

---

# Radiotransmissão - Propagação

---

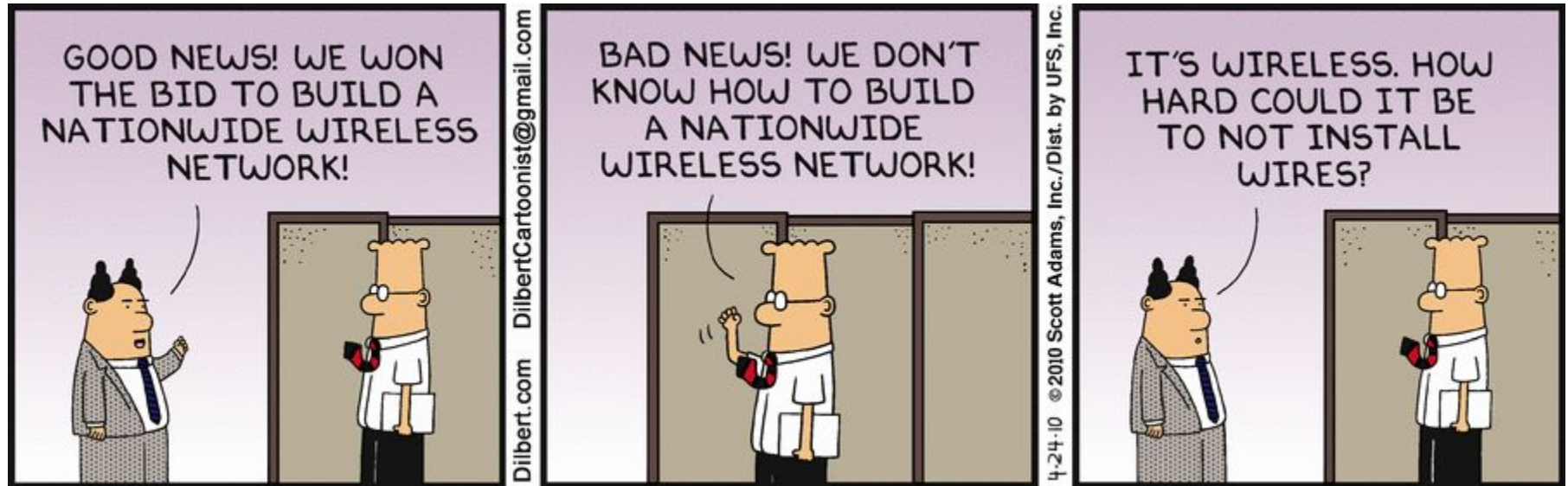
**Prof. Ana Negri**

ana.negri@ifsc.edu.br

## Introdução à Propagação

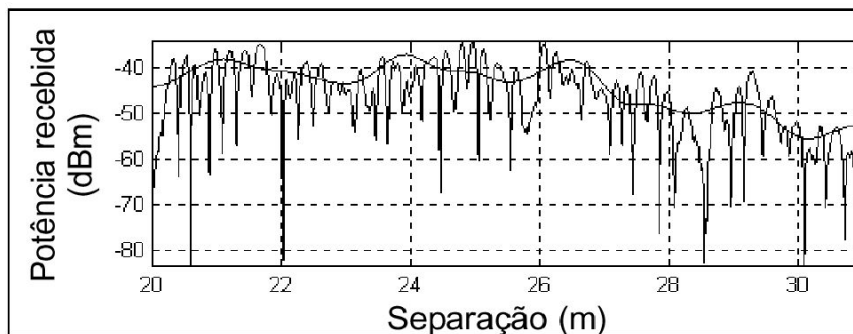
**Canal com fio:** Estacionário, portanto previsível

**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

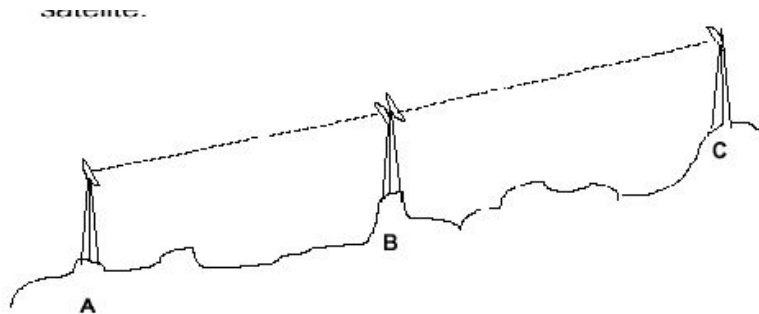
## Propagação no Espaço Livre

- 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;
- $\lambda$  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

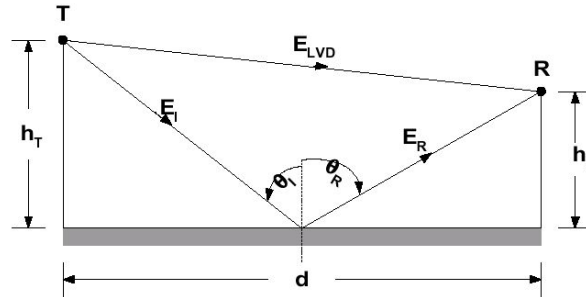
- Se o índice de refração do meio de incidência for maior do que o do meio de transmissão, existe um ângulo crítico, o qual, acima daquele ângulo, tem-se a reflexão total. Este ângulo limite é dado pela expressão:

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

- Quando o ângulo de incidência tende a  $90^\circ$ , o solo se torna um refletor perfeito.

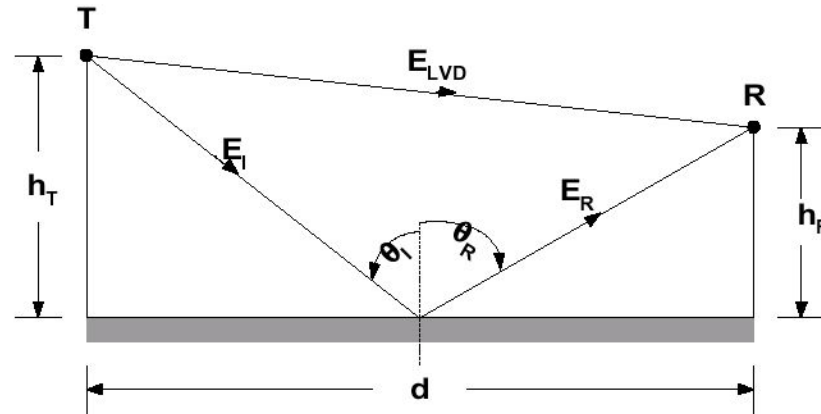
## Propagação - Modelo de 2 raios (Reflexão no solo)

- 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:

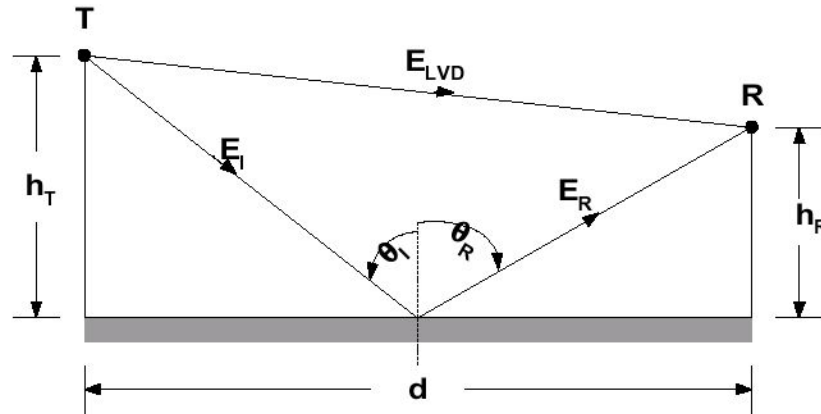
$$E(d,t) = \frac{E_o d_o}{d} \cos \left[ \omega_p \left( t - \frac{d}{c} \right) \right]$$

- 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)



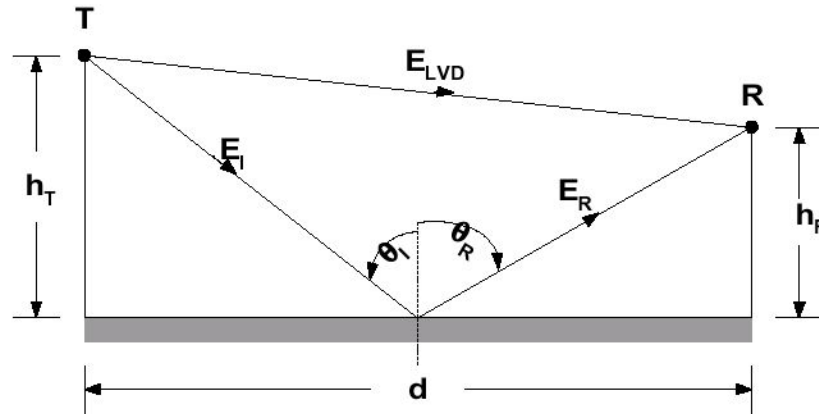
- Potência recebida

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

- Perda de propagação

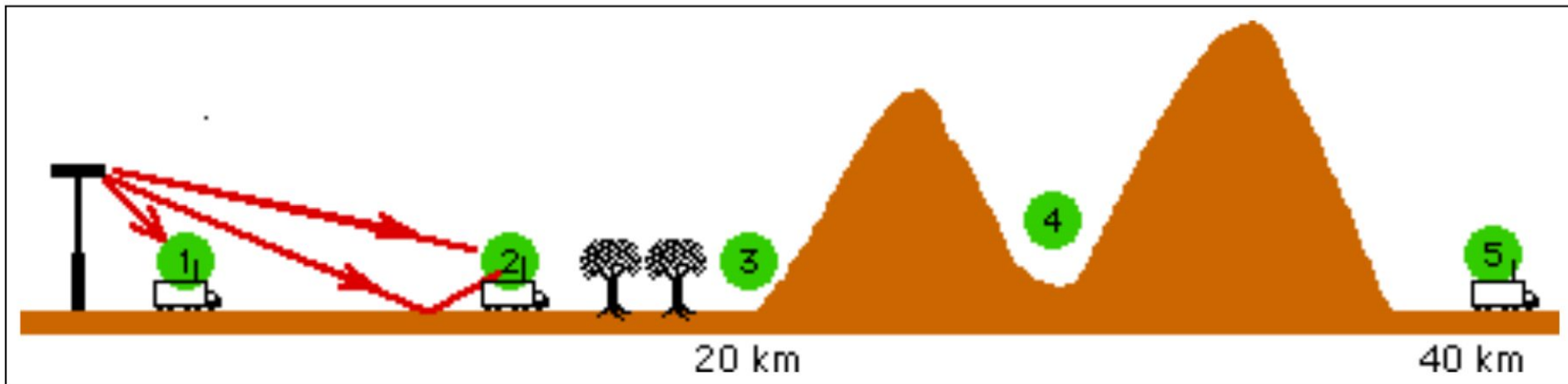
$$PL(dB) = 40 \log(d) - [10 \log(G_t) + 10 \log(G_r) + 20 \log(h_t) + 20 \log(h_r)]$$

## 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.

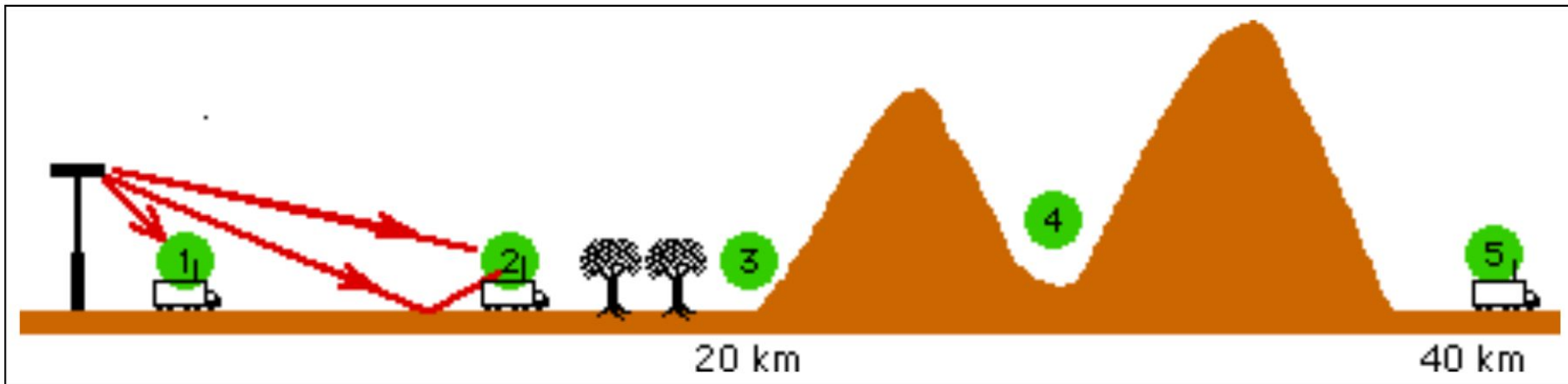
## Propagação - Modelos Exatos



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

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

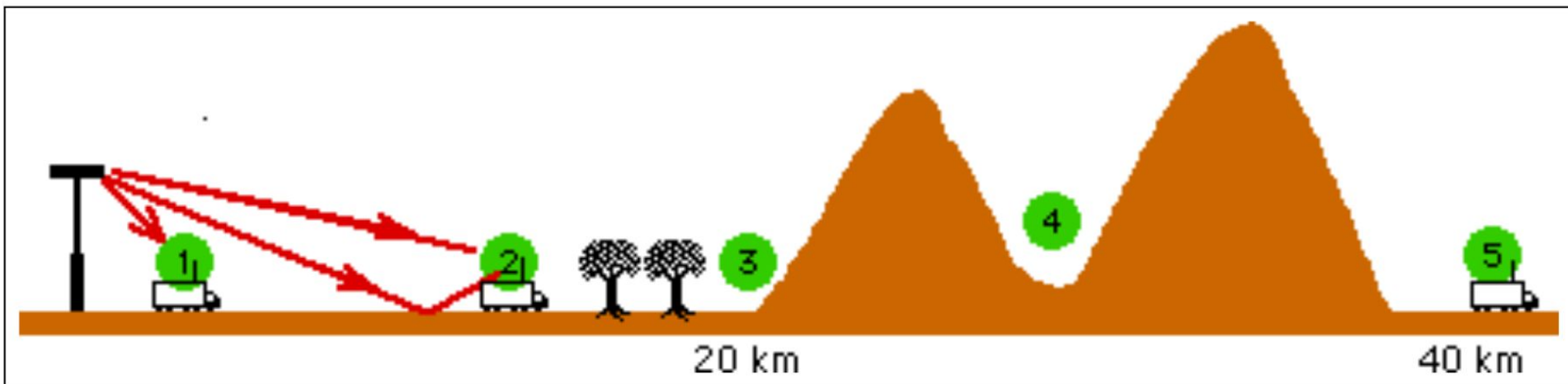
## Propagação - Modelos Exatos



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;

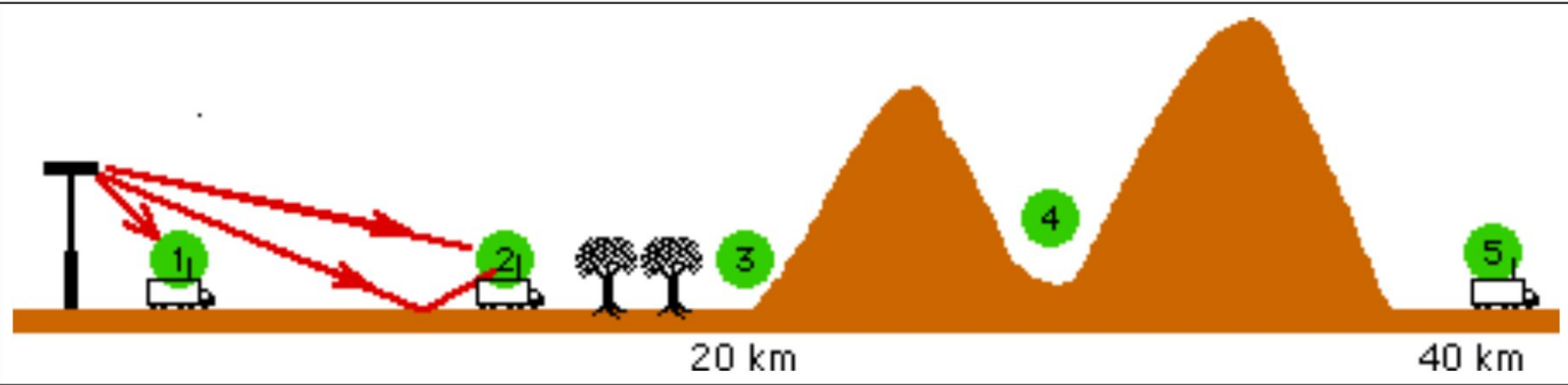
## Propagação - Modelos Exatos



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

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

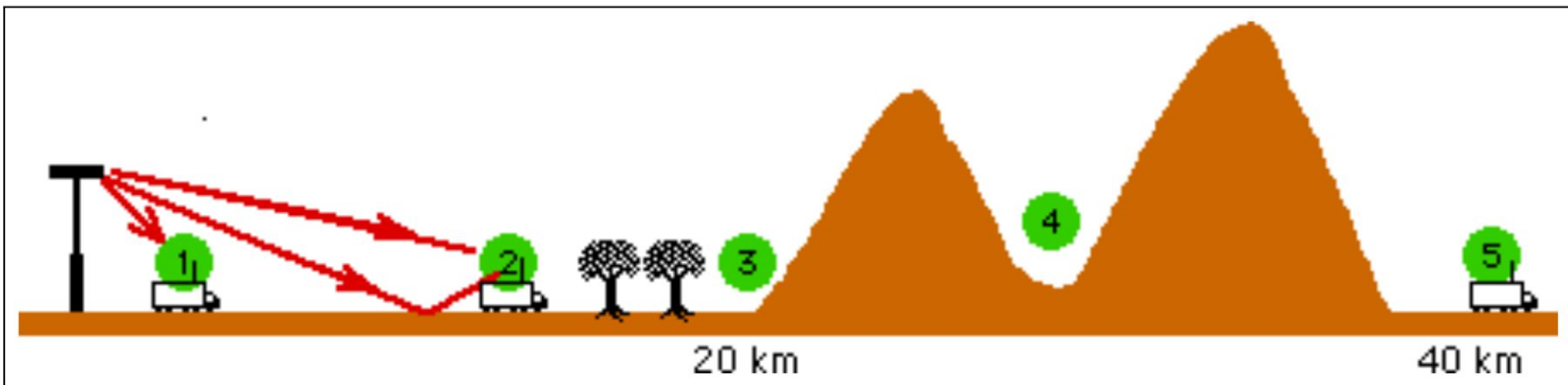
## Propagação - Modelos Exatos



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

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

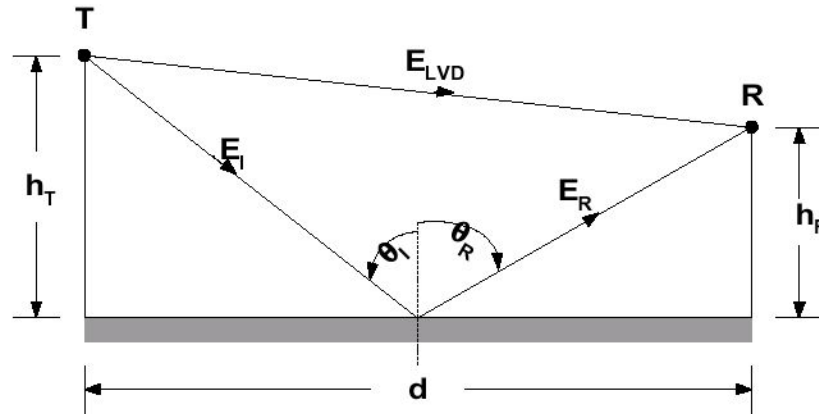
## Propagação - Modelos Exatos



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

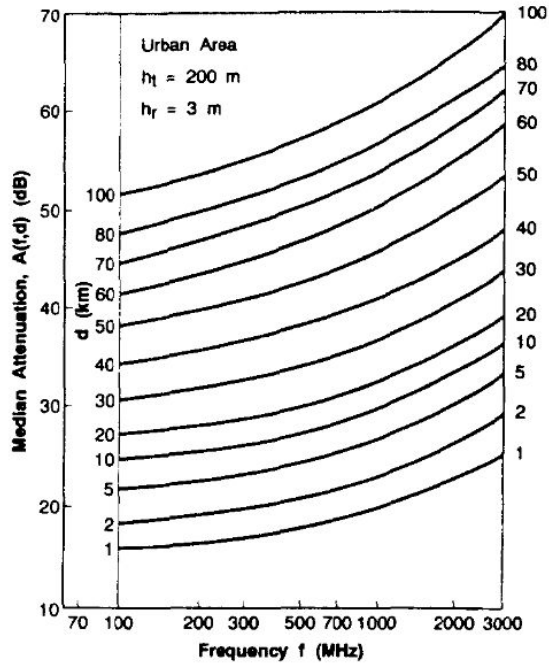
### Perda de Percurso

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

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

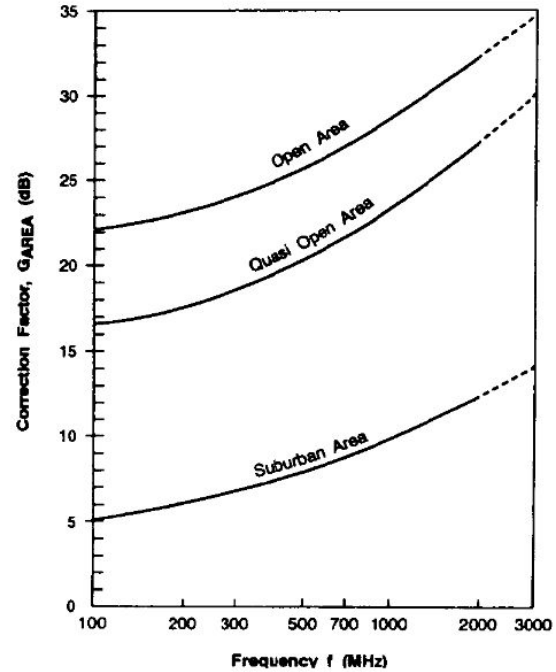
# Modelo de Okumura

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



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  $\sigma_X^2$ .