

7

Metodologia

O presente trabalho está concentrado na determinação de um modelo de perda de propagação devido à presença vegetal e para tanto foram evitadas, áreas com edificações e obstáculos naturais à propagação na faixa de frequências utilizada.

Em todas as medições, o receptor estava a uma altura de 1,5 metros em relação ao solo, caracterizado como plano. O transmissor foi instalado inicialmente na altura de 1,5 metros, depois 6 metros e, em seguida, 12 metros em relação ao solo. A variação na altura do transmissor tem o objetivo de verificar o comportamento do sinal ao se propagar nas diversas estruturas vegetais, tais como troncos e copas. Para servirem como parâmetros de comparação entre os ambientes medidos, serão tomadas amostras de altura média dos troncos, diâmetro médio, espécie vegetal predominante e altura média do solo até a copa das árvores. A amostra de terreno que representará toda a coleção de vegetais será tomada de uma quadrícula de 50x50 metros, para as áreas com densa vegetação e uma linha de 50 metros, para o caso de linha de árvores, de onde serão levantadas as estatísticas citadas. A quadrícula será sempre na área de maior irradiação de energia, no lóbulo principal e no início do percurso de medição, a partir do transmissor.

Será analisado o caso de árvores isoladas, de fácil caracterização, com o objetivo de medir e mensurar os efeitos causados por um simples indivíduo sobre a comunicação em suas proximidades à medida que o receptor se afasta. A medição em cada espécime será tomada com a antena de transmissão posicionada a 40 metros do tronco, orientada de forma que a linha de máxima diretividade intercepte o indivíduo. Os pontos de medição serão tomados a partir do transmissor em: 38 metros, 41 metros, 50 metros, 60 metros, 70 metros e 80 metros, com o objetivo de captar o sinal antes da árvore, na proximidade e após. O percurso será livre de obstáculos e quaisquer árvores próximas, e o diâmetro do tronco medido a uma altura de 1,3 metro do solo.

Será estudado o caso de linha de árvores, plantadas em espaços regulares, de forma similar à arborização urbana presente em ruas. A antena de transmissão foi posicionada de forma que a linha de máxima diretividade interceptasse os indivíduos à medida que se propaga. A antena de recepção foi posicionada em espaços regulares na linha de árvores. O terreno é plano e as amostras de diâmetro dos troncos foram tomadas a 1,3 metro do solo o GPS foi utilizado para posicionar os pontos de coleta de dados do sinal.

Prosseguindo, o estudo se concentrou no ambiente bosque urbano, com vegetais em áreas delimitadas em zonas urbanas, tais como praças arborizadas, jardins botânicos e afins. Neste caso, a antena de transmissão foi posicionada de forma a irradiar sobre pontos determinados na linha de maior diretividade, com o uso do GPS para a localização da distância entre as antenas, e a medição do sinal foi realizada nos pontos marcados. O levantamento das estatísticas sobre as árvores é similar ao adotado no caso da linha, contudo as amostras foram tomadas de uma quadrícula de 50 metros. Por fim, será analisado o ambiente floresta, de forma similar à metodologia aplicada aos bosques.

Para todos os casos de morfologia vegetal foi emitido um sinal CW (tom contínuo), nas frequências de 700 MHz, 750 MHz e 800 MHz com potência constante, nas alturas de transmissão de 1,5 metro, 6 metros e 12 metros da linha do solo e captados no receptor sempre à altura de 1,5 metro, em diferentes distâncias do transmissor, sempre na direção de maior diretividade. Em outras palavras, para cada frequência utilizada foram efetuadas medições com cada altura da antena transmissora, em diferentes distâncias entre as antenas, de forma a compor o espaço amostral deste estudo.

As amostras serão utilizadas para a obtenção de uma curva de melhor ajuste da atenuação com a distância, pelo método dos mínimos quadrados. Na análise em alturas de transmissão e frequências será adotada uma abordagem estatística e empírica, utilizando a interpolação linear, se necessária. Este processo será feito para todas as coleções de amostras, em cada frequência, para todas as morfologias vegetais e alturas de transmissão.

Os dados obtidos das estatísticas das dimensões dos vegetais serão utilizados para a verificação destes na interferência sobre a propagação e possíveis fatores de ajuste nas curvas de propagação às quais estejam relacionados.

O modelo obtido será comparado a modelos já propostos e de ampla utilização.

7.1

Curva de ajuste

Visando melhorar a interpretação e comparação dos dados obtidos em campo, será utilizada a técnica da curva de melhor ajuste logarítmica por mínimos quadrados, que, basicamente, consiste em determinar os parâmetros a_0 e a_1 da reta $a_0 + a_1 \log d$, de modo que a soma dos quadrados da distância de cada ponto para a reta seja mínima. Em outras palavras, deseja-se determinar os parâmetros que minimizem:

$$M(a_0, a_1) = \sum_{i=0}^n r_i^2(x) = \sum_{i=0}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (7.1)$$

n é o número de pontos, r_i^2 é o erro médio quadrático e y_i é o valor das amostras. O argumento x , que representa as distâncias entre as antenas é tomado em escala logarítmica, assim $x = \log(d)$.

Para que a equação 7.1 seja minimizada é necessário que:

$$\frac{\partial M}{\partial a_0} = 0 \quad e \quad \frac{\partial M}{\partial a_1} = 0$$

ou seja:

$$\frac{\partial M}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=0}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) (-1) = 0$$

e

$$\frac{\partial M}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=0}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) (-x_i) = 0$$

Organizando as duas condições tem-se:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^n y_i = \sum_{i=0}^n a_0 + \sum_{i=0}^n a_1 x_i \\ \sum_{i=0}^n x_i y_i = \sum_{i=0}^n a_0 x_i + \sum_{i=0}^n a_1 x_i^2 \end{cases}$$

Que podem ser representadas pelo sistema linear abaixo:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n 1 & \sum_{i=0}^n x_i \\ \sum_{i=0}^n x_i & \sum_{i=0}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n y_i \\ \sum_{i=0}^n x_i y_i \end{bmatrix}$$

Resolvendo este sistema, obtêm-se os valores dos coeficientes da reta de ajuste, determinando-se a reta. Foi implementado um programa em Matlab r11 (apêndice I), que implementa esta ferramenta de cálculo.

7.2

Posicionamento das antenas

Um fator a ser considerado em relação ao posicionamento da antena de transmissão diz respeito ao ângulo de abertura vertical de meia potência (α).

Toda antena possui um ângulo de abertura vertical assinalado verticalmente entre as linhas em que a potência captada é a metade do valor na linha de máxima diretividade (fig. 7.1).

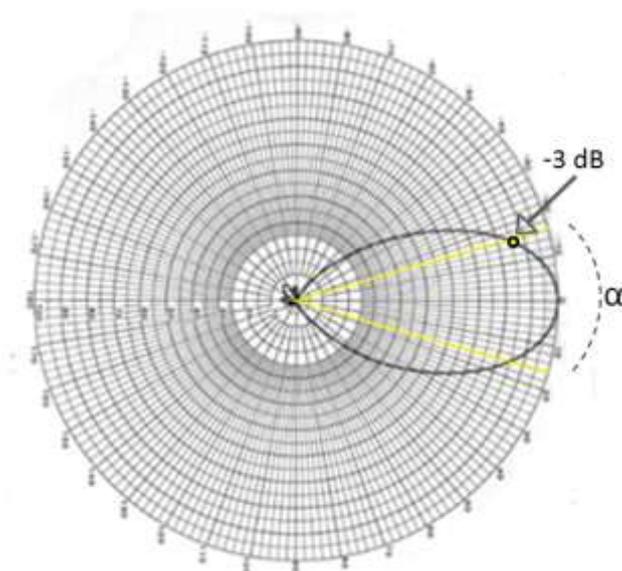


Figura 7.1 - Ângulo de meia potência

É importante assegurar que a antena de recepção esteja na faixa de maior potência, a fim de evitar distorções e erros nas medições. A geometria do problema pode ser vista na figura 7.2, onde se pode concluir que a recepção deve ser feita a uma distância mínima do transmissor.

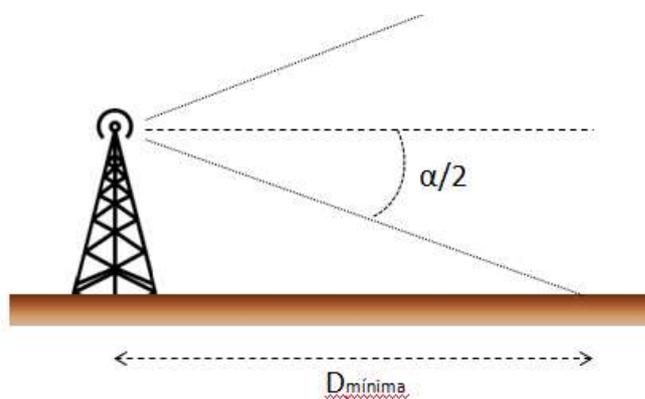


Figura 7.2 - Distância mínima entre transmissor e receptor.

Com o auxílio do teorema de Pitágoras e sabendo que o ângulo de meia potência das antenas utilizadas é de 32 graus, obtêm-se as distâncias mínimas para boa recepção, em dependência das alturas de transmissão, apresentadas na tabela 7.1.

Altura de transmissão (metros)	1,5	6	12
Distância Mínima (metros)	5,3	20,9	41,8

Tabela 7.1 - Distância mínima em função das alturas de transmissão.

No caso da medição em trajetos mais curtos, onde as distâncias envolvidas são menores, optou-se por utilizar um *downtilt* (inclinação vertical para baixo) de 20 graus, para a altura de transmissão de 12 metros, o que resultou em uma distância mínima de 16,5 metros.

A antena de recepção em todas as medições foi mantida alinhada com a direção de maior ganho, o que foi conseguido com o auxílio de GPS e bússola e sem qualquer *downtilt*, no que foi utilizado um prumo de bolha em água.

7.3

Interpolação

A obtenção de curvas de melhor ajuste para a perda de propagação em função da distância para cada coleção de dados provê uma função contínua, construída a partir de uma coleção de dezenas de amostras, contudo, outras variáveis analisadas neste trabalho, como altura de transmissão e frequência, possuem baixa quantidade de amostras, o que inviabiliza a utilização consistente desta técnica como forma de predição para intervalos contínuos destas variáveis em função do erro introduzido [35].

No caso da frequência, a análise da equação da perda básica de Friis (equação 2.10) e de diversos modelos de propagação, pressupõe que a perda aumenta à medida que frequências mais altas são utilizadas. Em casos reais o valor captado na medição depende de vários fatores, tais como: obstruções, vegetais e multipercurso [5]. Fatores localizados e pontuais afetam, principalmente, o comportamento em pequena escala do sinal e menos a larga escala, conforme o capítulo II.

De acordo com a literatura [36] o sinal recebido sempre sofre perdas com a redução da altura das antenas. Desta forma, o campo captado é menor à medida que se reduz a altura da antena de transmissão, ainda que os mesmos fatores citados no parágrafo anterior também se apliquem a este caso.

Com o intuito de contornar o problema da pouca amostragem destas variáveis, optou-se por usar a técnica da interpolação linear, que tem o seu primeiro uso registrado, historicamente, na região da Mesopotâmia (Stark, 1979). Importantes trabalhos como o modelo de Okumura *et al.* utiliza interpolação para inferir valores de parâmetros que se encontram fora das curvas.

De modo a tornar o modelo proposto neste trabalho mais simples de ser utilizado, optou-se por desenvolver relações matemáticas empíricas para a interpolação.

A reta de melhor ajuste das variáveis distância e atenuação (L) pode ser interpretada por uma atenuação inicial (L_0) e por um fator de atenuação com a distância (φ), conforme a equação 7.2.

$$L = L_0 + \varphi \log d \quad (7.2)$$

Analisando as retas de ajuste tomadas em frequências adjacentes e crescentes, pode-se esperar o comportamento representado na figura 7.3.

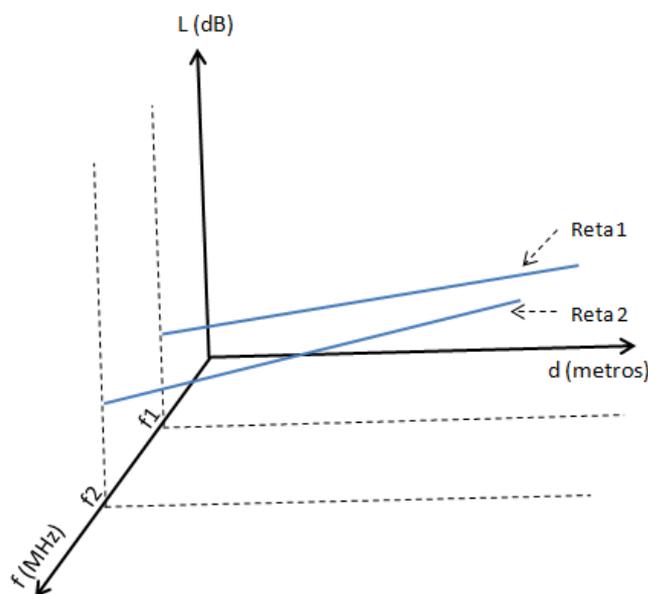


Figura 7.3 - Retas de ajuste tomadas em diferentes frequências, d em escala log..

A projeção das retas no plano $L \times d$, pode ser vista na figura 7.4.

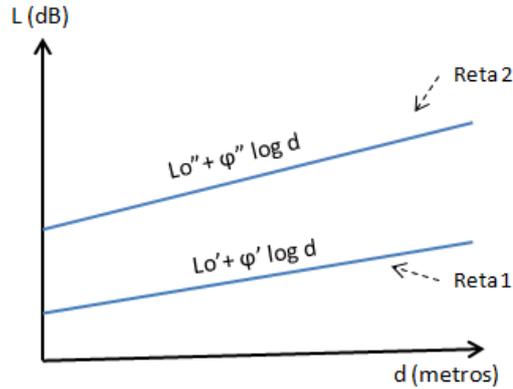


Figura 7.4 - Projeção das retas no plano $L \times d$, d em escala logarítmica.

A solução para o problema de interpolação consiste em gerar uma família de retas no intervalo contínuo entre as frequências f_1 e f_2 cuja projeção no plano $L \times d$ esteja compreendida entre a Reta1 e Reta2 e que represente o modelo físico satisfatoriamente. Uma solução seria a utilização do método de interpolação de Lagrange, o que demandaria maior esforço computacional.

Optou-se pelo uso de um ponderador proporcional que, basicamente, calcula o intervalo entre os parâmetros L_0'' e L_0' e entre φ'' e φ' , que controlam a atenuação inicial e o decaimento com a distância (*slope*), respectivamente, e compõe a expressão da perda total em função da perda representada na reta de menor frequência, acrescida da perda provocada pelo aumento da frequência, ponderada proporcionalmente no intervalo. Desta forma, durante a interpolação, tanto o parâmetro da perda inicial quanto o *slope* são ponderados pelo aumento da frequência proporcionalmente, assim têm-se:

$$\Delta = (L_0'' + \varphi'' \log d) - (L_0' + \varphi' \log d)$$

$$\Delta = (L_0'' - L_0') + (\varphi'' - \varphi') \log d$$

$$L(d, f) = L_{reta1} + \Delta \Phi(f)$$

$$L(d, f) = L_0' + \varphi' \log d + [(L_0'' - L_0') + (\varphi'' - \varphi') \log d] \Phi(f) \quad (7.3)$$

$L(d, f)$ é a perda interpolada, Δ é o diferença entre as retas 1 e 2 e $\Phi(f)$ é o ponderador proporcional, que assume a forma da fig. 7.5:

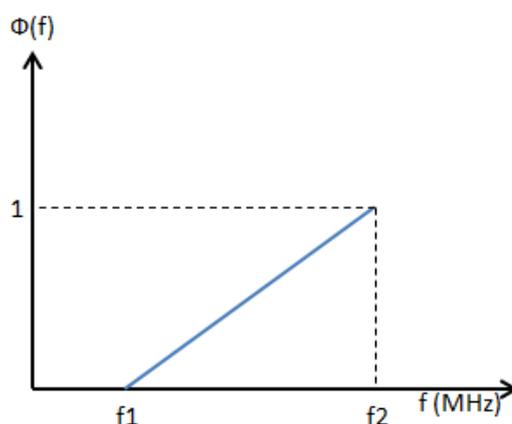


Figura 7.5 - Ponderador em função da frequência.

e,

$$\Phi(f) = \frac{f}{(f_2 - f_1)} - \frac{f_1}{(f_2 - f_1)} \quad (7.4)$$

O ponderador $\Phi(f)$ assume valores entre 0 e 1 e é definido no intervalo $[f_1, f_2]$. É simples demonstrar que para o valor de frequência f_1 seu valor é zero e o valor da perda interpolada tem somente a contribuição da perda da Reta1. De outra forma quando seu valor é máximo, na frequência f_2 , tem-se a contribuição apenas da Reta2.

Agrupando as equações 7.3 e 7.4, a equação final da perda interpolada assume a forma:

$$L(d, f) = L'_0 + \varphi' \log d + [(L_0'' - L_0') + (\varphi'' - \varphi') \log d] \left[\frac{f}{(f_2 - f_1)} - \frac{f_1}{(f_2 - f_1)} \right] \quad (7.5)$$

A interpolação gera uma família de curvas em função da frequência utilizada na faixa entre f_1 e f_2 , onde os coeficientes de atenuação e *slope* de cada curva estão linearmente distribuídos entre os respectivos coeficientes das retas de ajuste originais, conforme figura 7.6.

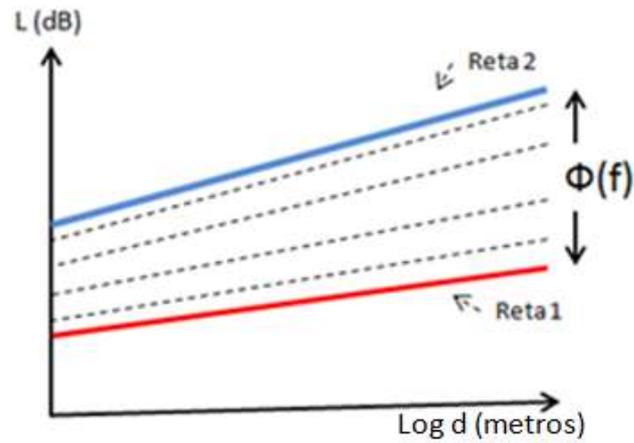


Figura 7.6 - Projeção (L x d) da reta interpolada de acordo com o ponderador.

A expressão final da perda, agora contínua no intervalo de frequência, gera uma superfície formada a partir das retas de ajuste originais, conforme exemplo na figura 7.7.

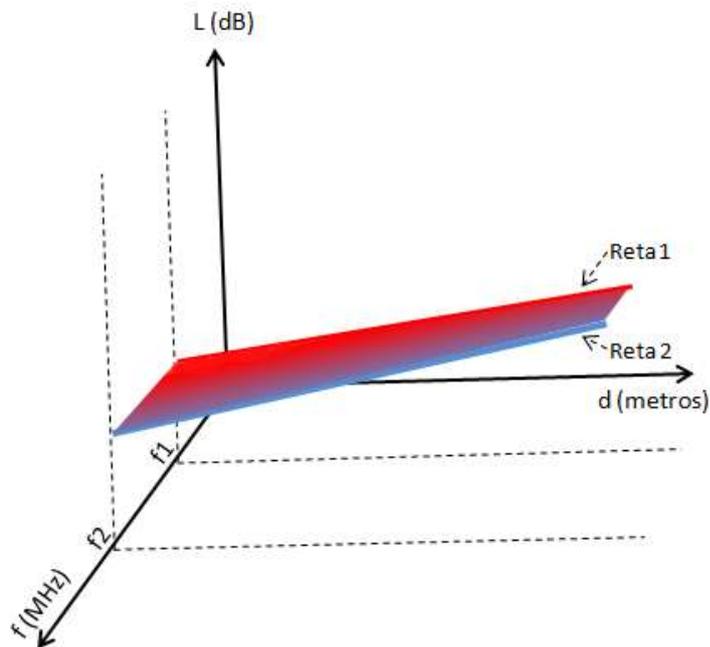
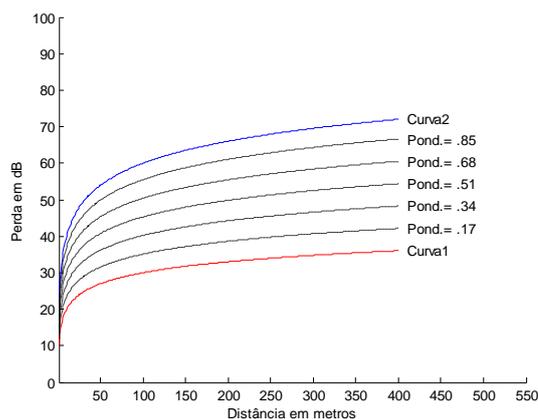


Figura 7.7 - Superfície interpolada, d em escala logarítmica.

O processo adotado parte do pressuposto do aumento da atenuação com a frequência, embora situações anômalas possam ser encontradas em campo, onde curvas obtidas de amostras tomadas em frequências mais altas estejam com menor atenuação devido aos fatores citados nesta seção. Foi escrito um programa em Matlab r11 (apêndice II) para testar o método e sua aplicabilidade até em possíveis casos anômalos, onde são inseridas curvas de teste para verificação e os resultados podem ser vistos abaixo, nas PROVA1 e PROVA2. Nas hipóteses testadas a curva1 representa uma curva de ajuste tomada em frequência mais baixa que a curva2.

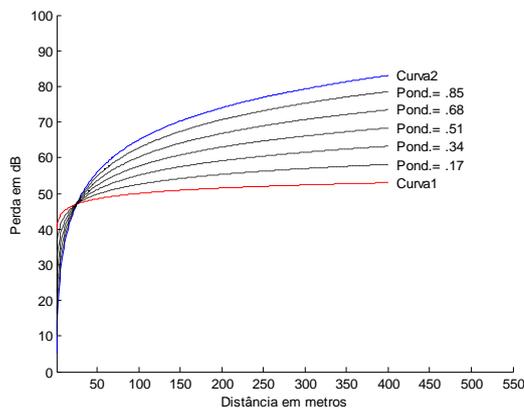
PROVA1: Projeção no plano (L x d) de curvas hipotéticas em conformidade com [36].

$$\text{Hipótese1:} \begin{cases} \text{curva1} = 10 + 10 \log d \\ \text{curva2} = 20 + 20 \log d \end{cases}$$



Nesta hipótese a curva1 tem valores menores de atenuação inicial e *slope* que a curva2.

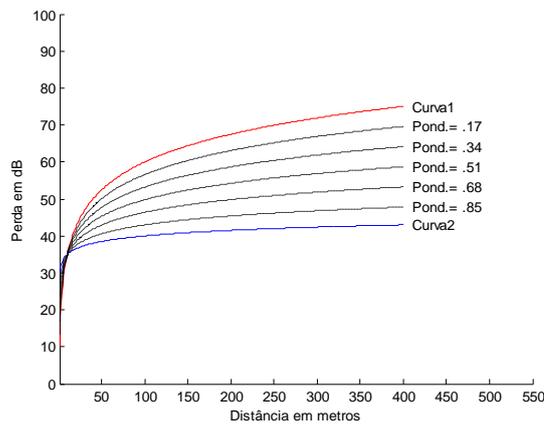
$$\text{Hipótese2:} \begin{cases} \text{curva1} = 40 + 5 \log d \\ \text{curva2} = 10 + 30 \log d \end{cases}$$



Nesta hipótese, a curva1 tem atenuação inicial maior e *slope* menor que a curva2.

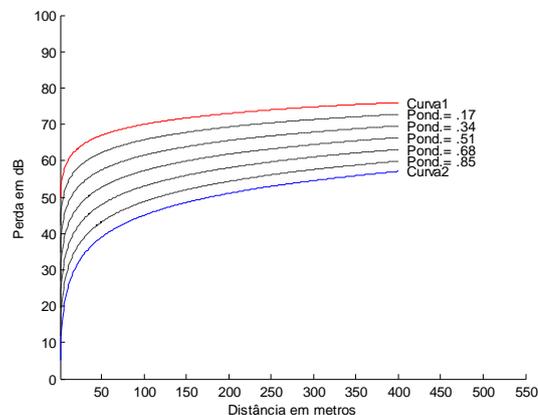
PROVA2: Projeção no plano (L x d) de curvas anômalas segundo o ITU-R [36].

$$\text{Hipótese1: } \begin{cases} \text{curva1} = 10 + 25 \log d \\ \text{curva2} = 30 + 5 \log d \end{cases}$$



Nesta hipótese, a curva1 tem atenuação inicial menor e *slope* maior que a curva2.

$$\text{Hipótese2: } \begin{cases} \text{curva1} = 50 + 10 \log d \\ \text{curva2} = 5 + 20 \log d \end{cases}$$



Neste caso a curva1 possui atenuação inicial maior e *slope* menor que a curva2.

Não foram testadas todas as hipóteses possíveis pelas combinações entre os parâmetros das curvas. Nos casos testados, o método de interpolação apresentou resultados esperados. Este método de interpolação também pode ser aplicado para tornar contínuas as curvas de melhor ajuste nas várias alturas medidas.

Espera-se que o sinal recebido sofra uma perda com a redução da altura de transmissão [36]. E vários modelos de cobertura descritos no capítulo III assinalam essa tendência.

Neste trabalho será avaliada a forma como a variação da altura da antena de transmissão afeta os parâmetros da perda inicial e *slope* de forma a caracterizar seus efeitos empiricamente e acrescentá-los ao modelo final com o uso da interpolação, se necessário.

7.4

Considerações

Um enlace de rádio em ambientes vegetados é sensível a inúmeros fatores. Segundo Dal Bello [3] pode-se afirmar que o maior agente de degradação do sinal transmitido é o desvanecimento por multipercurso.

Além do desvanecimento, tratado no capítulo II, o sinal sofre atenuação com a distância devido ao espalhamento e absorção da energia irradiada. Em medições em campo de espaços vegetados, cada espécime age como um espalhador do sinal que pode mudar ligeiramente de posição por ação do vento.

Tal quadro de aleatoriedade e incoerência, aliados a óbvia dificuldade de se tomar medições necessárias à análise dos dados em condições de estacionariedade, introduzem desafios à modelagem do problema.

Partindo do pressuposto que uma quantidade finita de sinais chega ao receptor em cada instante de tempo, podem-se associar as diferenças de tempo de chegada (retardos) às diferentes posições físicas dos diferentes espalhadores [37].

Supondo que cada sinal que chega ao receptor seja oriundo de apenas um espalhador, pode-se concluir que os espalhadores que provocam o mesmo retardo estão posicionados sobre uma mesma elipsóide de revolução, tal como a figura 7.8.

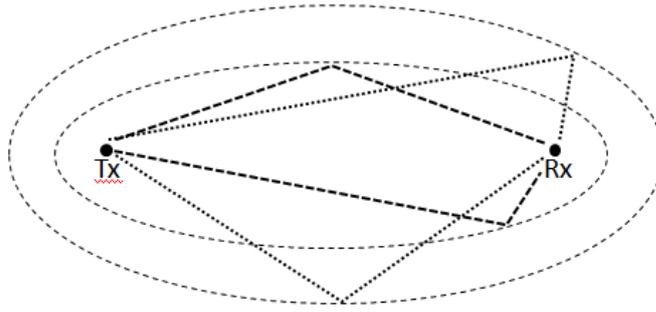


Figura 7.8 - Elipsóide de revolução.

A análise teórica dos canais variantes no tempo é usualmente feita considerando-se duas situações [38]:

- 1) Canais deterministicamente variantes no tempo;
- 2) Canais aleatoriamente variantes no tempo.

Os canais deterministicamente variantes no tempo podem ser entendidos como um filtro, que recebe os sinais, com defasagens e retardos aleatórios e atenuados pelo canal. Pode-se, assim, definir a função que relaciona os sinais de entrada e saída do filtro, no domínio do tempo, conforme a figura 7.9.

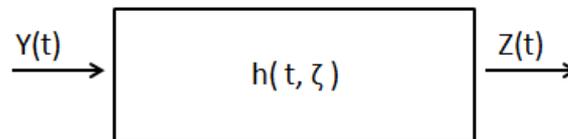


Figura 7.9 - Filtro Representativo.

$Z(t)$ é a resposta a excitação provocada pelo sinal $Y(t)$ e $h(t, \tau)$ é a resposta do canal no instante τ devido a um impulso aplicado em $t - \tau$.

A resposta $Z(t)$ pode ser expressa como:

$$Z(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(t - \tau) h(t, \tau) d\tau \quad (7.6)$$

Na expressão 7.6, $h(t, \tau)$ permite a distinção entre caminhos diferentes e pode-se deduzir que o sinal de saída é produzido por espalhadores individuais, caracterizados pelo seu retardo ($d\tau$).

Em canais aleatórios variáveis no tempo, as funções do sistema são processos estocásticos e para sua caracterização torna-se necessário o prévio conhecimento da função densidade de probabilidade das variáveis pertencentes ao problema.

Comumente, a propagação de uma onda eletromagnética em um ambiente possui comportamento não estacionário e sua caracterização estatística é bastante difícil de obter. Por motivos práticos, é habitual remover-se a não-estacionariedade do processo e analisá-lo separadamente, de tal forma a se obter duas fases distintas para análise. Em uma delas será feita a caracterização em larga escala, onde será analisado o comportamento médio do sinal, e a outra é a caracterização em pequena escala.

Um canal será considerado estacionário se a média do sinal recebido não depender nem do instante de tempo nem da localização e se sua função de autocorrelação for invariante a uma translação no tempo ou distância [3]. Tal assunção implica que em canais estacionários os espalhadores estão descorrelacionados, o que equivale dizer que os sinais espalhados não apresentam qualquer dependência de amplitude uns com os outros.

Possivelmente, em trabalhos deste tipo a forma mais simples de avaliar a estacionariedade de dados aleatórios seja considerar a física do fenômeno que produz os dados [3]. Se os fatores físicos que geram o fenômeno são invariantes no tempo, então, a estacionariedade dos dados obtidos podem ser aceitos sem maiores estudos [3]. Em todo caso, existem premissas que podem ser feitas para assegurar maior estacionariedade nos dados [3]:

- 1) Deve ser assumido que as amostras coletadas refletirão o caráter estacionário ou não, do processo em questão;
- 2) Deve ser assumido que, em estacionariedade, a amostra é bastante grande quando comparada com possíveis componentes não-estacionárias nos dados, assim mitigando a não estacionariedade.

Em todo caso, no presente trabalho optou-se pela análise em larga escala, onde é analisado o comportamento mediano do sinal, e mesmo as amostras tomadas pontualmente em distâncias pré-definidas, constituem-se da média da intensidade do campo no ponto, tomada em um minuto, com taxa de amostra de 100 por segundo, o que perfaz para cada elemento amostrado, 6000 sub-amostras.