHz.

A Recomendação da União Internacional de Telecomunicações (UIT-R) foi desenvolvida a partir de medições feitas principalmente na faixa UHF [14]. A distância entre o transmissor e o receptor deve ser menor que 400 m, de forma que o sinal se propaga, principalmente, por dentro da vegetação, sem a formação da onda lateral. A perda por vegetação é dada por

$$L(\text{dB}) = 0,2f^{0,3}d^{0,6}, \quad (17)$$

em que f é a frequência (entre 200 MHz e 95 GHz) e d é a distância.

De acordo com esses modelos, é possível verificar que a excesso de perda devido à vegetação pode ser representada pela expressão [16], [17]

$$L(\text{dB}) = Af^Bd^C. \quad (18)$$

A partir de medições realizadas no ambiente de interesse, os parâmetros são obtidos utilizando um método de ajuste de curvas (e.g. MMQ ou LAR).

IV. AMBIENTES ESTUDADOS

A plantação estudada cobre uma área de aproximadamente 10 hectares e sua altura média é 2 metros. Para obter essa estrutura, são utilizados troncos de madeira e arames para sustentar as folhas e uvas, a fim de manter a altura da plantação uniforme. Essa estrutura é chamada de parreiral, conforme pode ser visto na Figura 2.



Figura 2. Foto de um parreiral na Fazenda Minuano, na cidade de Vermelhos, em Pernambuco.

Na Figura 3 (a) e 3 (b) são apresentadas as vistas superior e lateral ao parreiral, respectivamente. A distância média l entre

corredores é 3,50 m e a distância média a entre videiras em um mesmo corredor é 3,00 m. Neste trabalho, o corredor formado entre os troncos com distância l é chamado de corredor do tipo A, ao longo do texto. O corredor com distância entre os troncos a é chamado de corredor do tipo B. Além dessas, outras medidas são importantes para caracterização do ambiente. A altura da plantação em relação ao solo é denotada por h_{plant} , g é o diâmetro dos troncos de madeira, θ é o ângulo entre o vetor v_1 e v_2 , como apresentado na Figura 3 (a). O vetor v_1 é um vetor unitário que indica a direção de propagação ao longo do corredor do tipo A. O vetor v_2 também é unitário e possui uma direção θ no intervalo $[0; 2\pi]$.

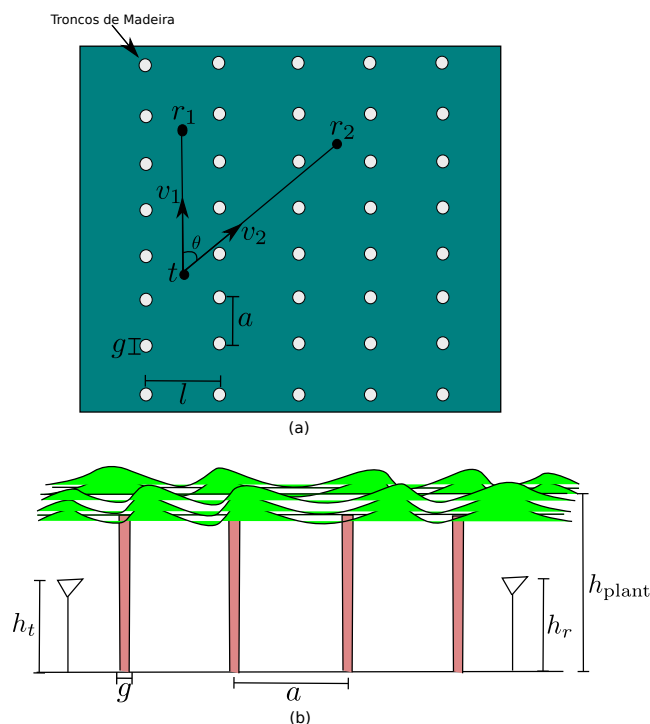


Figura 3. (a) Vista superior de uma plantação de uvas e (b) vista lateral.

Os parâmetros h_{plant} , l , a e g são padronizados e variam pouco de uma fazenda para outra. O valor de h_{plant} é por volta de 2 m, os valores típicos de l , a e g são 3,50 m, 3,00 m e 43 cm, respectivamente. Existem, portanto, três graus de liberdade, h_t (altura do transmissor), h_r (altura do receptor) e θ .

A. Metodologia

Os experimentos foram realizados na fazenda Minuano, situada no município de Vermelhos a 70 km de Petrolina, localizado no estado de Pernambuco, com um par de nós XBee Pro S2. Os dispositivos possuem potência de saída +18 dBm, sensibilidade especificada pelo fabricante -102 dBm, e frequência de operação 2,4 GHz. A antena é do tipo dipolo com conector RPSMA. Os dispositivos possuem as mesmas especificações exceto pelo fato de que um foi conectado a um *notebook* para que os dados sejam inseridos em uma base de dados. Este terminal é configurado como coordenador.

O nó coordenador (transmissor) foi mantido na mesma posição e o dispositivo final (receptor) foi posicionado es-

trategicamente ao longo da plantação. Em cada ponto, o nó coordenador requisita um pacote RSSI (Received Signal Strength Indication) do terminal fixo e os dados são inseridos em uma base de dados.

O coordenador é conectado a um *notebook* (com 3 Gbytes de memória RAM e processador de 2,4 GHz). O dispositivo final é posicionado a uma distância de 1 metro e os pacotes RSSI são lidos. Em seguida, são realizadas 100 medições por posição, até o ponto em que não haja potência suficiente para comunicação, ou até que o fim da plantação seja alcançado. Então, os dados são analisados utilizando as ferramentas Gnuplot e Matlab. Finalmente, um modelo de propagação é escolhido e ajustado para cada caso.

Identificaram-se cinco configurações para a altura e o posicionamento dos terminais na plantação, que resultam em mecanismos de propagação dominantes diferentes. No primeiro caso, os terminais estão abaixo da cobertura vegetal e posicionados no corredor do tipo A. No segundo caso, os terminais estão sob a cobertura vegetal posicionados no corredor do tipo B.

Quando os terminais estão sob a cobertura e há obstáculos entre o transmissor e o receptor, o terceiro caso se caracteriza. No quarto caso, um dos terminais está acima da plantação e o outro abaixo. Finalmente, verifica-se o quinto caso quando os dois terminais estão acima da plantação. Neste artigo, são discutidos apenas os três primeiros casos.

V. RESULTADOS

A. Corredor A

A Figura 4 apresenta a potência recebida (dBm) em função da distância entre o transmissor e o receptor. Esta figura inclui também os modelos de espaço livre e de terra plana, ambos com o expoente da distância ajustado em função dos dados experimentais. A interpretação dos resultados obtidos pode ser feita conforme descrito a seguir. A geometria do corredor A (ver Figura 2) induz à utilização do modelo da terra plana. Por outro lado, considerando a frequência de 2,4 GHz e supondo as alturas das antenas transmissora e receptora iguais a 1 metro, a distância de separação entre as zonas de interferência e difração corresponde a 96 metros. Para as demais alturas, a interpretação é exatamente a mesma.

Observa-se que para distâncias inferiores a 96 m, as medidas aproximam-se do valor de espaço livre. Inclusive, o expoente da distância é muito próximo de 2 (ver Tabela I). Isto porque o receptor se encontra na zona de interferência e o raio refletido pode ser ignorado devido às irregularidades do solo. Para visualizar esta afirmativa, mais uma vez deve ser feita referência à Figura I. Nesta situação, o modelo da terra plana diverge bastante, pois somente é aplicável na zona de difração, ou seja, para distâncias superiores a 96 m.

Quando o receptor se encontra na zona de difração, o ajuste com o modelo da terra plana se mostra satisfatório. Entretanto, o expoente da distância é inferior a 4, da ordem de 3,25 mostrando a existência de um reforço de energia nesta região. Considerando que o corredor é coberto por uma estrutura de arame e vegetação a 2 metros de altura, pode-se inferir que tal reforço está associado a um efeito de canalização como no modelo de duas placas paralelas descrito na Subseção III-C.

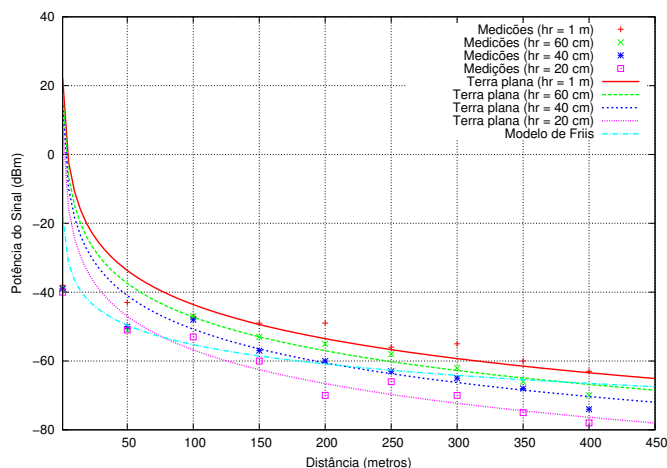


Figura 4. Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de espaço livre de Friis e de terra plana com o expoente ajustado no corredor do tipo A (escala linear para a distância).

Cumprir observar que não há difração lateral devido à largura do corredor A (3,5 metros).

Tabela I. RMSE PARA OS MODELOS DE ESPAÇO LIVRE DE FRIIS E DE TERRA PLANA COM EXPOENTES AJUSTADOS REFERENTES AO CORREDOR DO TIPO A.

Modelo - Altura	Expoente (n)	RMSE (dBm)
Friis	1,87	9,35
Terra Plana - 1 metro	3,29	6,96
Terra Plana - 60 cm	3,25	6,95
Terra Plana - 40 cm	3,25	6,28
Terra Plana - 20 cm	3,25	6,68

B. Corredor B

O corredor do tipo B mostrado na Figura 5 tem como característica uma maior densidade de vegetação. Consequentemente, o espalhamento e a absorção ocasionam perdas que atenuam o efeito da canalização observada no corredor do tipo A. Adicionalmente, cumpre informar que não foi verificada, com as medidas realizadas, uma clara dependência com as alturas das antenas de recepção. Em vista disto, optou-se por utilizar, neste caso, o modelo Log-Distância. Desta forma, ajustando a Equação 15 com referência aos valores medidos na distância de 96 metros (início aproximado da zona de difração), chegou-se à seguinte expressão para a potência recebida,

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 10n \log(d) \text{ dBm.} \quad (19)$$

Os valores de P_t , G_t e G_r utilizados são os fornecidos pelo fabricante de nós XBee e são, respectivamente, iguais a 18 dBm, 2,1 dB e 2,1 dB. Por outro lado, como o problema do desvanecimento de pequena escala não está sendo levado em conta no presente trabalho, a variável aleatória X não foi considerada.

O valor de n obtido com o método LAR fornecido pelo Matlab foi de 4,357, com um RMSE de 3,567. A Figura 6 mostra os dados experimentais em função da distância e a curva ajustada com o citado valor de n .



Figura 5. Fotos da vegetação no corredor do tipo B, na fazenda Minuano localizada no município de Vermelhos, em Pernambuco.

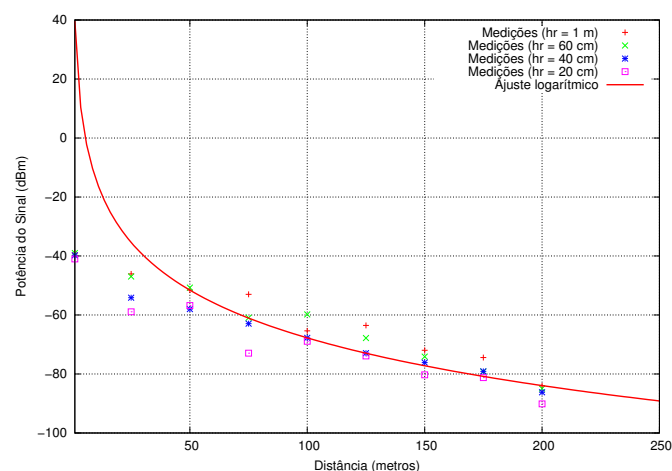


Figura 6. Potência recebida (dBm) em função da distância e equação de ajuste logarítmica (escala linear para a distância).

C. Diagonal

Primeiramente, foi realizada uma comparação entre o modelo de Weissberger [15] e a Recomendação do UIT-R para a faixa UHF [14] levando em consideração todas as medições feitas na diagonal.

Apesar das medições realizadas por Weissberger terem sido feitas em ambientes com características diferentes, a equação proposta por ele tem um ajuste razoável levando em consideração o RMSE, como também, verificado graficamente. Dessa forma, como em [16], foi realizado o ajuste dos parâmetros A , B e C do termo de excesso de atenuação pela vegetação são obtidos com otimização. Além disso, propõe-se a determinação do expoente do modelo Log-distância, da maneira feita para o corredor do tipo B. As curvas referentes às equações ajustadas são apresentadas na Figura 8. A Tabela II apresenta os expoentes e os valores de RMSE.

A partir dos ajustes realizados, percebe-se que não há ganho significativo com o ajuste dos parâmetros A , B e C com relação ao RMSE. Esse fato é justificado pelas múltiplas difrações que ocorrem ao longo do trajeto entre os terminais.

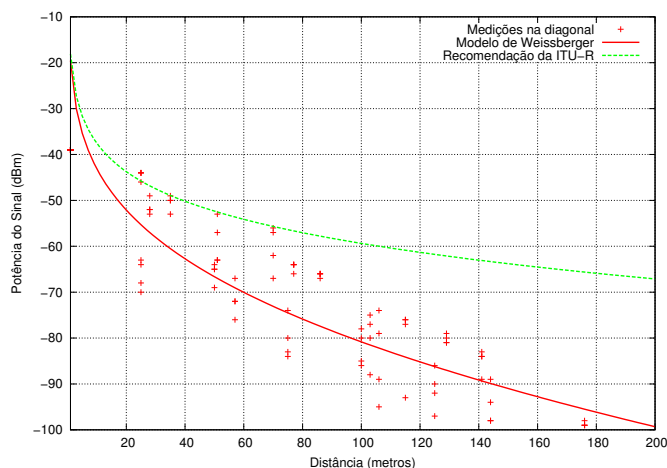


Figura 7. Potência recebida (dBm) em função da distância e modelos de Weissberger e da UIT-R (escala linear para a distância).

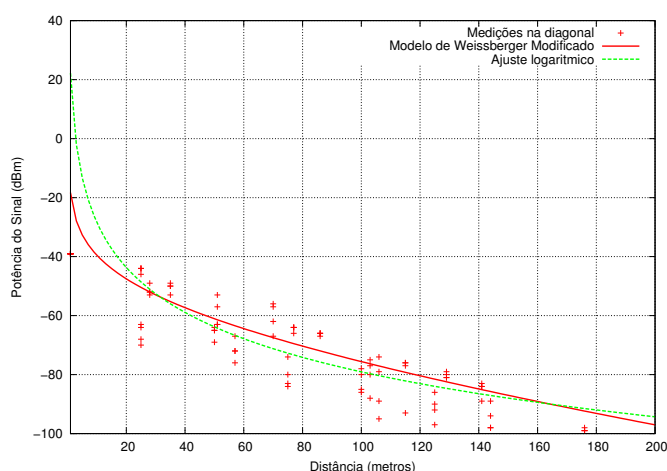


Figura 8. Potência recebida (dBm) em função da distância e equações de ajuste para diagonal (escala linear para a distância).

Tabela II. PARÂMETROS E VALORES DE RMSE PARA AS EQUAÇÕES DE WEISSBERGER, LOGARÍTMICA E LINEAR.

Modelo	Parâmetros	RMSE (dBm)
Weissberger Modificado	$A = 0,08$ $B = 1,96$ $C = 0,83$	10,98
Logarítmico	$n = 5,06$	2,69

VI. CONCLUSÕES

Tendo por referência um amplo conjunto de medidas, este artigo apresenta ajustes empíricos para os modelos matemáticos aplicáveis ao equacionamento da propagação em redes de sensores sem fio com aplicação à viticultura. No caso do corredor tipo A, o emprego de um modelo baseado na propagação sobre terra plana levou a uma dependência com a distância inferior ao valor 4 da formulação teórica. Este resultado mostrou a existência de um reforço do sinal em propagação ao longo do corredor, o que pode ser explicado por um efeito de canalização entre o solo e a estrutura que cobre o parreiral.

No corredor do tipo B, onde não foi observada nenhuma dependência com a altura da antena de recepção, optou-se pelo modelo Log-Distância. A contribuição das perdas na vegetação levou a um expoente da distância superior a 4.

Finalmente, na propagação em diagonal, foram considerados os modelos de Weissberger, a Recomendação UIT-R P.833 e o Log-Distância. Este último mostrou-se adequado, com um decaimento mais rápido do que o obtido no corredor B. Este resultado se deve ao efeito da difração múltipla na estrutura vertical do parreiral. Por outro lado, provavelmente devido a este mesmo efeito, os modelos de Weissberger e do UIT-R não se mostraram satisfatórios.

Pretende-se, como trabalhos futuros, realizar mais medições em outras direções e da parte de cima da plantação para baixo, a fim de verificar a atenuação causada pelas folhas e frutas. Além disso, estudar a atenuação do sinal em outras plantações, como manga, coco e banana.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IECOM, a COPELE e ao CNPq por dar suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] J. P. Lima e E. A. Miranda, "Fruticultura irrigada no vale do são francisco: incorporação tecnológica, competitividade e sustentabilidade," *Revista Econômica do Nordeste*, vol. 32, pp. 611–632, 2001.
- [2] IBGE, "Posição ocupada pelos 100 maiores municípios, em relação ao valor adicionado bruto da agropecuária e participações percentuais relativa e acumulada, segundo os municípios e as respectivas unidades da federação - 2010," 2010.
- [3] M. S. Alencar e V. C. da Rocha Jr., *Communication Systems*. Springer, 2005.
- [4] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*. São Paulo: CRC Press, 1993.
- [5] Digi International Inc., "XBee/XBee-Pro ZB RF modules," *XBee/XBee-Pro ZB RF Modules Datasheet*, 2012.
- [6] S. R. Saunders e A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. Wiley, 2ª ed., 2007.
- [7] Y. Dodge, *The concise encyclopedia of statistics*. Springer, 2008.
- [8] G. Lachtermacher, *Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões*. São Paulo: Pearson, 2009.
- [9] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of IRE*, pp. 254–256, 1946.
- [10] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*. New York: Mc Graw Hill, 1982.
- [11] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*. John Wiley & Sons, 1993.
- [12] W. H. Hayt e J. A. Buck, *Eletromagnetismo*. LTC, 6ª ed., 2003.
- [13] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2ª ed., 2002.
- [14] UIT-R, *Attenuation in Vegetation*. Genebra: Recomendação UIT-R P.833-8, 2013.
- [15] M. A. Weissberger, "An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by foliage," *Electromagnetic Compatibility Analysis Center*, 1981.
- [16] Y. S. Meng et al, "Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 5, 2009.
- [17] Y. S. Meng et al, "Study of propagation loss prediction in forest environment," *Progress in Eletromagnetics Research B*, vol. 17, pp. 117–133, 2009.