
Radiotransmissão - Propagação

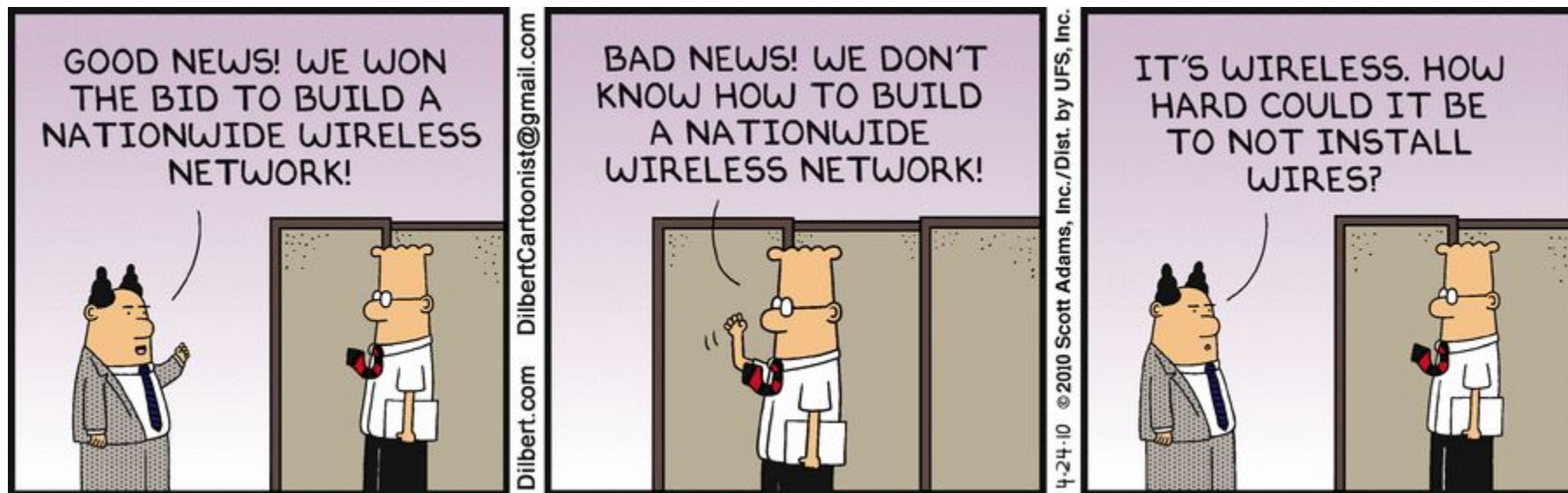
Prof. Ana Negri

ana.negri@ifsc.edu.br

Introdução à Propagação

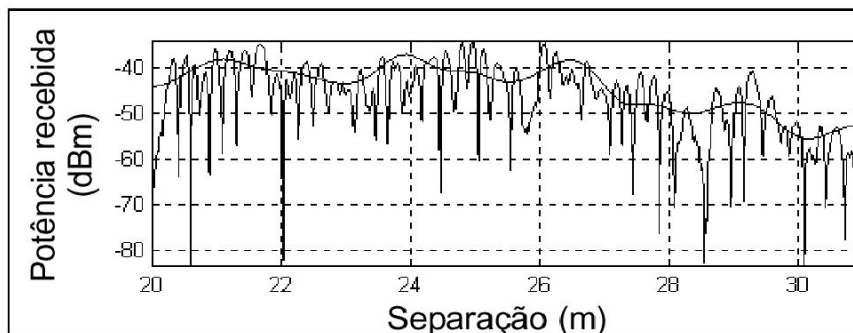
Canal com fio: Estacionário, portanto previsível

Canal sem fio: Aleatório, portanto modelagem complexa



Introdução à Propagação

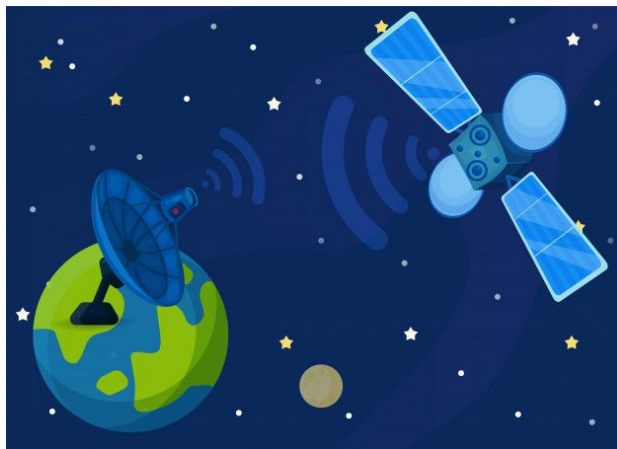
- Preveem a potência média do sinal numa distância de separação arbitrária entre transmissor e receptor (Perda de Percurso).
- Função da topologia (distância, altura, etc), da frequência de portadora, do tipo de ambiente (urbano, rural, etc), etc.
- Modelos exatos e empíricos
- Estes modelos são úteis para se estabelecer a zona de cobertura de um dado sistema de comunicação.
- Em um sistema de comunicação móvel há possibilidade de flutuações rápidas do sinal, dando origem ao *fading*.



Modelos Exatos

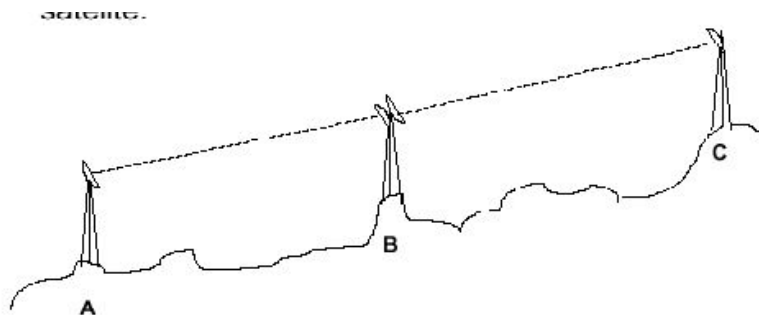
Propagação no Espaço Livre

- Modelo utilizado para predição da potência média do sinal recebido quando não existe obstáculo algum entre a antena transmissora e receptora (nem o chão!)
- Exemplos:
 - Comunicações via Satélite
 - Enlaces de Microondas



Propagação no Espaço Livre - Modelo de Friis

- É o modelo utilizado para prever o sinal recebido quando não há nenhum obstáculo entre o emissor e o receptor.
- É o caso quando há LVD (Linha de Visada Direta) entre emissor e receptor. Ex.: satélites e enlaces de microondas.



Propagação no Espaço Livre - Modelo de Friis

- $P_r(d)$ é a potência recebida em função da distância;
- P_t é a potência transmitida;
- λ é o comprimento de onda do sinal;
- d é a distância T-R (Transmissor-receptor);
- G_t é o ganho do transmissor;
- G_r é o ganho do receptor;
- L representa as perdas.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

Propagação no Espaço Livre - Modelo de Friis

- Perda de percurso

$$L(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} \qquad \frac{P_r}{P_t} = \frac{(4\pi)^2 d^2 L}{G_t G_r \lambda^2}$$

$$L = 32,45 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) - G_t - G_r$$

Propagação no Espaço Livre - Modelo de Friis

- Exemplo 1
- Dados:
 - Potência do transmissor = 50 W
 - Ganho das antenas = $G_t = G_r = 1$ (Isotrópica)
 - Frequência da portadora $f_c = 900\text{MHz}$
- Determinar:
 - Potência do transmissor em dBm e dBW
 - Potência recebida (dBm) para uma distância entre transmissor e receptor de 100m e 10km.

Propagação no Espaço Livre - Modelo de Friis

- Exemplo 1
- Dados:
 - Potência do transmissor = 50 W
 - Ganho das antenas = $G_t = G_r = 1$ (Isotrópica)
 - Frequência da portadora $f_c = 900\text{MHz}$
- Determinar:
 - Potência do transmissor em dBm e dBW
 - Resp.: 47 dBm e 17 dBW
 - Potência recebida (dBm) para uma distância entre transmissor e receptor de 100m e 10km.
 - Resp.: -24,5 dBm e -64,5 dBm

Mecanismos Básicos de Propagação

- Reflexão – Acontece quando a onda incide em uma superfície de dimensões bem maiores do que o seu comprimento de onda. Ocorre em edifícios, paredes
- Difração – Ocorre quando a onda é obstruída por pontas agudas, chamadas de gume de faca, este efeito causa um “curvamento” da onda, fazendo com que ela apareça em pontos fora da linha de visada.
- Espalhamento – Ocorre quando a onda encontra uma superfície cuja irregularidade é da ordem do comprimento de onda da onda incidente. Em meios de comunicação móvel tem-se folhagens, fios, etc.

Reflexão

- Quando uma onda incide na superfície de separação de dois meios com propriedades eletromagnéticas diferentes, parte da onda é refletida para o próprio meio.
- Se os dois meios forem dielétricos perfeitos, não haverá perda de energia e parte da onda será transmitida ao segundo meio.
- Se um deles for condutor perfeito, a onda será completamente refletida.
- O coeficiente de reflexão , depende das características eletromagnéticas dos meios, da polarização da onda eletromagnética incidente, do ângulo de incidência e da frequência da onda incidente.

Reflexão

- Para dois meios com índices de refração iguais a n_1 e n_2 , as leis da reflexão e a lei de Snell da refração nos permitem escrever que:

$$\text{sen } \theta_i = \text{sen } \theta_r \quad \text{e} \quad n_1 \text{sen } \theta_i = n_2 \text{sen } \theta_T$$

- Onde i é o ângulo de incidência; r é o ângulo de reflexão e t é o ângulo de transmissão. Todos medidos em relação à normal à superfície de separação dos dois meios.

Reflexão

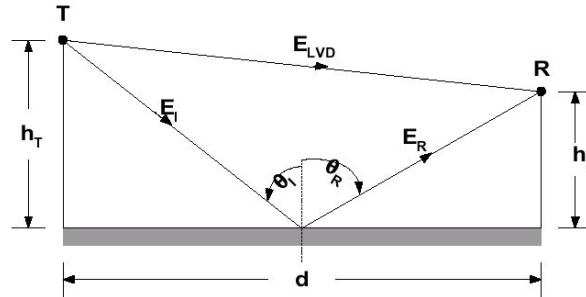
- Se o índice de refração do meio de incidência for maior do que o do meio de transmissão, existe um ângulo crítico, o qual, acima daquele ângulo, tem-se a reflexão total. Este ângulo limite é dado pela expressão:

$$\theta_c = \arcsen\left(\frac{n_{\text{transmissão}}}{n_{\text{incidência}}}\right)$$

- Quando o ângulo de incidência tende a 90° , o solo se torna um refletor perfeito.

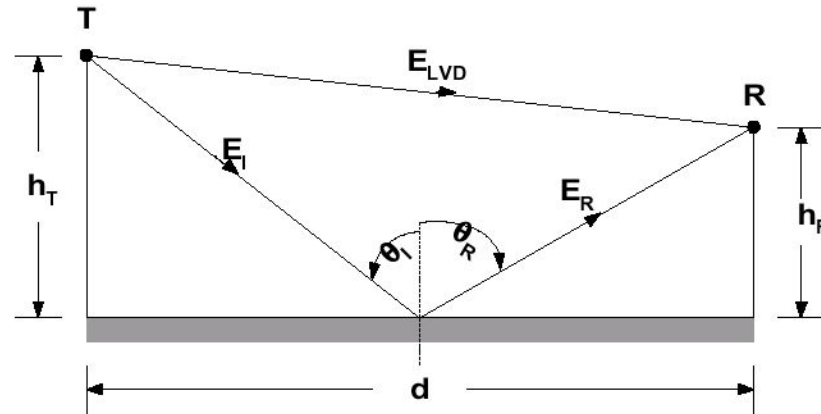
Propagação - Modelo de 2 raios (Reflexão no solo)

- Modelo de reflexão no solo



- O modelo de LVD dificilmente aplica-se em canais de rádio móveis. Neste caso, utiliza-se o modelo de reflexão no solo com dois raios.
- Nestes sistemas, dada a distância, podemos considerar a terra como plana.
- Para obter-se o campo na antena receptora, é importante que se tenha o módulo e a fase. Assim, podemos ter interferências construtivas ou destrutivas entre os raios em LVD e o refletido no solo.

Propagação - Modelo de 2 raios (Reflexão no solo)



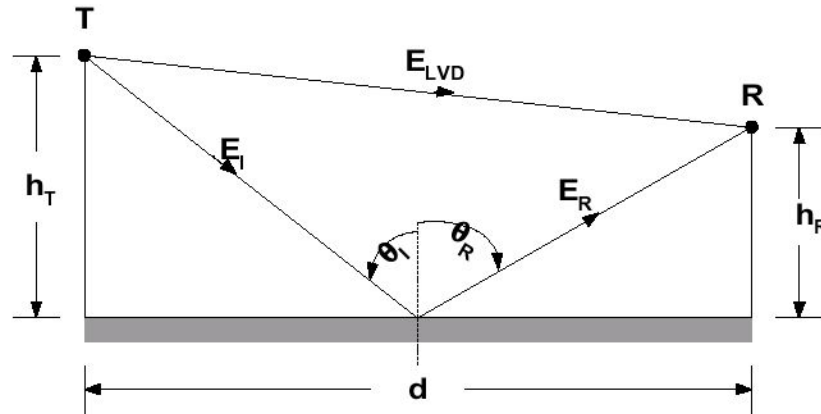
- As distâncias percorridas pelos raios em LVD e refletido são d_d e d_r , respectivamente.
- O campo elétrico no espaço livre é dado por:

$$E(d, t) = \frac{E_o d_o}{d} \cos \left[\omega_p \left(t - \frac{d}{c} \right) \right]$$

- Dois sinais chegam ao receptor, E_d e E_r . O campo elétrico total é dado então por

$$|\vec{E}_t| = |\vec{E}_d + \vec{E}_r|$$

Propagação - Modelo de 2 raios (Reflexão no solo)



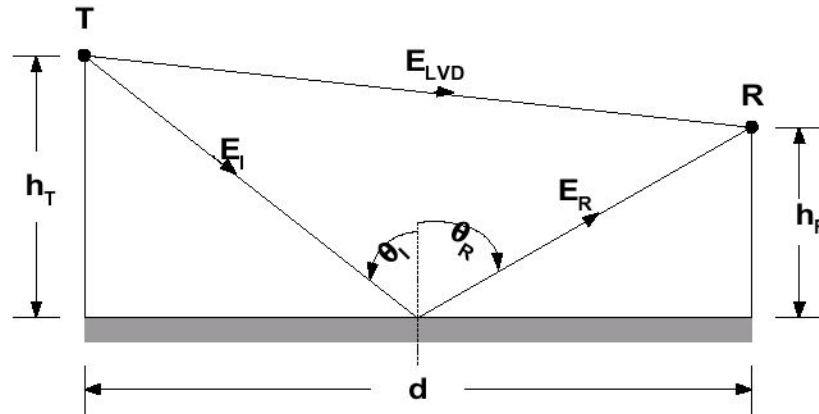
- Potência recebida

$$P_R(d) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}$$

- Perda de propagação

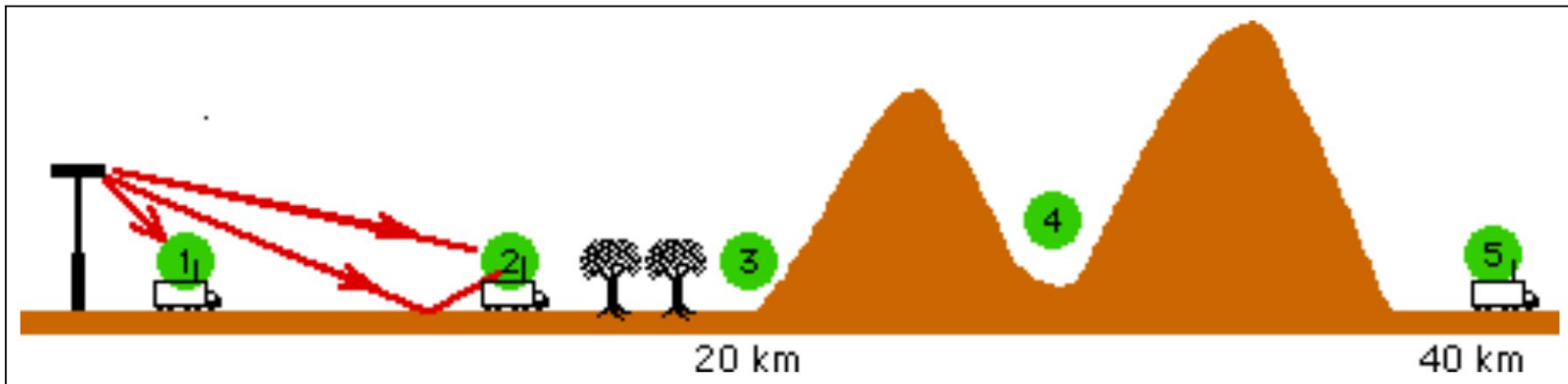
$$PL(dB) = 40 \log(d) - [10 \log(G_t) + 10 \log(G_r) + 20 \log(h_t) + 20 \log(h_r)]$$

Propagação - Modelo de 2 raios (Reflexão no solo)



- Modelo de 2 Raios é independente da frequência quando a distância é grande o suficiente (terra plana!)
- Potência recebida decai com a quarta potência da distância
- Mostra a dependência da perda de percurso com a altura das antenas.

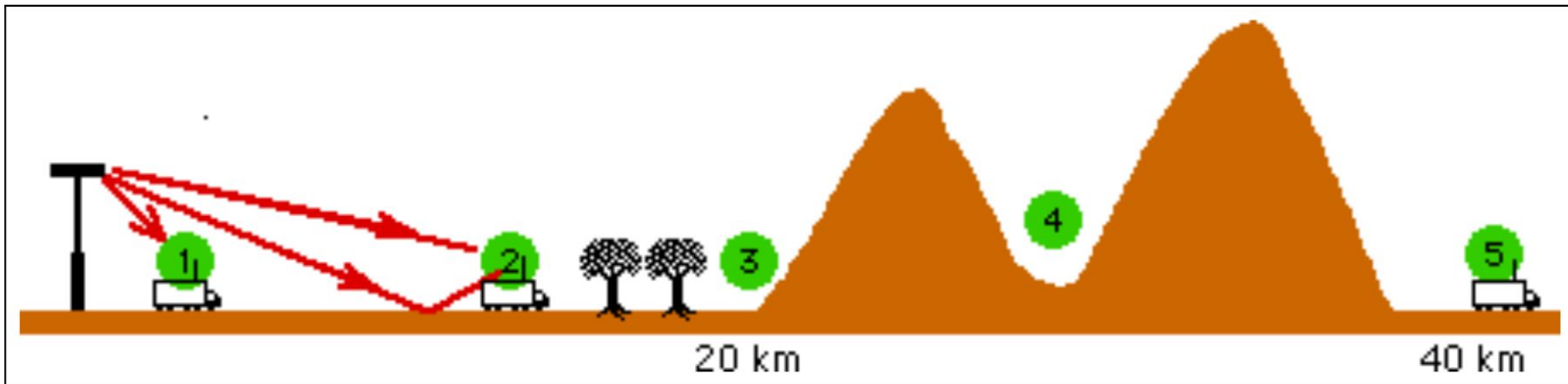
Propagação - Modelos Exatos



Fonte: people.seas.harvard.edu/~jones

- ▶ **Ponto 1:** Modelo do espaço livre provavelmente apresenta uma estimativa precisa da perda de propagação;

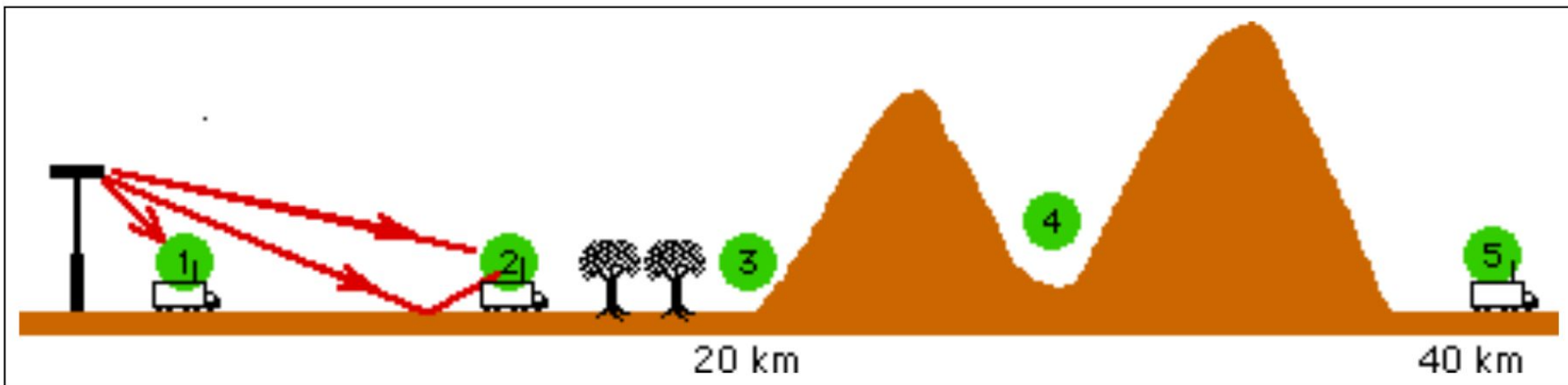
Propagação - Modelos Exatos



Fonte: [people.seas.harvard.edu/jones](http://people.seas.harvard.edu/~jones)

- ▶ **Ponto 2:** Forte LOS, mas reflexões no chão podem influenciar PL. Modelo dos dois raios;

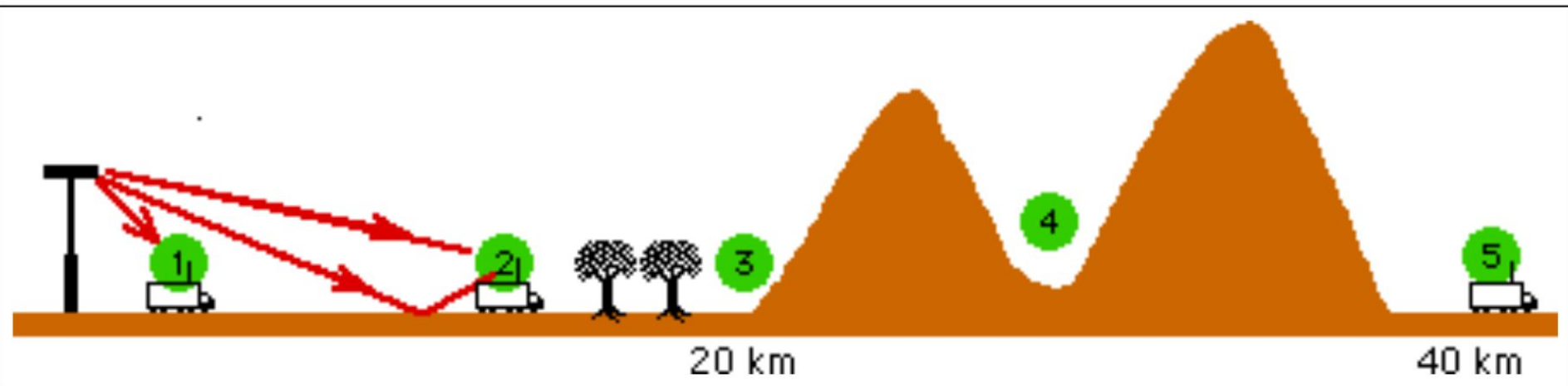
Propagação - Modelos Exatos



Fonte: people.seas.harvard.edu/~jones

- ▶ **Ponto 3:** O modelo dos dois raios precisa ser corrigido incluindo uma perda adicional devido a difração;

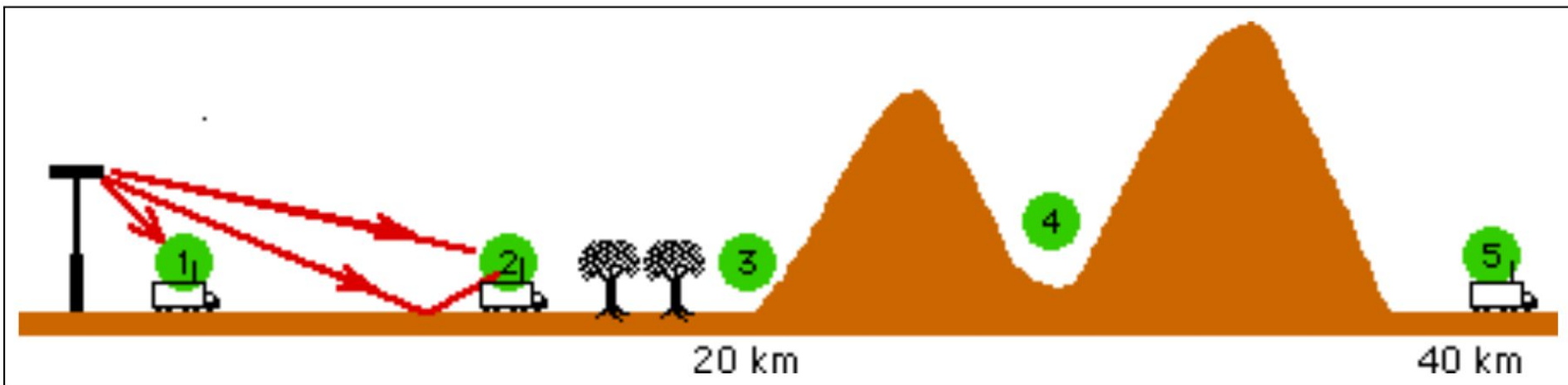
Propagação - Modelos Exatos



Fonte: people.seas.harvard.edu/~jones

- ▶ **Ponto 4:** Espaço livre + perdas por difração provavelmente presente um valor preciso para a perda de propagação;

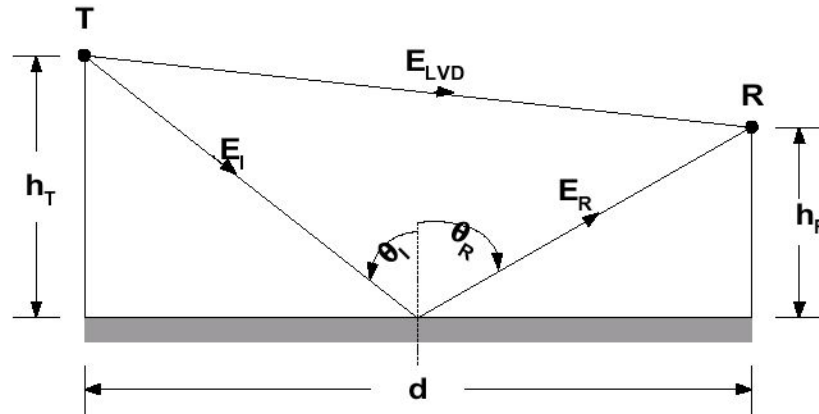
Propagação - Modelos Exatos



Fonte: people.seas.harvard.edu/~jones

- ▶ **Ponto 5:** Previsão de perdas difícil e imprecisa uma vez que múltiplas difrações estão envolvidas.

Propagação - Modelo de 2 raios (Reflexão no solo)



- Um automóvel está localizado a 5 km de uma estação básica e usa uma antena monopolo vertical de $\lambda/4$. A frequência da portadora é 900 MHz.
 - Determine o comprimento de onda e o tamanho da antena receptora
 - Determine a potência recebida pelo veículo considerando o modelo de 2 raios, com reflexão no solo, a altura da antena transmissora de 50 m acima do solo e a antena receptora está 1,5 m acima do solo. O ganho de cada antena é 1,8 (2,55 dBi).

Modelos Empíricos

Modelos Empíricos

- Modelos exatos vistos até agora:
 - a. Propagação espaço livre (modelo de Friis)
 - b. Modelo de 2 raios (reflexão)
- Modelos são baseados em fenômenos físicos
- Muitos difícil criar e analisar um modelo completo

Na prática:

- Modelos empíricos são baseados em medidas.
- Permitem adaptação para diferentes ambientes.

Modelos Empíricos

- Modelo de Okumura
- Modelo de Hata
- Modelo de Log Distância
- Modelo de Log Normal

Na prática:

- Modelos empíricos são baseados em medidas.
- Permitem adaptação para diferentes ambientes.

Modelo de Okumura

- Baseado em medições. Inclui dependência do tipo de terreno, altura de antenas, frequência de portadora, etc.

Perda de Percurso

$$PL(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}$$

Em que

- L_F é a perda no espaço livre;
- $G(h_{te})$ e $G(h_{re})$ dependem das antenas;
- $A_{mu}(f, d)$ e G_{AREA} são obtidos através de gráficos.

Modelo de Okumura

- Baseado em medições. Inclui dependência do tipo de terreno, altura de antenas, frequência de portadora, etc.

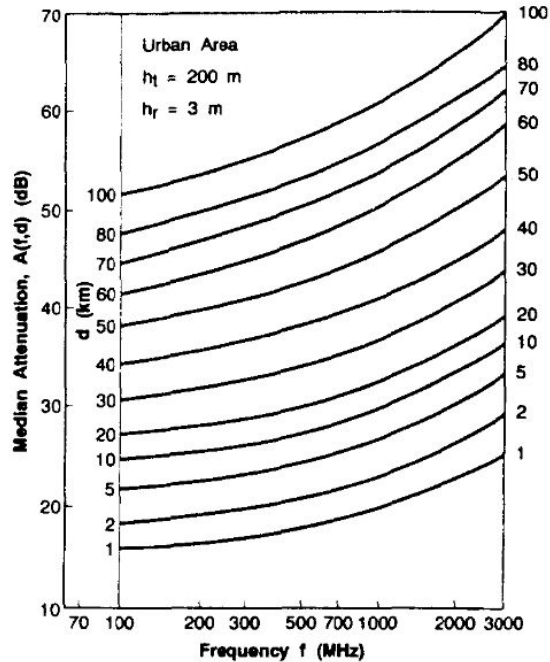
Perda de Percurso

$$PL(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}$$

- Válido para
 - $150 \text{ MHz} < f < 1920 \text{ MHz}$
 - $1 \text{ km} < d < 100 \text{ km}$
 - $30 \text{ m} < h_t < 100 \text{ m}$

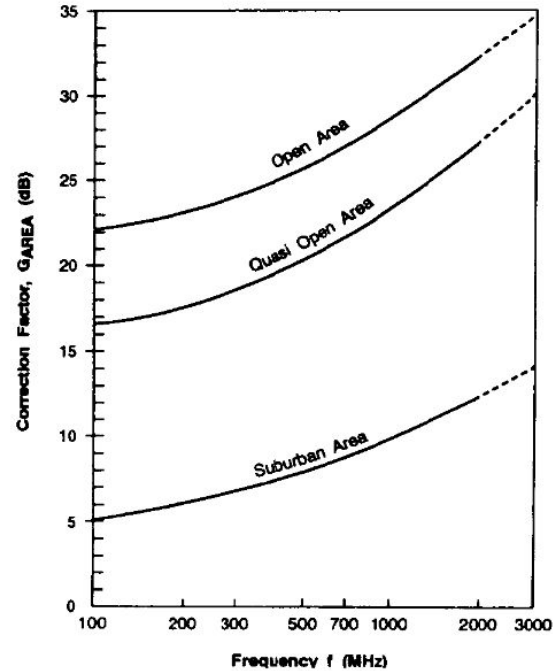
Modelo de Okumura

$$A_{mu}(f, d)$$



Fonte: (Rappaport, 1ed)

$$G_{AREA}$$



Fonte: (Rappaport, 1ed)

Modelo de Hata

- Formulação empírica para o modelo de Okumura

Perda de Percurso

$$PL(dB) = 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_t) - a(h_r) + [44,9 - 6,55 \log(h_t)] \log(d)$$

Em que

- $a(h_r)$ depende do tipo de cidade.

Modelo de Hata

- Formulação empírica para o modelo de Okumura

Perda de Percurso

$$PL(dB) = 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_t) - a(h_r) + [44,9 - 6,55 \log(h_t)] \log(d)$$

Em que

- $a(h_r)$ depende do tipo de cidade.
- Válido para
 - $150 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz}$
 - $30 \text{ m} < h_t < 200 \text{ m}$
 - $1 \text{ m} < h_r < 10 \text{ m}$

Modelo de Hata

- Cidades pequenas e médias:

Cidades pequenas e médias

$$a(h_r) = (1,1 \log(f_c) - 0,7)h_r - (1,56 \log(f_c) - 0,8) [dB]$$

- Cidades grandes (e $f_c > 300$ MHz):

Cidades grandes

$$a(h_r) = 3,2 (\log(11,75 h_r))^2 - 4,97 [dB]$$

Modelo Extendido de Hata

- Muito usado na prática (comunicação celular, UHF)

Perda de percurso

$$PL(dB) = 46,3 + 33,9 \log(f_c) - 13,82 \log(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log(h_t)) \log(d) + C_M$$

Em que

- $a(h_r)$ depende do tipo de cidade, igual ao Hata
- $C_M = 0$ dB (cidades médias ou áreas suburbanas)
- $C_M = 3$ dB (centros metropolitanos)

Válido para

- $1500 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$
- $30 \text{ m} < h_t < 200 \text{ m}$
- $1 \text{ m} < h_r < 10 \text{ m}$
- $1 \text{ km} < d < 20 \text{ km}$

Modelo Log Distância

- Modelo simples que representa a essência da propagação de sinal

Potência recebida

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left[\frac{d_0}{d} \right]^n$$

Em que

- D_0 é a distância de referência
- $Pr(d_0)$ é a potência recebida na distância d_0
- n é o expoente de perda de propagação (pode seguir tabela ou ser determinado através de medições)

Modelo Log Distância

- Quando não é previamente conhecido, o valor de $Pr(d_0)$ pode ser calculado utilizando o modelo do espaço livre, assumindo uma distância que faça sentido:

Perda de percurso

$$PL(d_0) - P_t[dB] - P_r(d_0)[dB] = -20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)$$

- n depende do ambiente de propagação

Ambiente	n
Macro células (urbano)	3,7 - 6,5
Micro células (urbano)	2,7 - 3,5
Prédio comercial (mesmo andar)	1,6 - 3,5
Prédio comercial (múltiplos andares)	2,0 - 6,0
Fábrica	1,6 - 3,3
Residência	3,0

Modelo Log Distância

- Considere o conjunto de medidas de P_r/P_t abaixo, obtidas em um sistema indoor operando em 900 MHz. Assuma $n = 3,71$, $d_0 = 1$ m e $P_r(d_0)$ sendo determinado de acordo com o modelo do espaço livre. Encontre $P_r(d = 150$ m) de acordo com o modelo obtido, $P_t = 5$ dBm.

i	d_i	$M_{\text{medido}}(d_i) = P_r(d_i)/P_t$
1	10 m	-70 dB
2	20 m	-75 dB
3	50 m	-90 dB
4	100 m	-110 dB
5	300 m	-125 dB

Modelo Log Distância

- As medidas reais diferem do modelo. Esta variação pode ser atribuída ao efeitos de sombreamento.
- O expoente de perda de percurso em ambientes indoor pode variar muito devido ao efeitos de lajes, paredes, grandes objetos...
- O expoente de perda de percurso tende a ser mais alto em altas frequências e menor para maiores alturas de antena.
- Os pontos acima podem ser incluídos no modelo para diminuir as variações, mas ao preço de deixá-lo mais complicado e menos genérico.

Modelo Log Normal

- Leva em consideração o efeito do sombreamento:

Perda de percurso

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log \left[\frac{d}{d_0} \right] + X$$

Em que X é uma variável aleatória Gaussiana de média zero e variância σ_X^2 .