

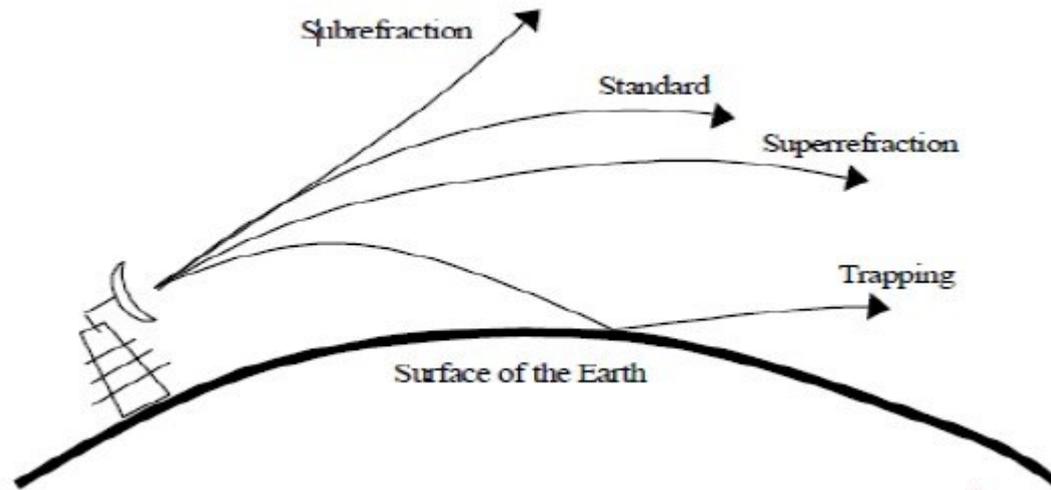
Rádio-Propagação

Ewaldo Luiz de Mattos Mehl

Universidade Federal do Paraná

Departamento de Engenharia Elétrica

mehl@ufpr.br

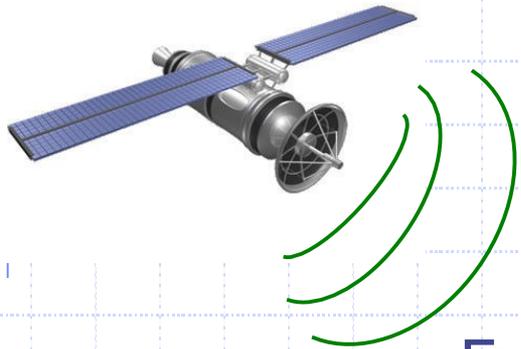


Rádio-Propagação

Agenda

- Perda no Espaço Livre
- Refração na atmosfera e Fator K
- Círculos de Fresnel e Zona de Fresnel
- Desobstrução da 1ª Zona de Fresnel
- Influência das alturas das antenas
- Cálculo simplificado de perdas

Perda no Espaço Livre



$$L_{fs} = 20 \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} [L_{fs}] = \text{dB} \\ [d] = \text{m} \\ [\lambda] = \text{m} \end{array} \right\}$$

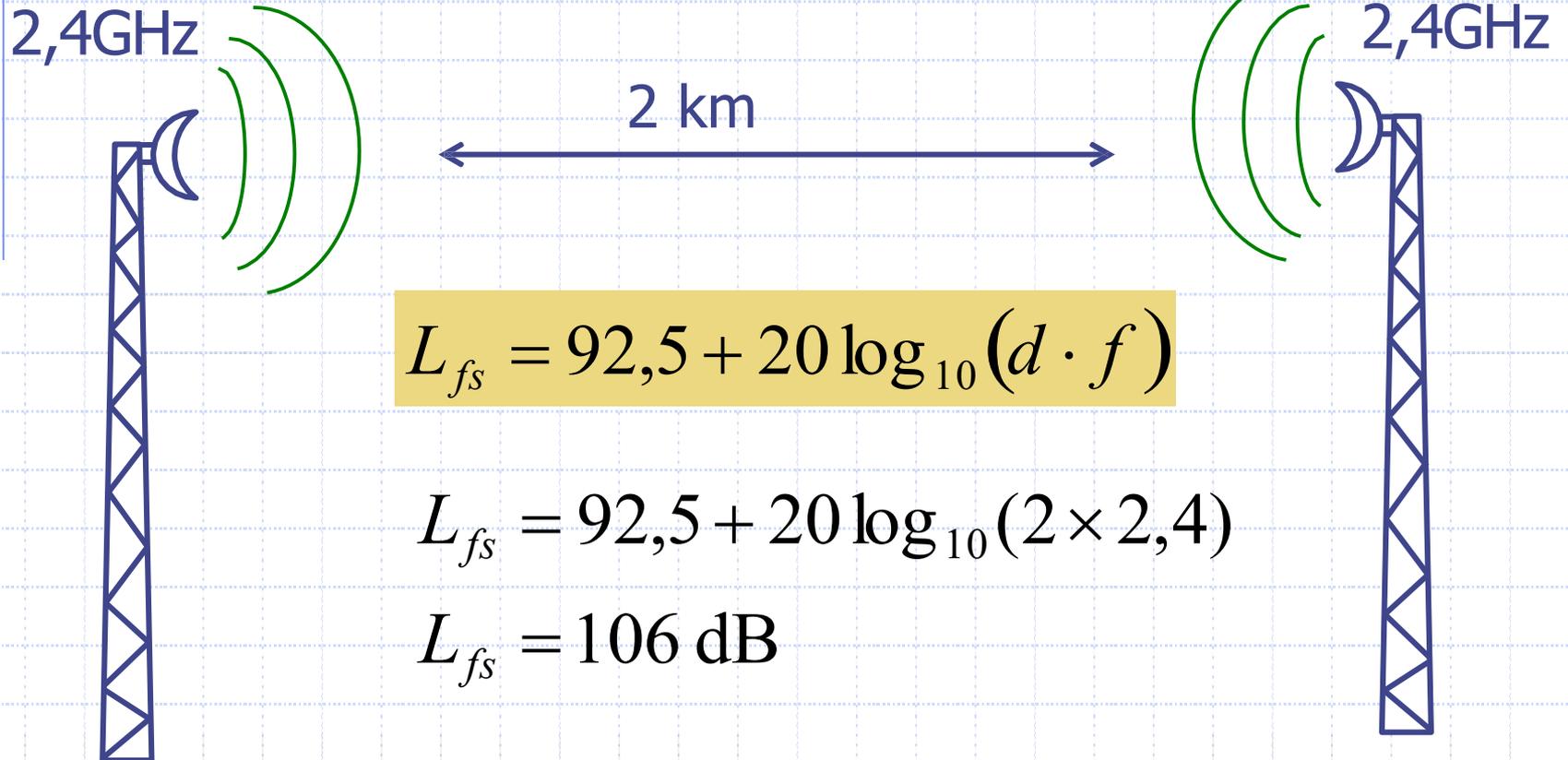
Expressão prática:

$$\left. \begin{array}{l} [L_{fs}] = \text{dB} \\ [d] = \text{km} \\ [f] = \text{GHz} \end{array} \right\}$$

$$L_{fs} = 92,5 + 20 \log_{10} (d \cdot f)$$



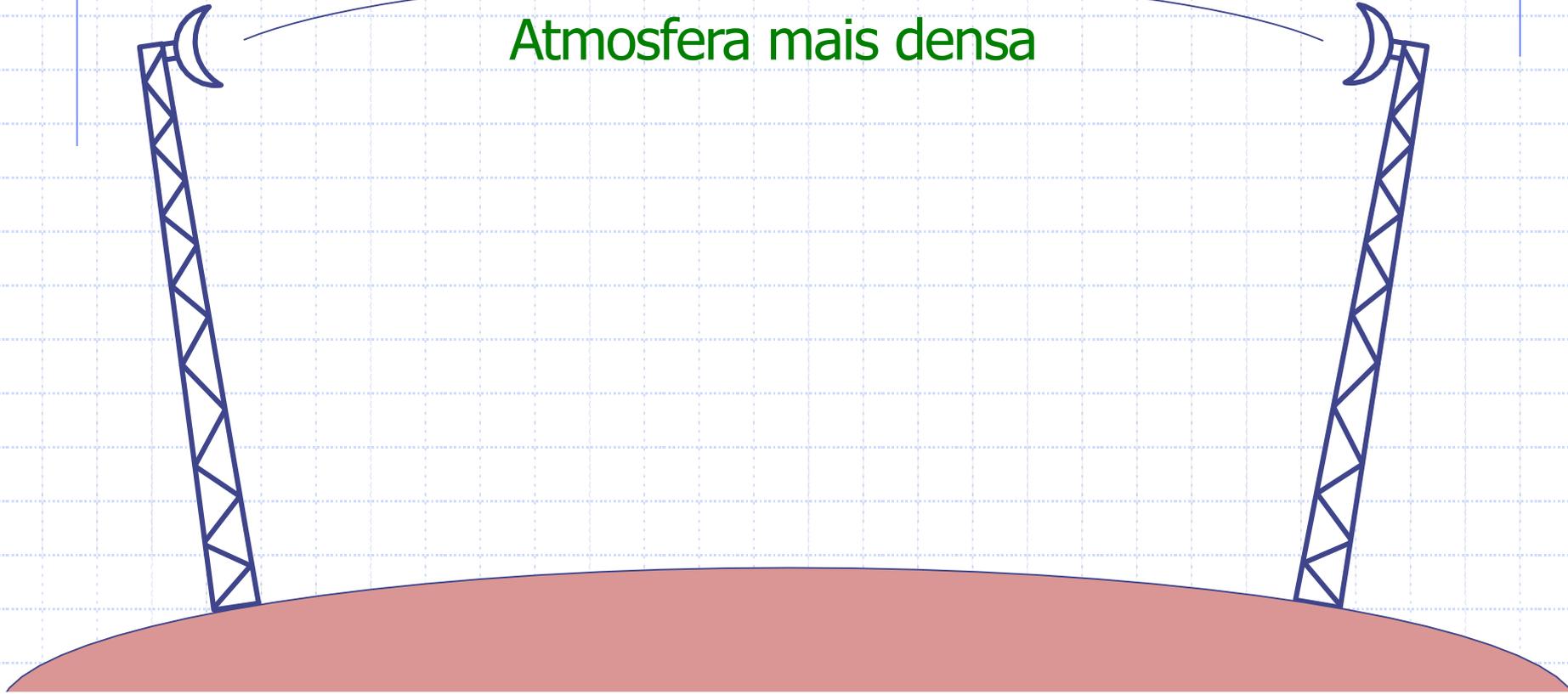
Perda no Espaço Livre



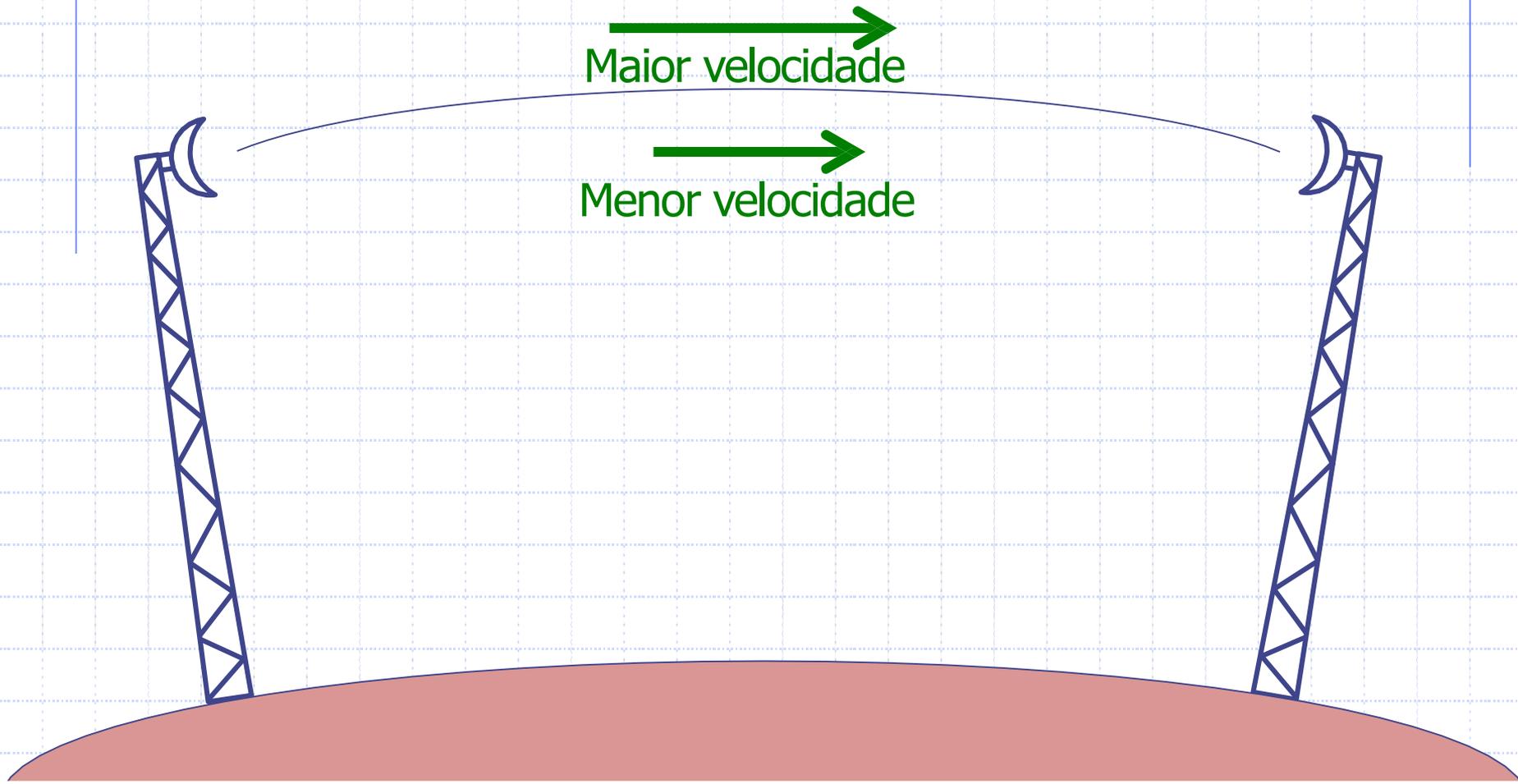
Refração na Atmosfera

Atmosfera menos densa

Atmosfera mais densa



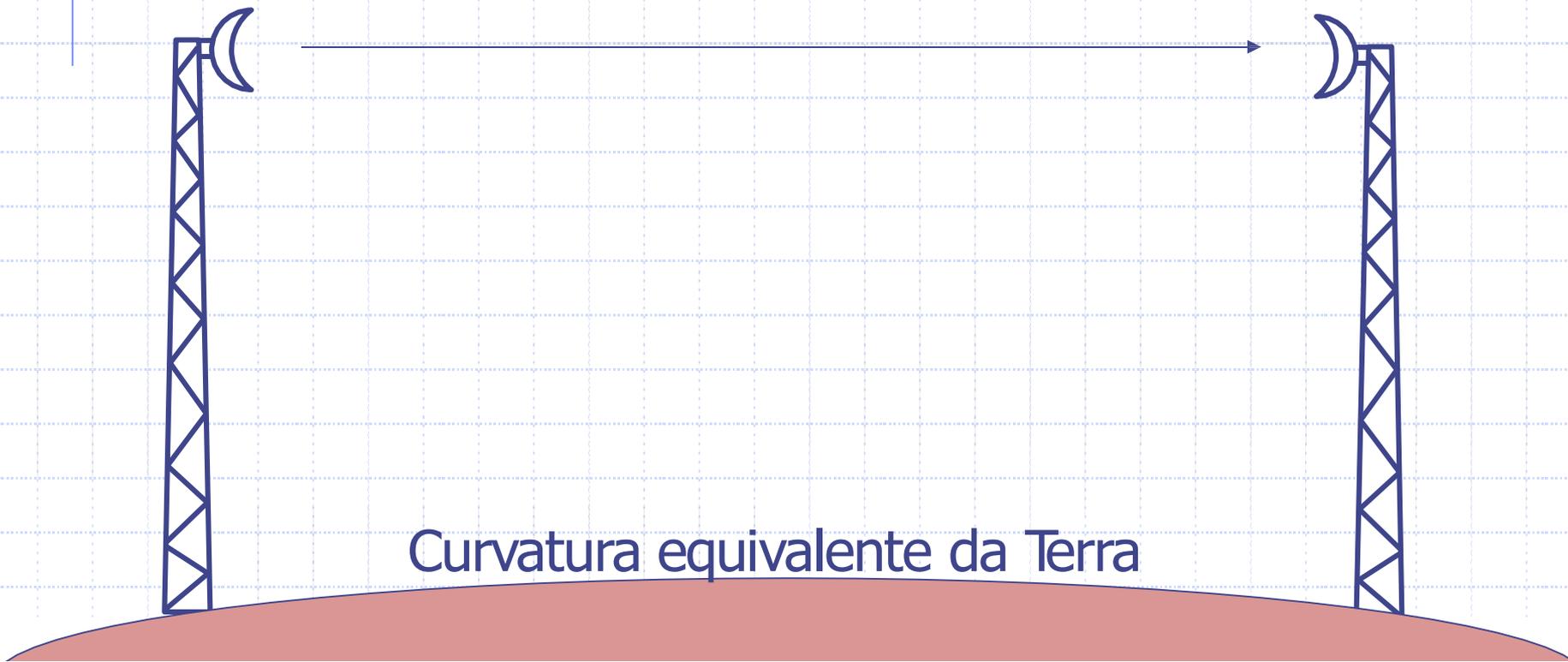
Refração na Atmosfera



Refração na Atmosfera

Simplificação:

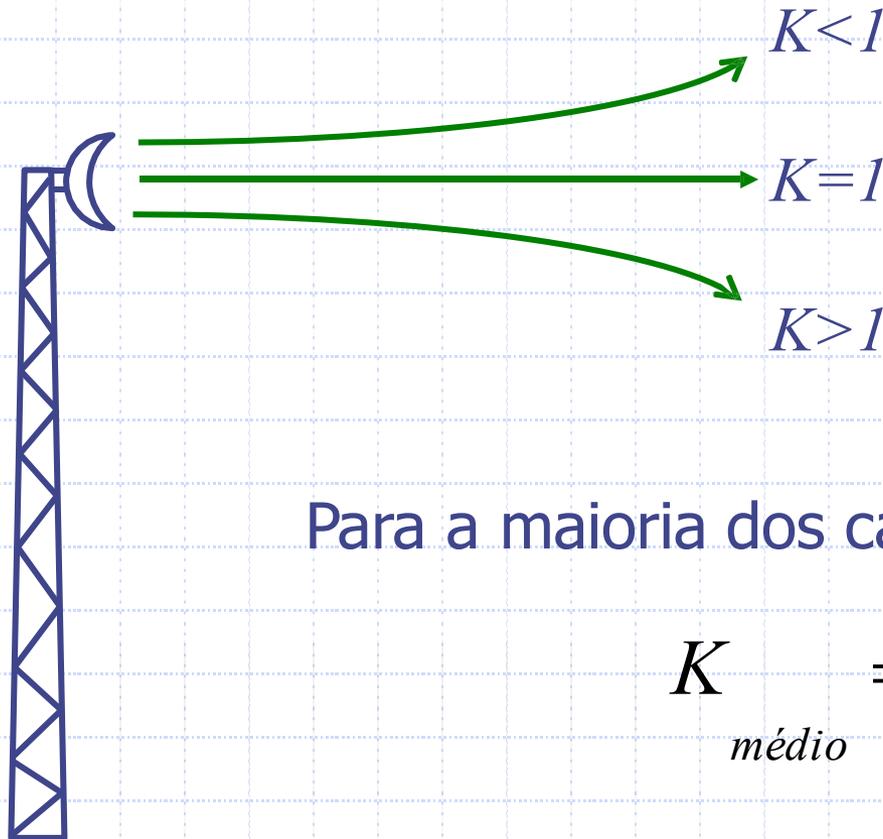
- Considerar trajeto reto do feixe de rádio
- Considerar a curvatura da Terra diminuída ou aumentada



Fator K

a = raio da terra = $6,37 \times 10^6$

$\frac{dn}{dh}$ = gradiente vertical do índice de refração



$$K = \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dh}}$$

Para a maioria dos casos adota-se

$$K_{\text{médio}} = \frac{4}{3} = 1,3333$$

Fator $K_{\text{mínimo}}$

- Sub-refração: em algumas condições atmosféricas ocorre um gradiente de refração MENOR QUE 1.
- Cálculo para a pior condição: $K_{\text{mínimo}}$



$K_{\text{mínimo}} < 1$

O valor de $K_{\text{mínimo}}$ depende das condições atmosféricas!

Recomendação P-530 do ITU-R
(International Telecommunication
Union – Radiocommunication Bureau)

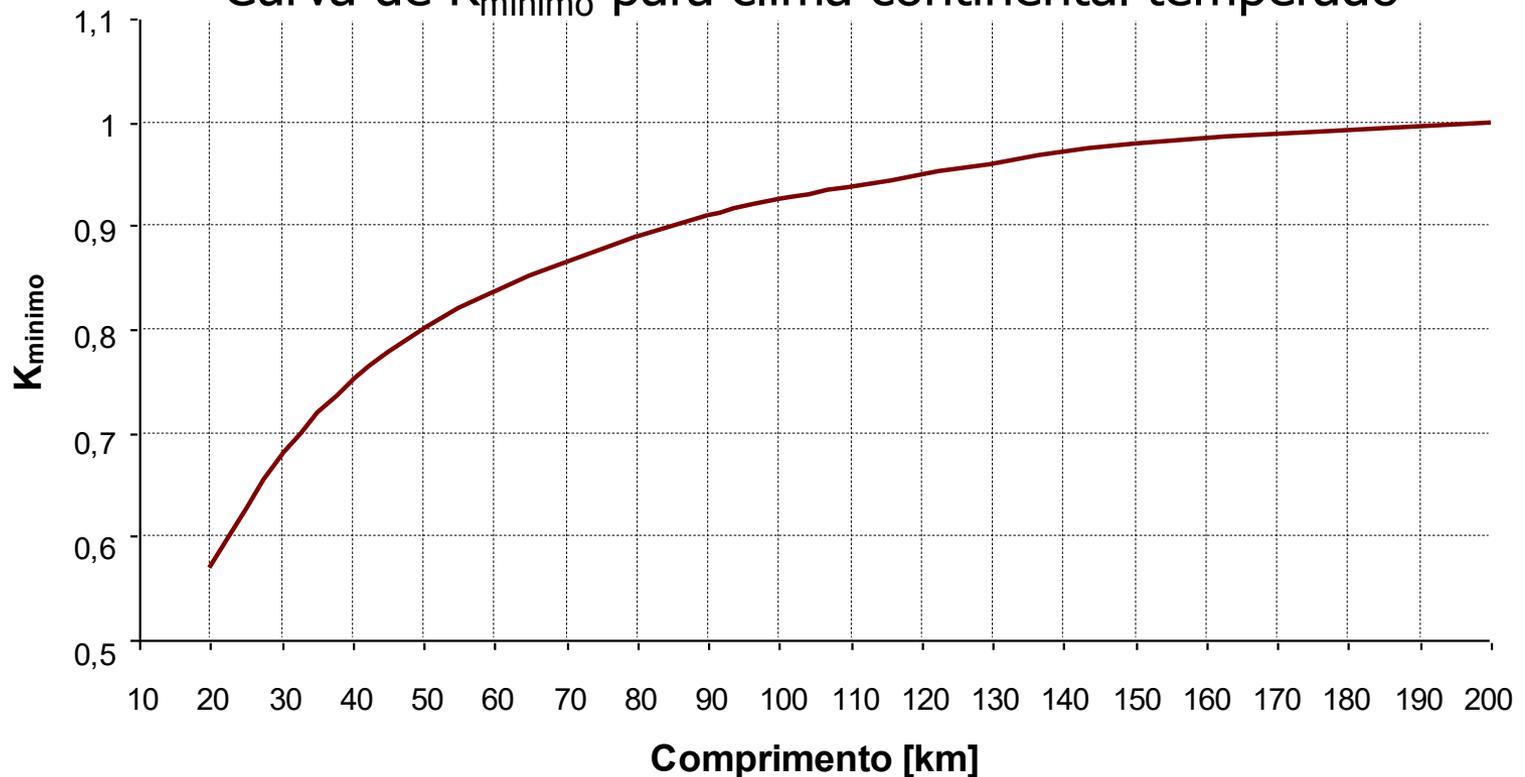


Fator $K_{\text{mínimo}}$



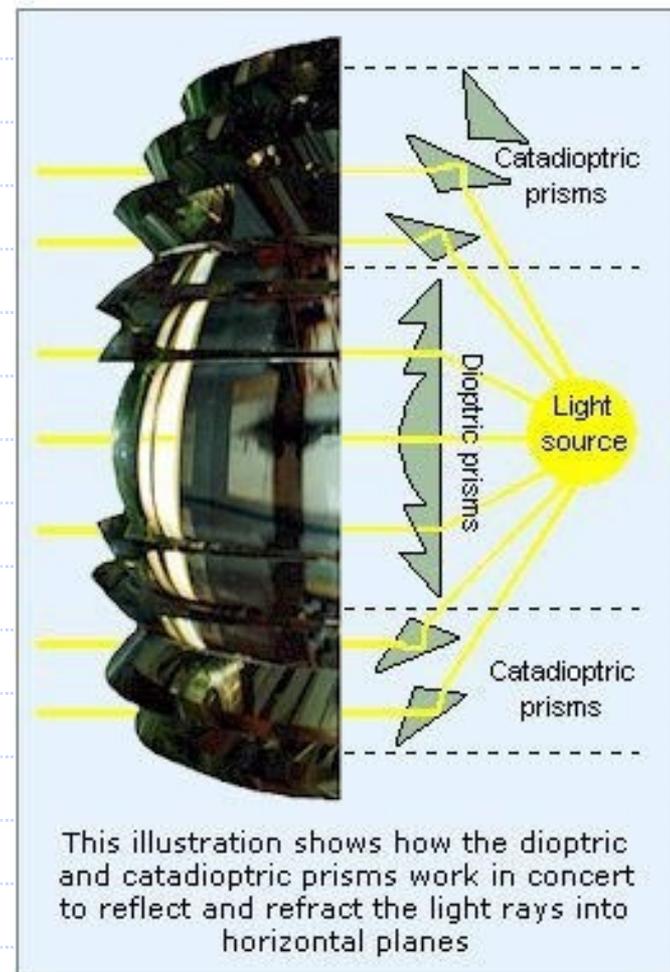
ITU-R – Documento ref. P530-11:
Propagation data and prediction methods required
for the design of terrestrial line-of-sight systems

Curva de $K_{\text{mínimo}}$ para clima continental temperado



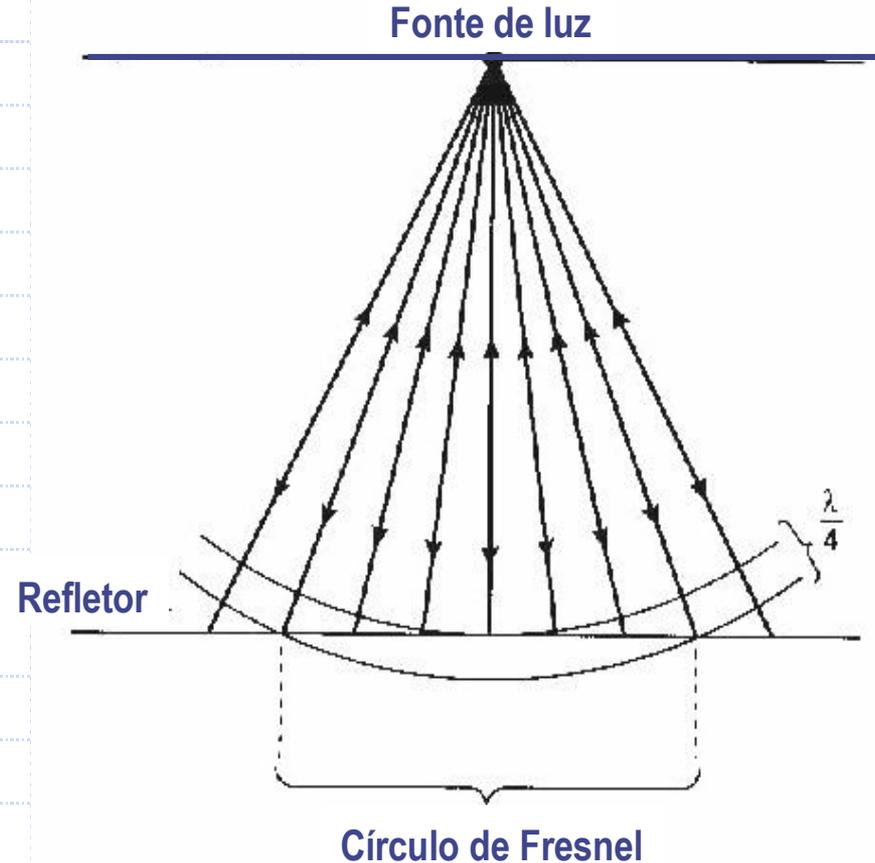
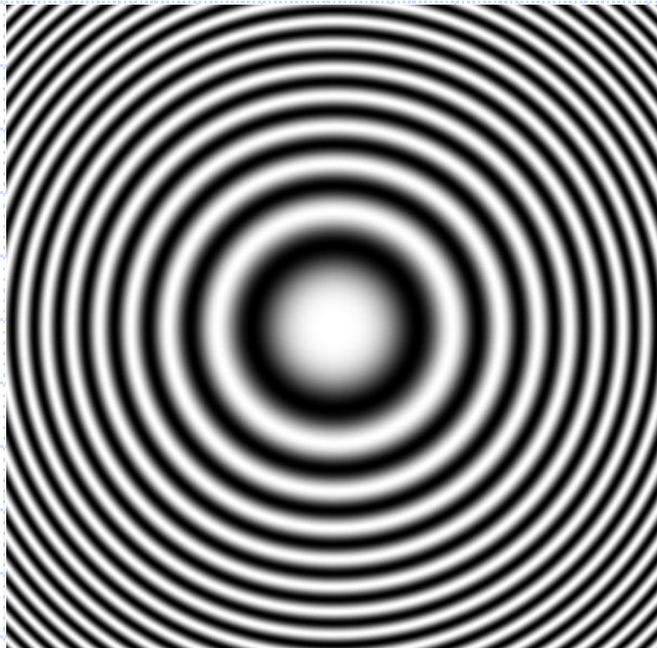
Augustin-Jean Fresnel

- 10 de maio de 1788 – 14 de julho de 1827



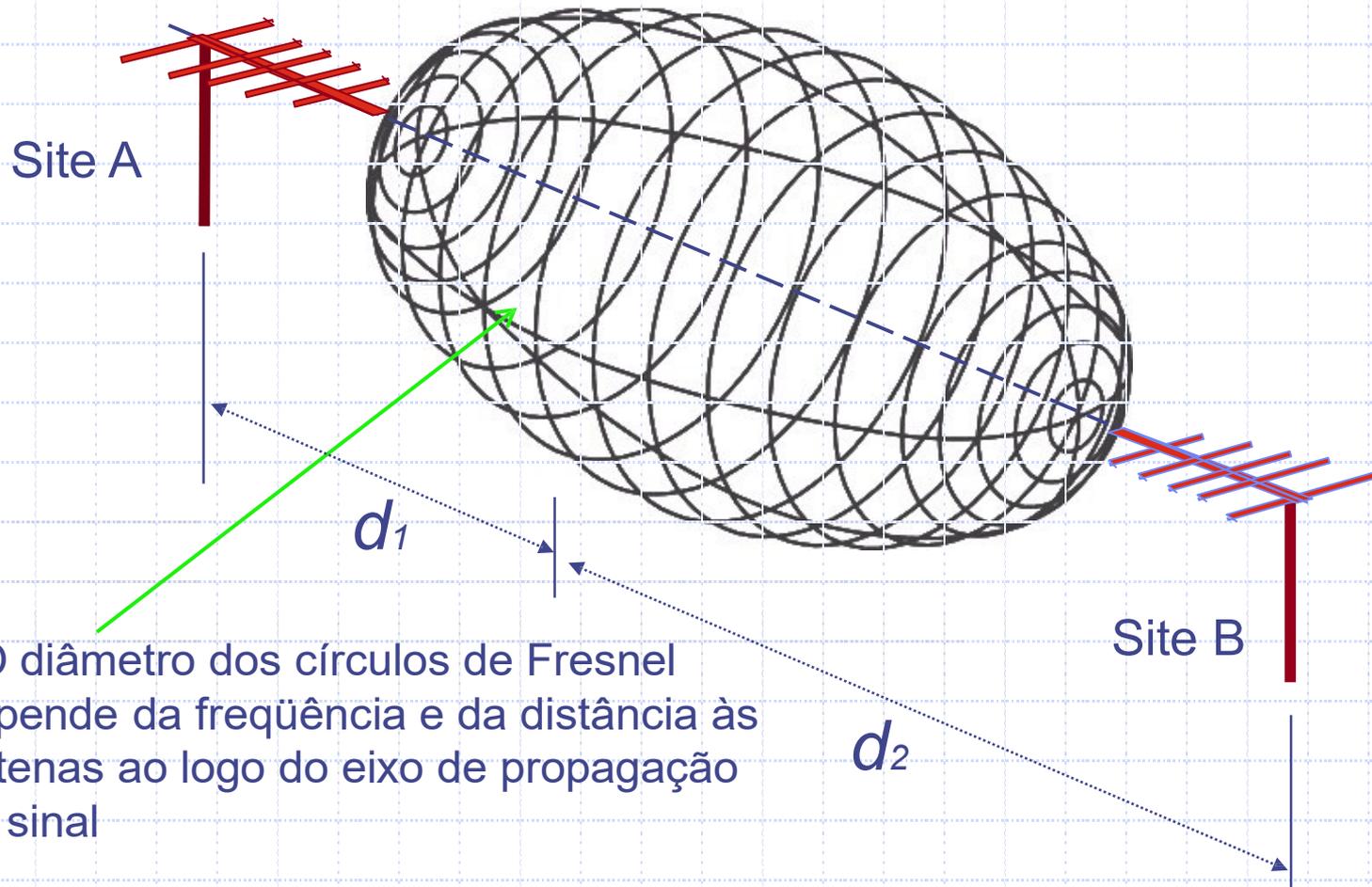
Círculos de Fresnel

- Observando um feixe de luz que passava por um orifício, Fresnel notou a formação de círculos concêntricos claros/escuros que foram chamados **Círculos de Fresnel**.



Círculos de Fresnel em Sinais de Rádio

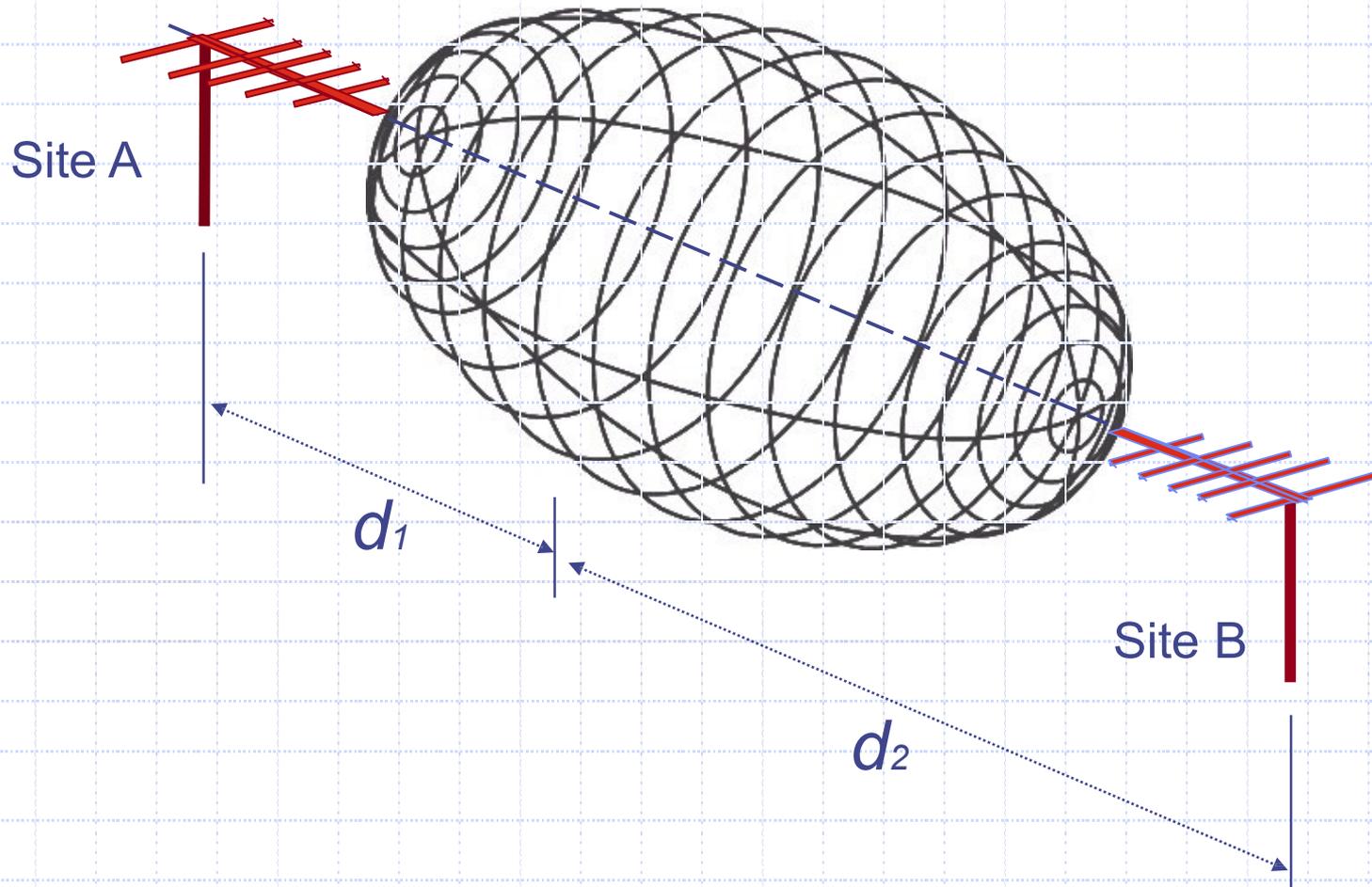
- A propagação da “frente de onda” forma círculos concêntricos chamados **Círculos de Fresnel**.



- O diâmetro dos círculos de Fresnel depende da frequência e da distância às antenas ao longo do eixo de propagação do sinal

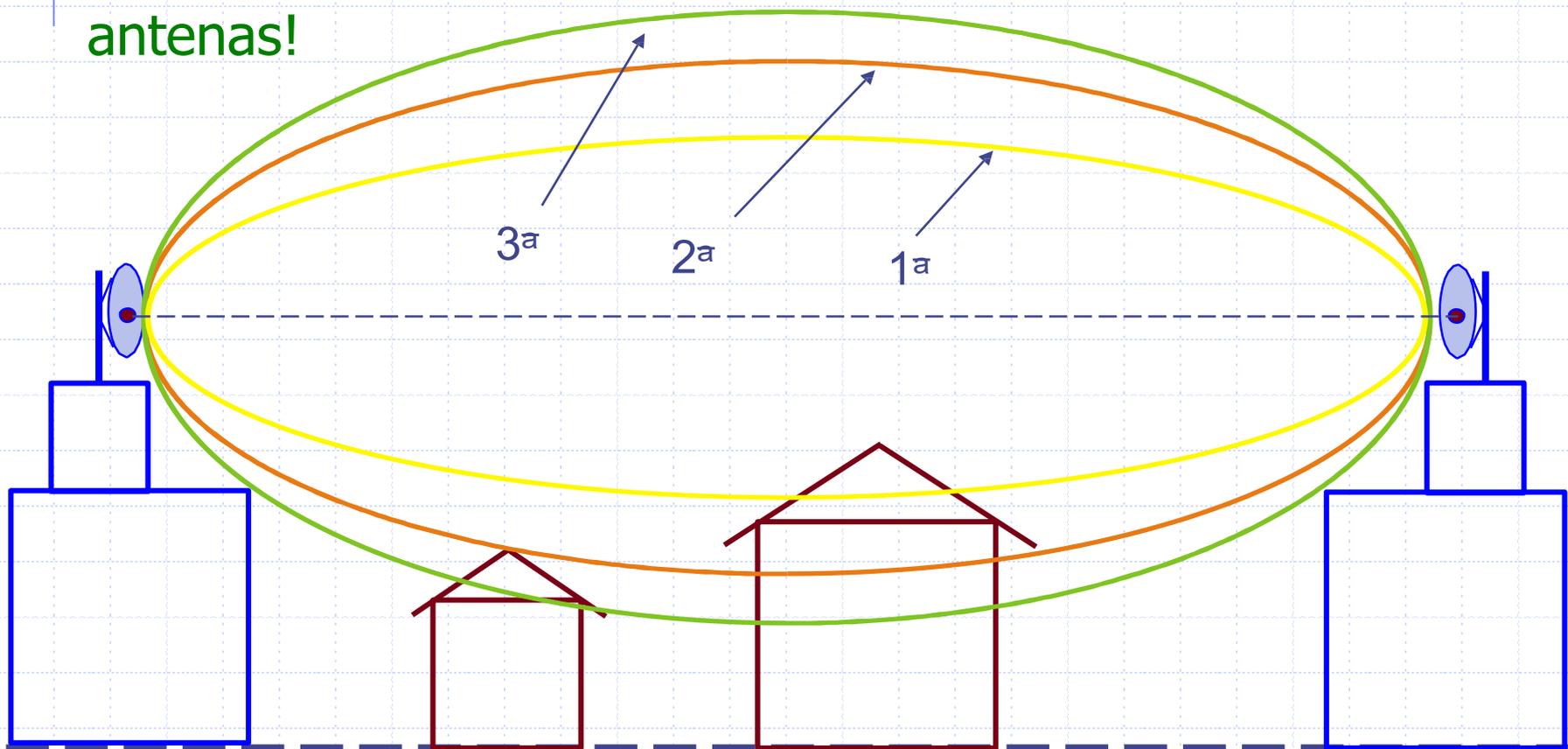
Elipsóide de Fresnel

- O lugar geométrico dos diversos Círculos de Fresnel forma um **elipsóide de revolução**.



Zonas de Fresnel

- Cada conjunto de círculos de Fresnel forma um elipsóide de revolução que, em corte, é semelhante a uma elipse.
- Experimentos demonstram que a **1ª Zona de Fresnel** concentra **50% da potência** transmitida entre as duas antenas!



1ª Zona de Fresnel

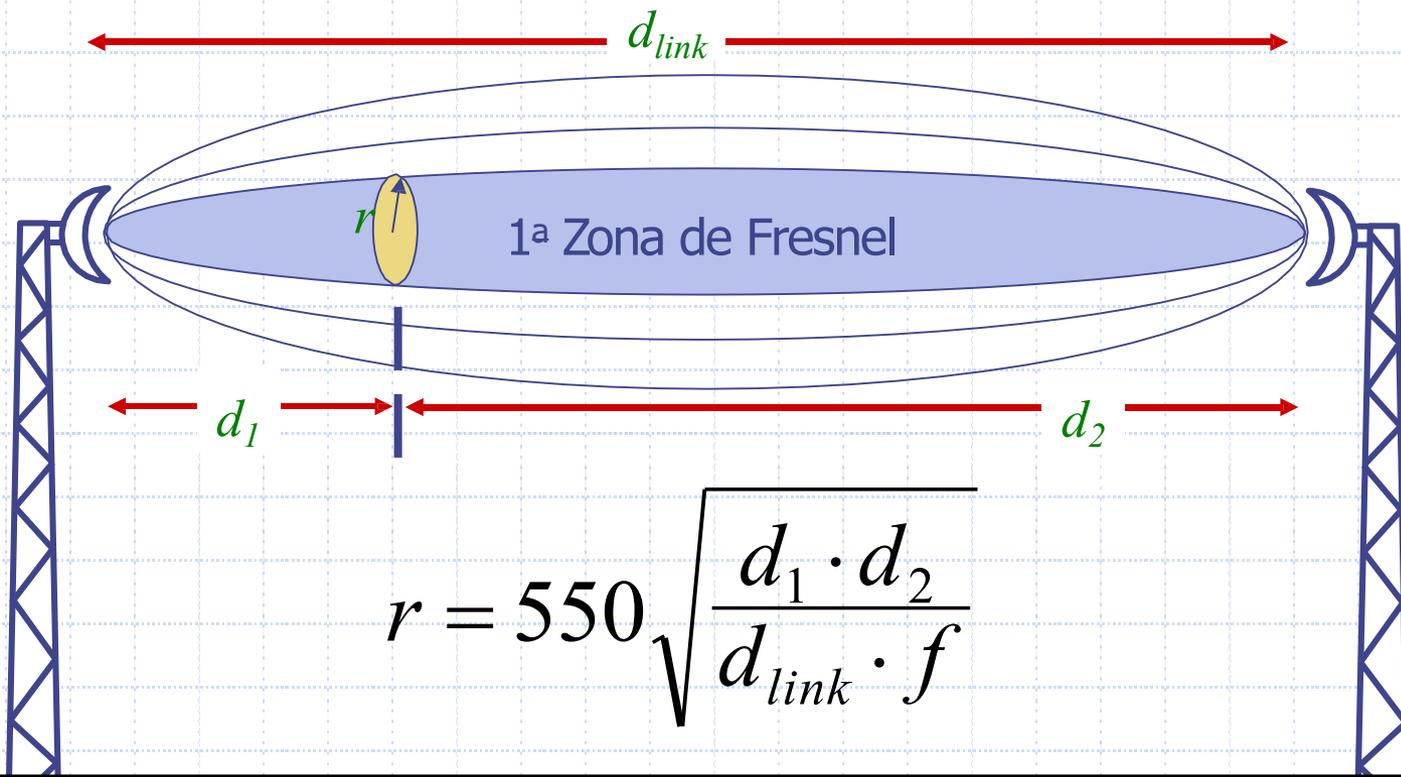
r = raio da 1ª Zona de Fresnel a uma certa distância da antena [m]

d_{link} = distância total do link de rádio (km)

d_1 = distância da antena 1 até o obstáculo (km)

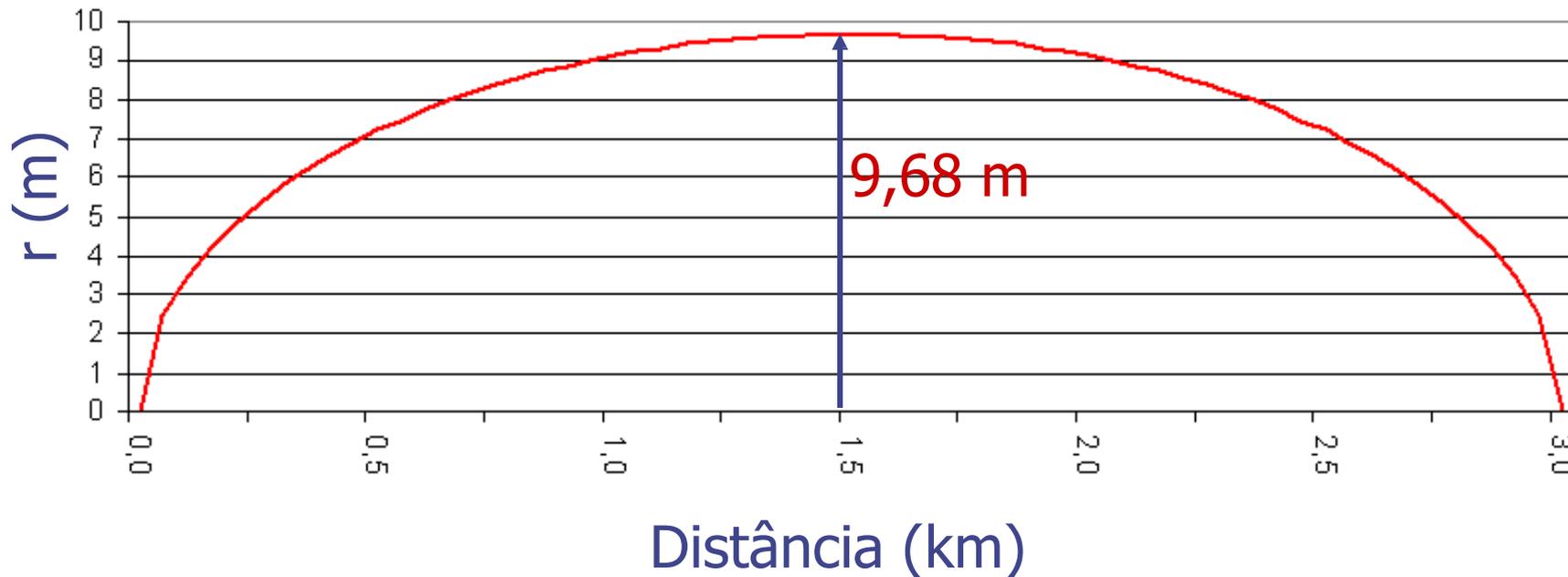
d_2 = distância da antena 2 até o obstáculo (km)

f = frequência [MHz]



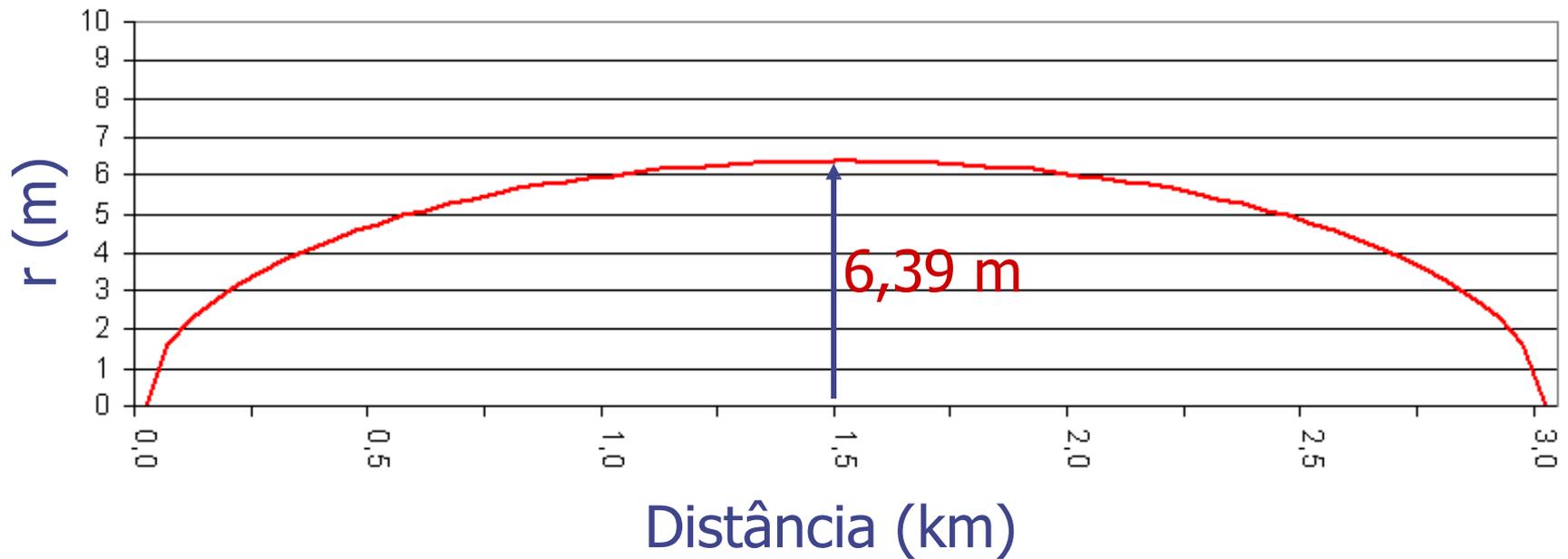
Zona de Fresnel

Exemplo: 1ª Zona de Fresnel em 2,4 GHz para $d_{\text{link}} = 3\text{km}$

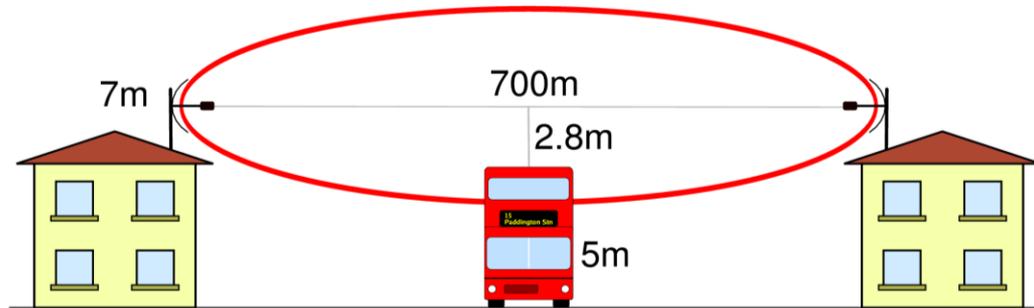


Zona de Fresnel

Exemplo: 1ª Zona de Fresnel em 5,5 GHz para $d_{\text{link}} = 3\text{km}$



Obstrução da 1ª Zona de Fresnel

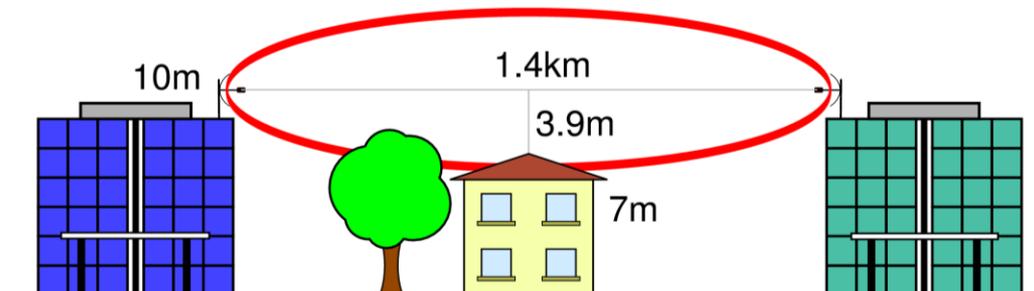


$$f = 2,4\text{GHz}$$

Por tráfego de veículos

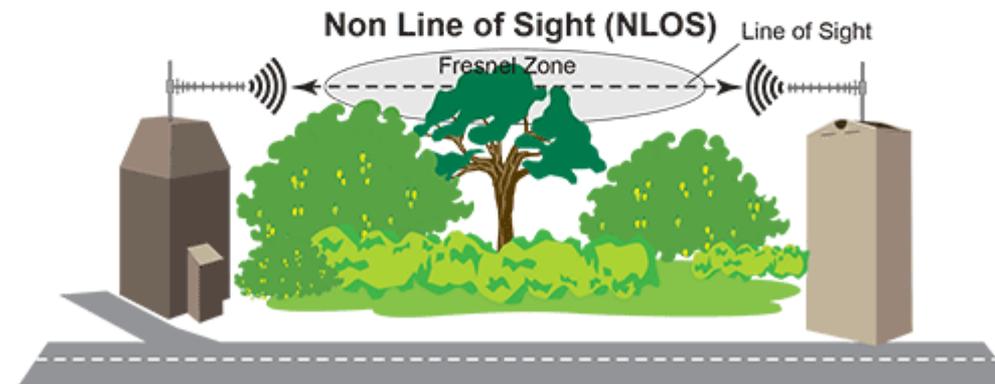
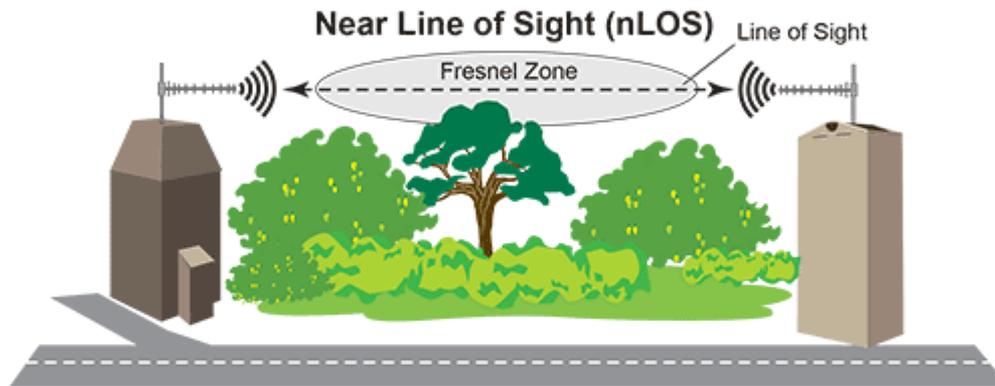
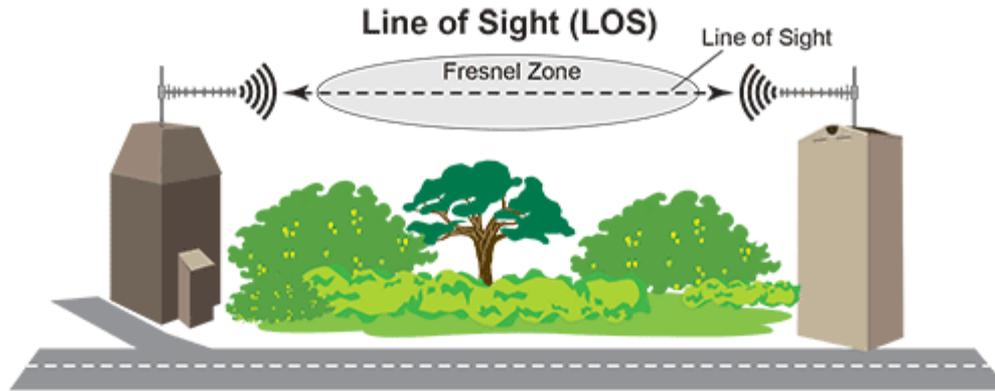


Pelo solo

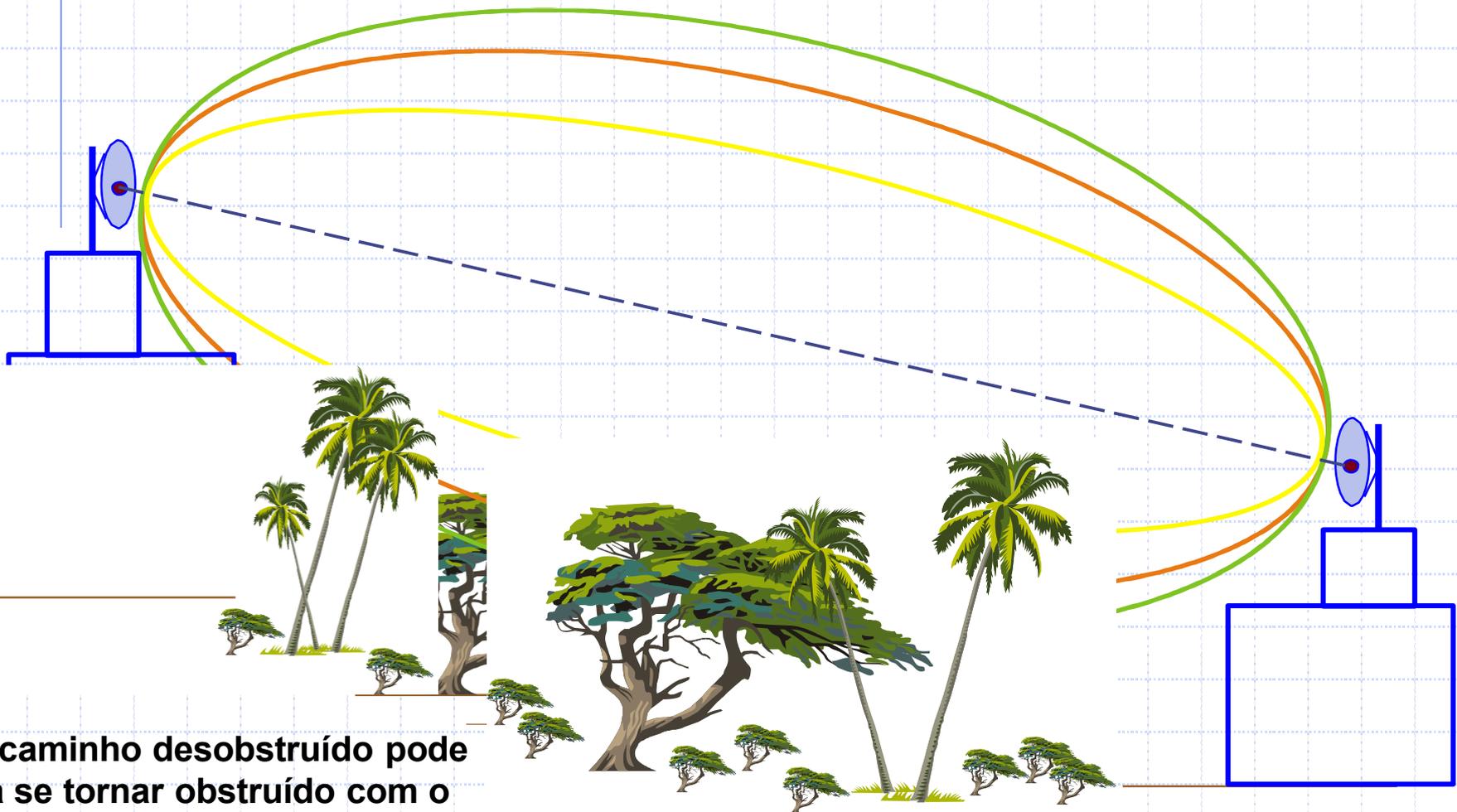


Por obstáculos naturais ou artificiais

Obstrução da 1ª Zona de Fresnel



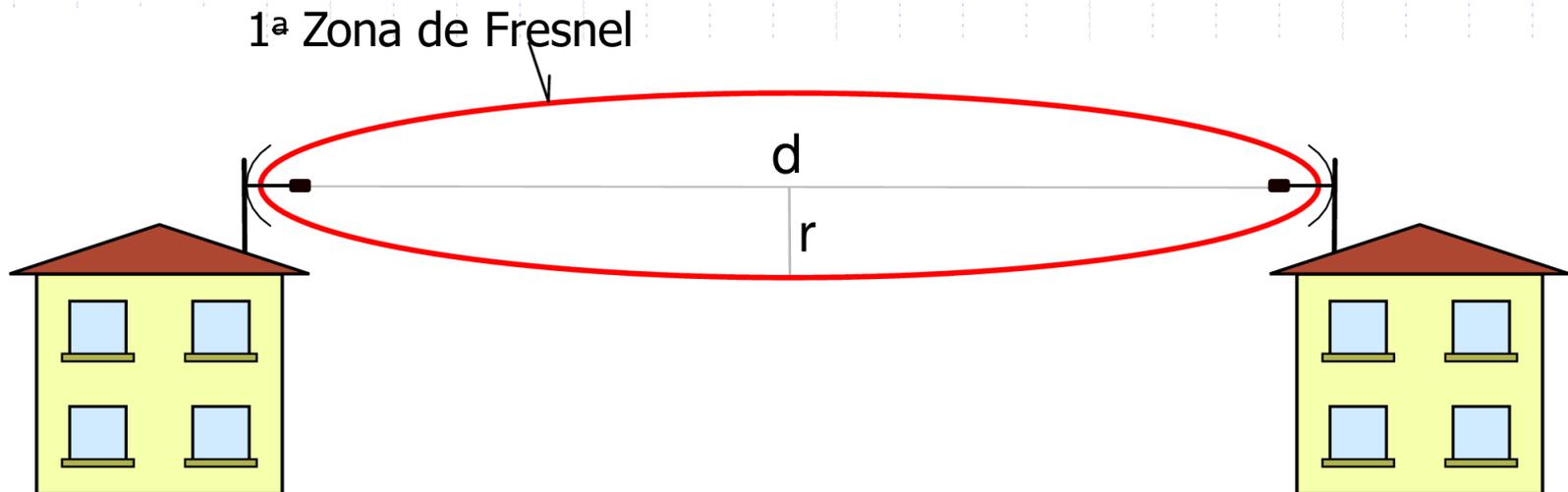
Obstrução da 1ª Zona de Fresnel



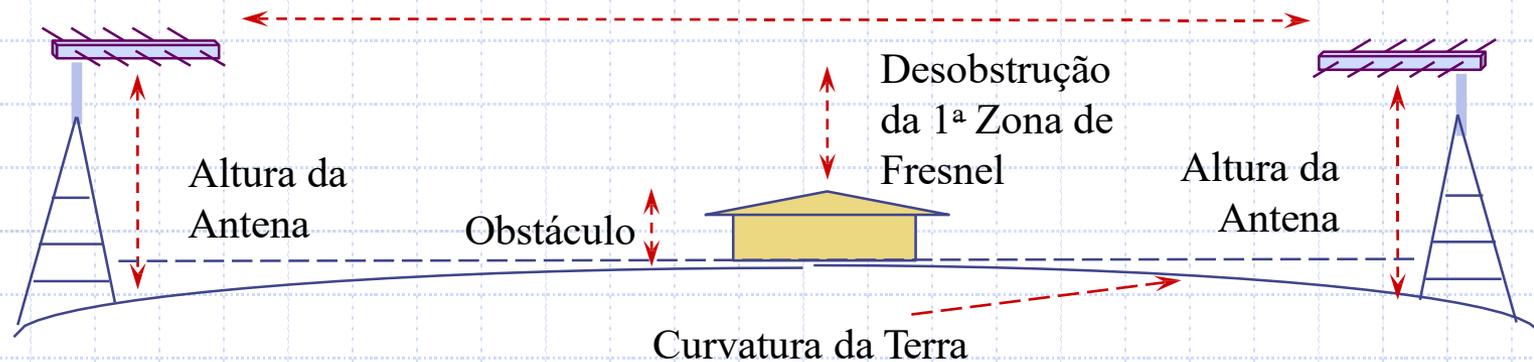
Um caminho desobstruído pode vir a se tornar obstruído com o passar do tempo, por crescimento da vegetação ou construção de novas edificações!

Desobstrução da 1ª Zona de Fresnel

- Se 100% da 1ª Zona de Fresnel estiver desobstruída, considera-se que a propagação será semelhante à do espaço livre.
- Como regra prática recomenda-se que **no mínimo** 60% do raio da 1ª Zona de Fresnel esteja desobstruído, na faixa de 1 GHz a 3 GHz e 100% acima de 3 GHz.



Influência das Alturas das Antenas



As antenas devem ter alturas tais que:

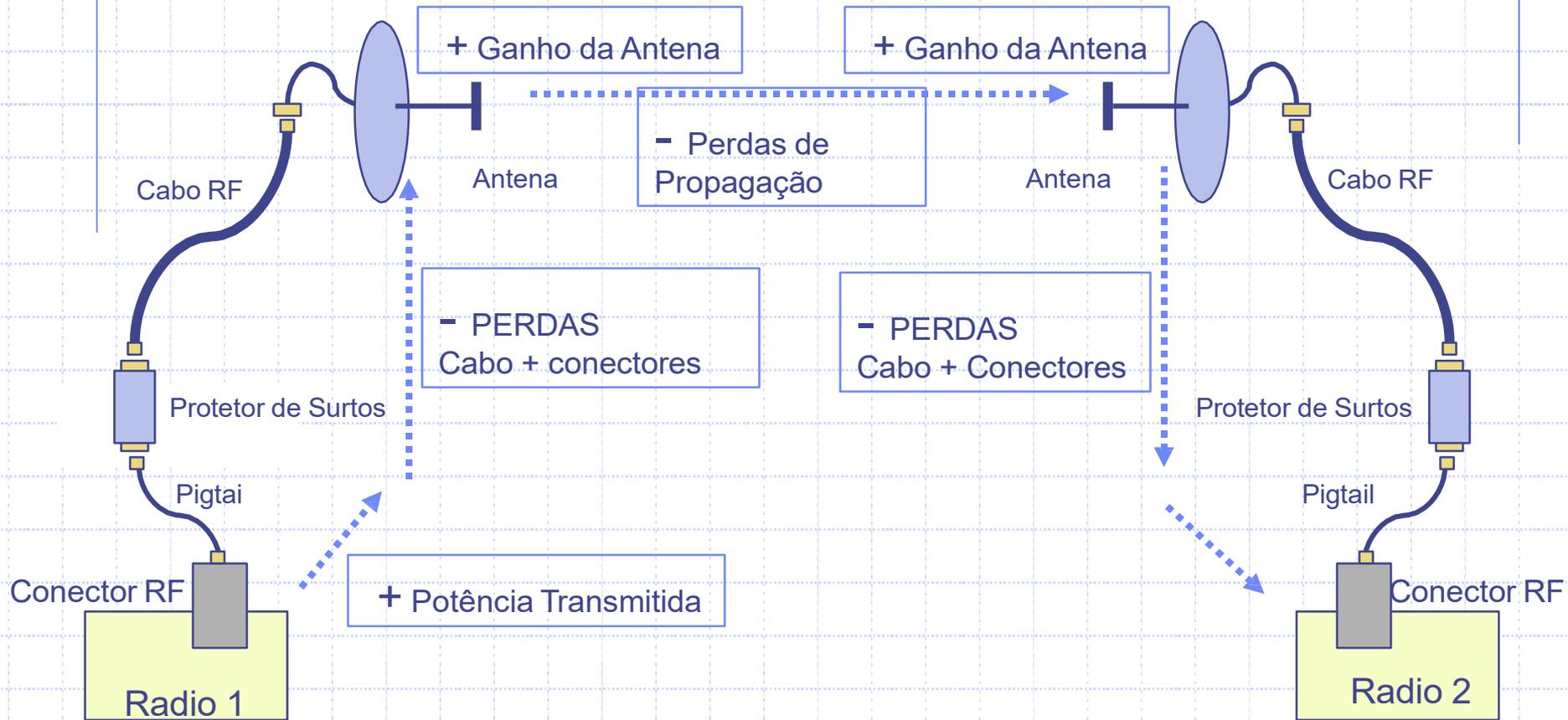
- Permitam a desobstrução de pelo menos 60% [1 GHz a 3 GHz] ou 100% [$>3\text{GHz}$] da 1ª Zona de Fresnel, considerando os obstáculos existentes na linha de visada das antenas.
- Permitam compensar a curvatura terrestre.

$f = 2,4\text{GHz}$

Influência das Alturas das Antenas

Distância (km)	1a Zona Fresnel (m)	60% 1.a Zona Fresnel (m)	Curvatura Terrestre (m)	Total (m)
1	5,61	3,37	0,0	3,37
2	7,94	4,76	0,2	4,96
3	9,72	5,83	0,4	6,23
4	11,23	6,74	0,7	7,44
5	12,55	7,53	1,0	8,53
6	13,75	8,25	1,5	9,75
7	14,85	8,91	2,0	10,91
8	15,88	9,53	2,7	12,23
9	16,84	10,10	3,4	13,50
10	17,75	10,65	4,2	14,85
11	18,62	11,17	5,0	16,17
12	19,45	11,67	6,0	17,67
13	20,24	12,14	7,0	19,14
14	21,00	12,60	8,2	20,80
15	21,74	13,04	9,4	22,44
16	22,45	13,47	10,7	24,17
17	23,14	13,89	12,0	25,89
18	23,82	14,29	13,5	27,79
19	24,47	14,68	15,0	29,68
20	25,10	15,06	16,7	31,76

Cálculo simplificado de perdas



$$RSL \text{ (receive signal level)} > \text{sensibilidade} + \text{Margem de Desvanecimento}$$

Cálculo simplificado de perdas

Para que a ligação seja confiável deve-se ter:

- **RSL > Sensibilidade do Rádio + Margem de Desvanecimento**
- IEEE 802.11b: A sensibilidade dos rádios geralmente é de **-82dBm** para uma taxa de transmissão de 11 Mbits/s
- Margem de Desvanecimento (FADE MARGIN): valor de segurança para garantir um bom funcionamento

Mínima Margem de Desvanecimento = 10 dB

Links sujeitos a interferências (ambiente urbano) = 15dB

Links com condições climáticas adversas = 20dB

Portanto Calcula-se:

$$\text{RSL} > -82 + 10 = -72\text{dBm}$$