



CÁLCULO DE ENLACES DE RADIOCOMUNICAÇÃO PONTO-A-PONTO

Ewaldo Luiz de Mattos Mehl
Universidade Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Elétrica
mehl@eletrica.ufpr.br

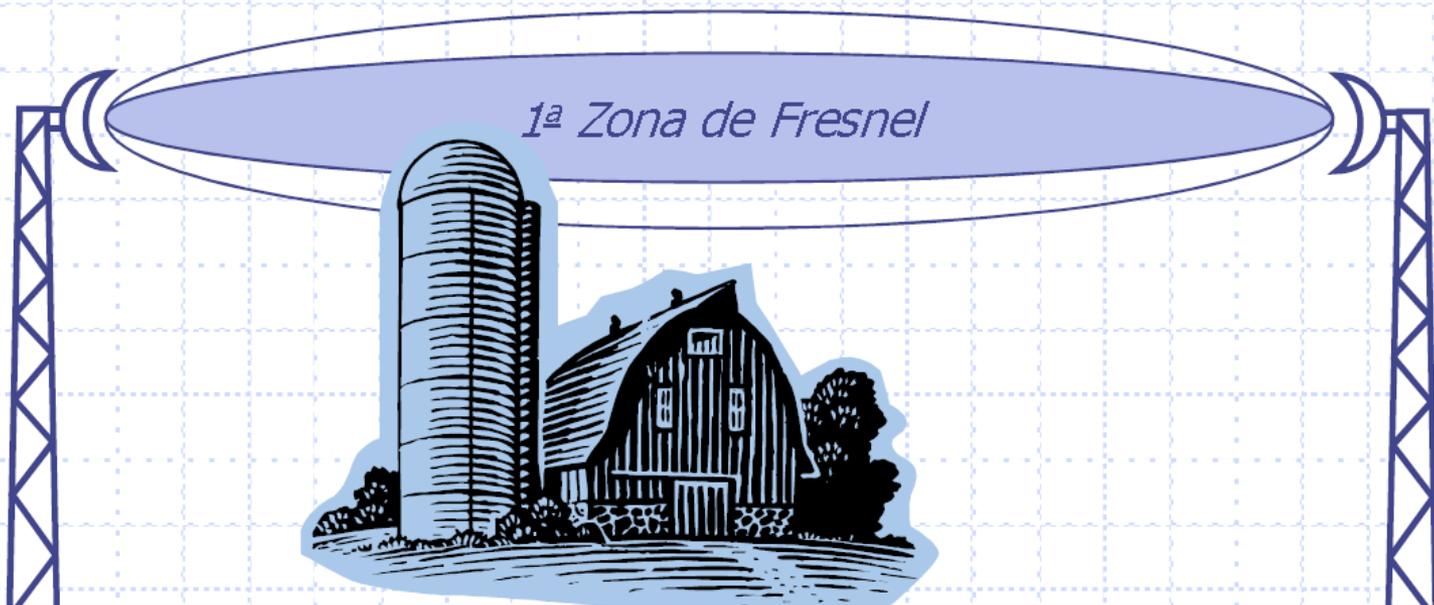


Dimensionamento de Enlaces Ponto-a-Ponto

- Desobstrução da 1.ª Zona de Fresnel
- Determinação das Alturas das Antenas
- Verificação com o Perfil Topográfico

Desobstrução da 1ª Zona de Fresnel

	$1\text{GHz} < f < 3\text{GHz}$	$f > 3\text{GHz}$
$K=4/3$	60% do r_{Fresnel}	100% do r_{Fresnel}
$K_{\text{mínimo}}$	30% do r_{Fresnel}	60% do r_{Fresnel}



Cálculo das alturas das antenas

Dados necessários

f = frequência do rádio

d_{AB} = distância entre as antenas

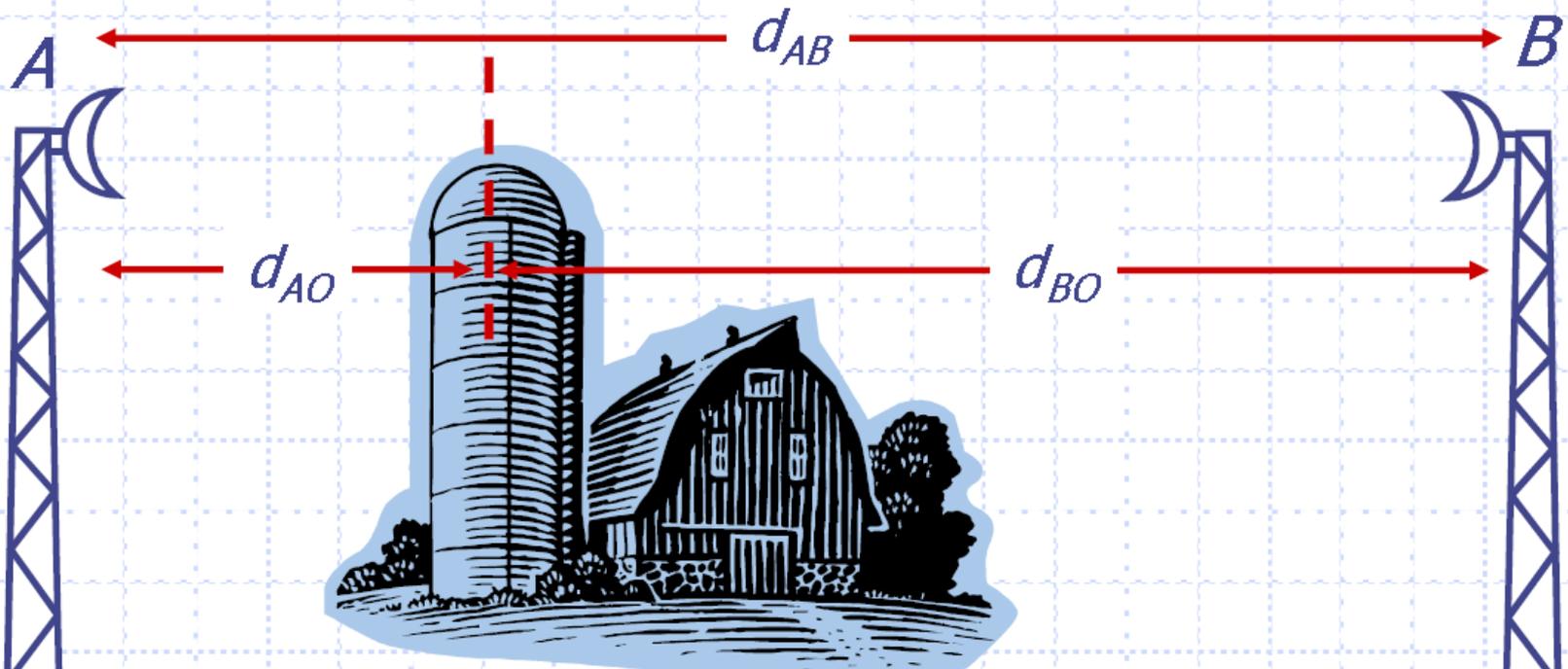
d_{AO} = distância do ponto A até o obstáculo

d_{BO} = distância do ponto B até o obstáculo

h_A = altitude da estação A

h_B = altitude da estação B

h_O = altitude do obstáculo



Cálculo das alturas das antenas

1. Calcular o Raio da 1ª Zona de Fresnel na frequência considerada:

$$r_{Fresnel} = 550 \sqrt{\frac{d_{AO} \cdot d_{BO}}{d_{AB} \cdot f}}$$

$$[f] = \text{MHz}$$

$$[d_{AB}] = \text{km}$$

$$[d_{AO}] = \text{km}$$

$$[d_{BO}] = \text{km}$$

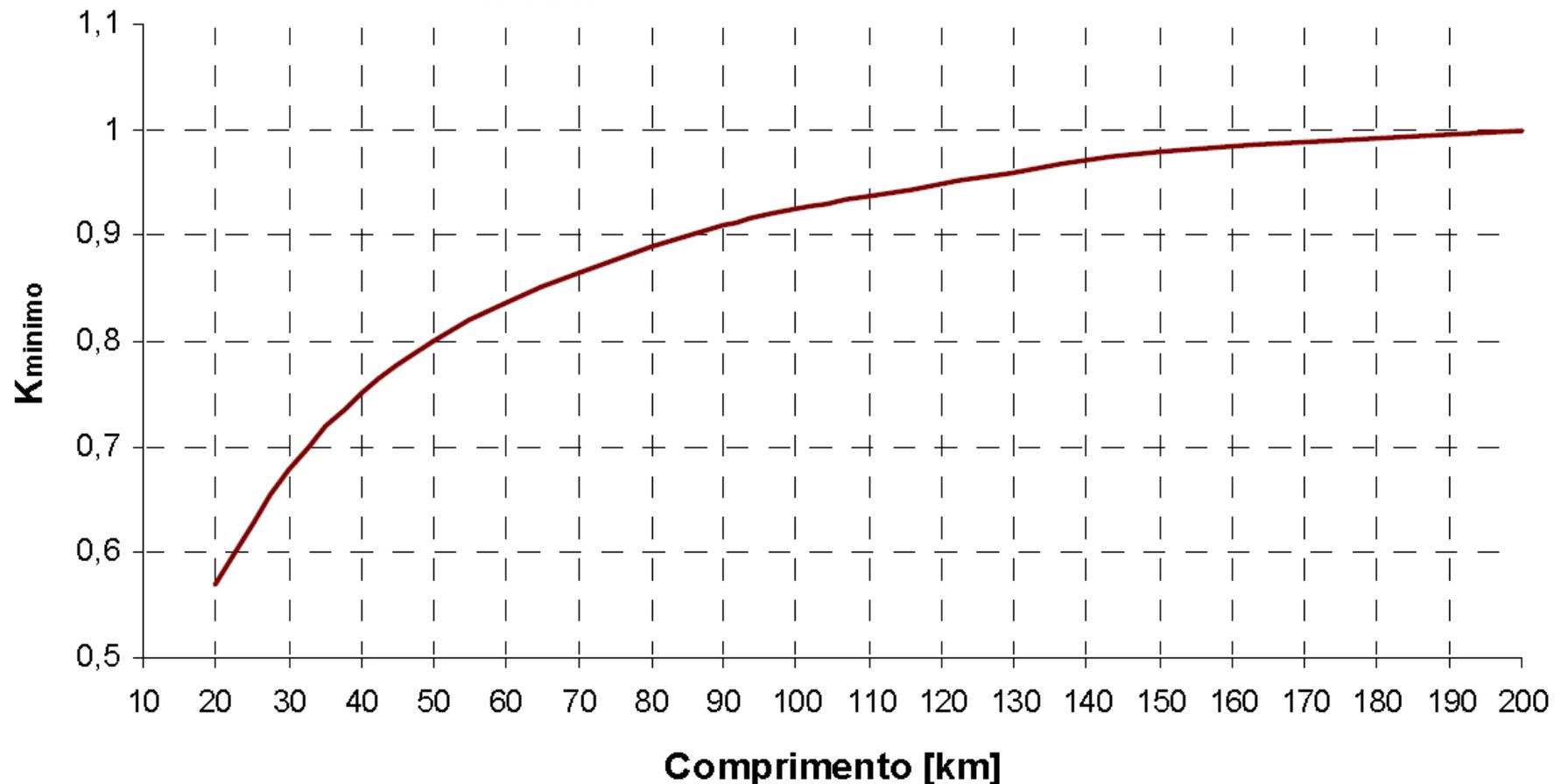
2. Calcular a desobstrução da 1ª Zona de Fresnel necessária para o tipo de rádio que será usado:

	1GHz < f < 3GHz	f > 3GHz
K=4/3	$r_{desobK} = 0,60 \times r_{Fresnel}$	$r_{desobK} = 1,0 \times r_{Fresnel}$
K_{mínimo}	$r_{desobKmin} = 0,30 \times r_{Fresnel}$	$r_{desobKmin} = 0,60 \times r_{Fresnel}$

Cálculo das alturas das antenas

3. Obtenção do $K_{\text{mínimo}}$: ITU-R 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



Cálculo das alturas das antenas

4. Correção para $K=4/3$:

$$h_K = \frac{d_{AO} \cdot d_{BO}}{12,74 \cdot K}$$

$$K = 4/3 = 1,3333333$$

$$[d_{AB}] = \text{km}$$

$$[d_{AO}] = \text{km}$$

Diâmetro médio da Terra = 12740 km

5. Correção para $K_{\text{mínimo}}$:

$$h_{K \text{ min}} = \frac{d_{AO} \cdot d_{BO}}{12,74 \cdot K_{\text{mínimo}}}$$

$$K_{\text{mínimo}} = \text{obtido da UTI-R P530}$$

$$[d_{AB}] = \text{km}$$

$$[d_{AO}] = \text{km}$$

Obs.: As correções para $K=4/3$ e $K_{\text{mínimo}}$ são aplicadas somente no ponto de obstrução para simplificar o cálculo.

Cálculo das alturas das antenas

6. Correção para $K=4/3$ + Desobstrução do Raio de Fresnel para $K=4/3$:

$$h_{cK} = h_K + r_{desobK}$$

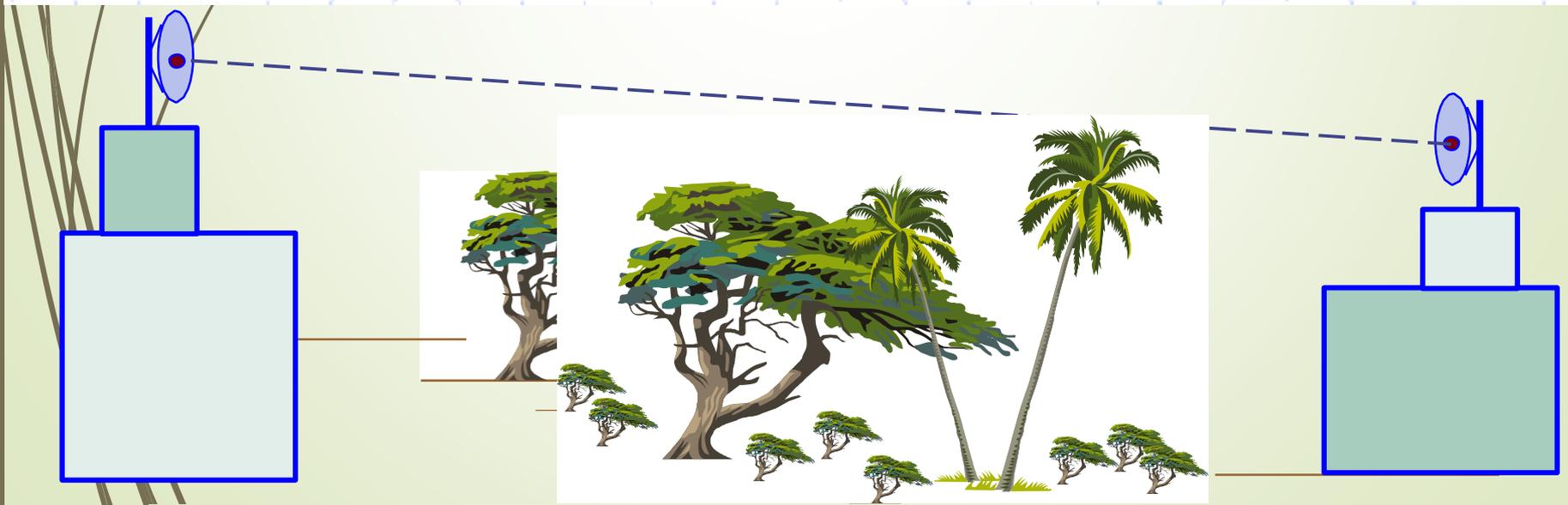
7. Correção para $K_{mínimo}$ + Desobstrução do Raio de Fresnel para $K_{mínimo}$:

$$h_{cK_{min}} = h_{K_{min}} + r_{desobK_{min}}$$

8. Arbitrar uma altura a_A [metros] para a antena a ser instalada no Ponto A.

Cálculo das alturas das antenas

9. Considerar uma margem de segurança h_{veg} [metros] para a existência e/ou crescimento de árvores/vegetação no ponto de obstrução (= altura máxima da vegetação/árvores) se for o caso.
10. Considerar uma margem de segurança h_{seg} [metros] para imprecisões nas medidas, se for o caso.



Cálculo das alturas das antenas

11. Calcular a altura da antena no Ponto B para $K=4/3$:

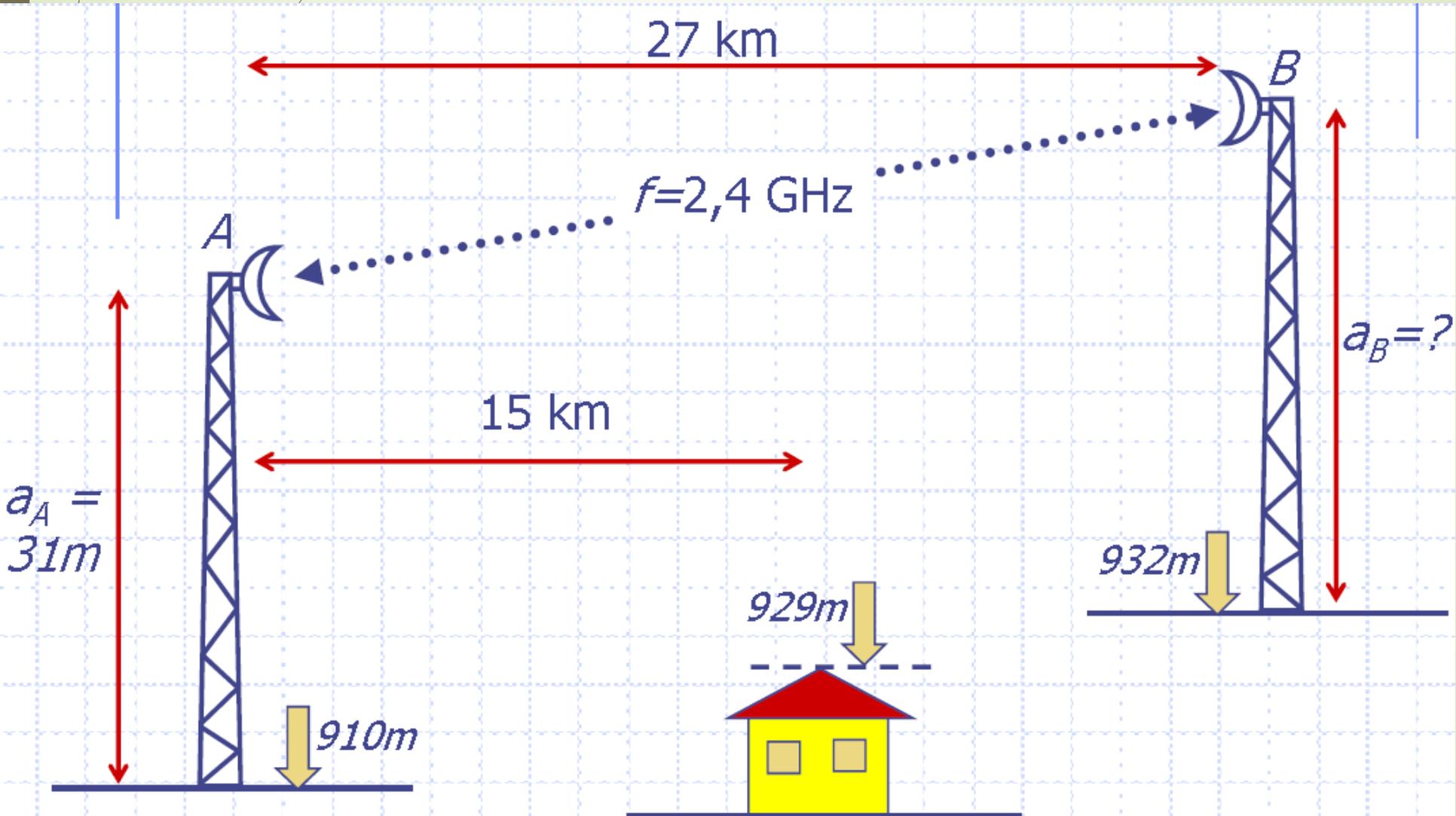
$$a_{BK} = \frac{d_{AB} (h_O + h_{cK} + h_{veg} + h_{seg} - h_B) - d_{BO} (h_A + a_A - h_B)}{d_{AO}}$$

12. Calcular a altura da antena no Ponto B para $K_{mínimo}$:

$$a_{BKmin} = \frac{d_{AB} (h_O + h_{cKmin} + h_{veg} + h_{seg} - h_B) - d_{BO} (h_A + a_A - h_B)}{d_{AO}}$$

13. Escolher para a antena no Ponto B a MAIOR altura dentre a_{BK} e a_{BKmin} .

Exemplo 1:



antenas.xls [Modo de Compatibilidade] - Excel Entrar

Arquivo **Página Inicial** Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Suplementos Team Diga-me Compartilhar

Colar Fonte Alinhamento Número Estilos Células Edição

Área de Transf...

F6

A B C D E F G H

Cálculo da altura das antenas			
Frequencia do enlace	f	2400	MHz
Comprimento	dAB	27	km
K=4/3	K	1,33	
K=mínimo	Kmin	0,65	
Distância da estação A até a obstrução	dAO	15	km
Distância da estação B até a obstrução	dBO	12	km
Altitude da estação A	hA	910	m
Altitude da estação B	hB	932	m
Altitude do obstáculo	hO	929	m
60 % raio de fresnel no ponto crítico (ver critério de visibilidade)*	rFresnel60	17,39	m
30 % raio de fresnel no ponto crítico (ver critério de visibilidade)*	rFresnel30	8,70	m
Correção da curvatura da Terra para K=4/3	hK	10,62	m
Correção da curvatura da Terra para K=mínimo	hKmin	21,74	m
60% do raio de fresnel + correção da curvatura da Terra para K=4/3	hcK	28,01	m
30% do raio de fresnel + correção da curvatura da Terra para Kmínimo	hcKmin	30,44	m
Altura da antena A tomada como referência	aA	31	m
Margem de crescimento de árvores no ponto de obstrução	hveg	0	m
Margem de segurança devido a precisão das medidas	hseg	0	m
Altura da antena B para K=4/3	aBK	37,82	m
Altura da antena B para K=mínimo	aBKmin	42,19	m

* O critério de visibilidade é baseado na porcentagem da primeira zona de Fresnel a ser liberada. Esse percentual varia de acordo com a frequência de operação do enlace rádio.

Frequência de operação entre 1 e 3GHz	Frequência de operação acima de 3GHz
60% do raio de Fresnel para K = 4/3	100% do raio de Fresnel para K = 4/3
30% do raio de Fresnel para K = mínimo	60% do raio de Fresnel para K = mínimo

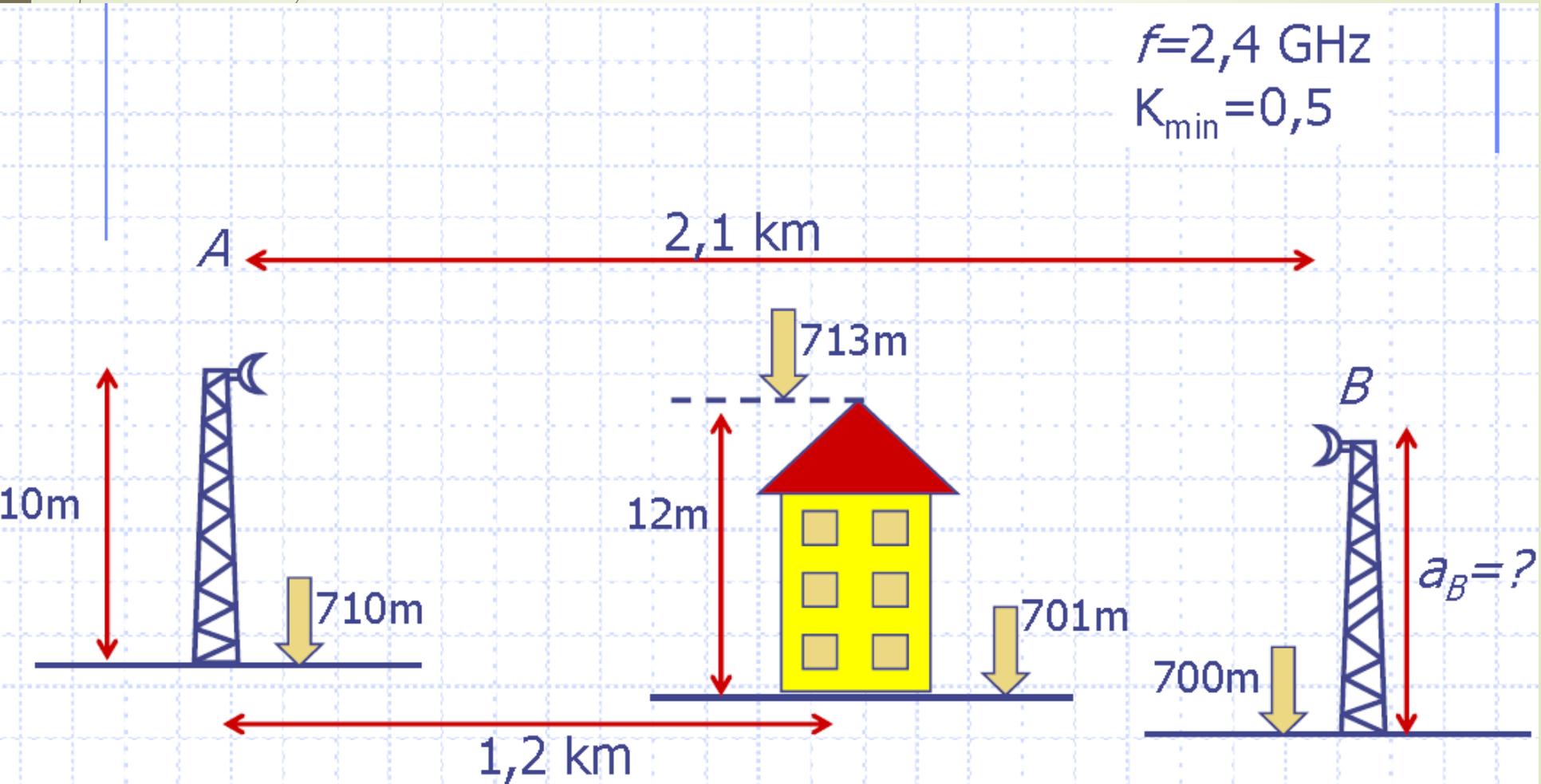
Pronto cálculo_altura_antena 100%

Altura da antena no Ponto "B"

$$a_{BKmin} \geq 41,19 \text{ metros}$$

Frequencia do enlace	f	2400	MHz
Comprimento	dAB	27	km
K=4/3	K	1,33	
K=mínimo	Kmin	0,65	
Distância da estação A até a obstrução	dAO	15	km
Distância da estação B até a obstrução	dBO	12	km
Altitude da estação A	hA	910	m
Altitude da estação B	hB	932	m
Altitude do obstáculo	hO	929	m
60 % raio de fresnel no ponto crítico (ver critério de visibilidade)*	rFresnel60	17,39	m
30 % raio de fresnel no ponto crítico (ver critério de visibilidade)*	rFresnel30	8,70	m
Correção da curvatura da Terra para K=4/3	hK	10,62	m
Correção da curvatura da Terra para K=mínimo	hKmin	21,74	m
60% do raio de fresnel + correção da curvatura da Terra para K=4/3	hcK	28,01	m
30% do raio de fresnel + correção da curvatura da Terra para Kmínimo	hcKmin	30,44	m
Altura da antena A tomada como referência	aA	31	m
Margem de crescimento de árvores no ponto de obstrução	hveg	0	m
Margem de segurança devido a precisão das medidas	hseg	0	m
Altura da antena B para K=4/3	aBK	37,82	m
Altura da antena B para K=mínimo	aBKmin	42,19	m

Exemplo 2



Verificação do Perfil Topográfico

Correção da altura de qualquer ponto na rota do enlace em função do fator K :

Dados necessários

f = frequência do rádio

d_{AB} = distância entre as antenas

d_{AO} = distância do ponto A até o obstáculo

d_{BO} = distância do ponto B até o obstáculo

h_A = altitude da estação A

a_A = altura da antena na estação A

h_B = altitude da estação B

a_B = altura da antena na estação B

h_O = altitude do obstáculo

Altura corrigida
do Obstáculo

$$h_K = h_O + \frac{d_{AO} \cdot d_{BO}}{12,74 \cdot K}$$

Calcular para:

- $K = 4/3$
- $K_{\text{mínimo}}$

Verificação do Perfil Topográfico

Exemplo:

Freqüência	2400	MHz
Comprimento	27	km
Altura antena A	31	m
Altura antena B	42,06	m
Altitude da estação A	910	m
Altitude da estação B	932	m
K = 4/3	1,33	
K = mínimo	0,65	

Obtenção das altitudes ao longo da rota:

- Medição no local com aparelho GPS
- Verificação da Carta Topográfica do local

Distância d1	Altitude real
0	923
1	920
2	922
3	923
4	923
5	922
6	920
7	919
8	917
9	917
10	912
11	922
12	922
13	925
14	926
15	929
16	934
17	936
18	925
19	926
20	922
21	923
22	922
23	922
24	924
25	925
26	930
27	932

km m

Verificação do Perfil Topográfico

Eixo do Elipsóide de Fresnel = Linha de Visada:

$$h_{\text{eixo}P} = (h_A + a_A) - \left[(h_A + a_A - h_B - a_B) \frac{d_{AP}}{d_{AB}} \right]$$

$h_{\text{eixo}P}$ = altitude da linha de visada em um ponto P

h_A = altitude da estação A

a_A = altura da antena na estação A

h_B = altitude da estação B

a_B = altura da antena na estação B

d_{AP} = distância entre a estação A e o ponto P

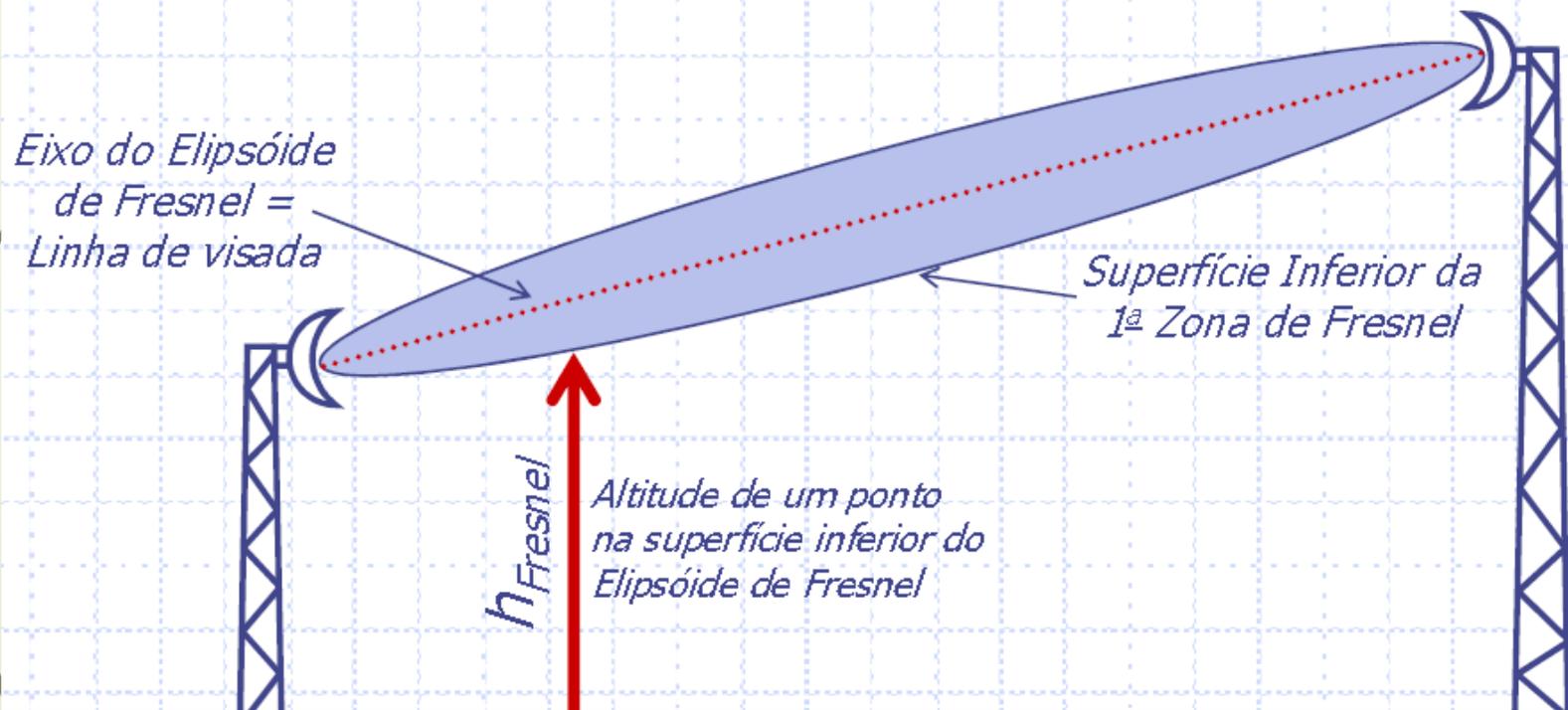
d_{AB} = distância entre as estações A e B

Verificação do Perfil Topográfico

- Os obstáculos geralmente interferem na parte inferior da superfície do Elipsóide de Fresnel.

$$h_{FresnelP} = h_{eixoP} - \left[550 \sqrt{\frac{d_{AP} \cdot d_{BP}}{f \cdot d_{AB}}} \right]$$

$[f] = \text{MHz}$
 $[d] = \text{km}$



Desobstrução da 1ª Zona de Fresnel

- Para desobstrução de 100%:

$$h_{FresnelP} = h_{eixoP} - \left[550 \sqrt{\frac{d_{AP} \cdot d_{BP}}{f \cdot d_{AB}}} \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f > 3\text{GHz} \\ K = 4/3 \end{array} \right.$$

- Para desobstrução de 60%:

$$h_{FresnelP} = h_{eixoP} - 0,60 \left[550 \sqrt{\frac{d_{AP} \cdot d_{BP}}{f \cdot d_{AB}}} \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f > 3\text{GHz} \\ K_{\text{mínimo}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1\text{GHz} < f < 3\text{GHz} \\ K = 4/3 \end{array} \right.$$

- Para desobstrução de 30%:

$$h_{FresnelP} = h_{eixoP} - 0,30 \left[550 \sqrt{\frac{d_{AP} \cdot d_{BP}}{f \cdot d_{AB}}} \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1\text{GHz} < f < 3\text{GHz} \\ K_{\text{mínimo}} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} [f] = \text{MHz} \\ [d] = \text{km} \end{array}$$

Verificação do Perfil Topográfico

Exemplo:

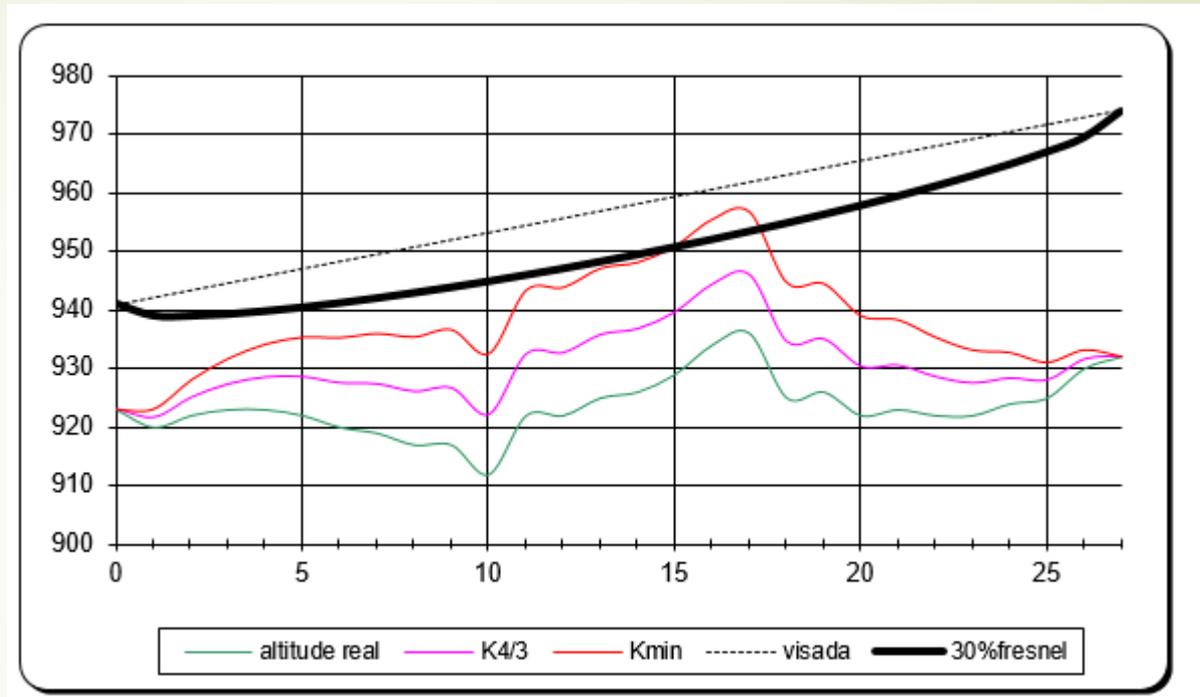
Verificação da desobstrução
de 30% do Raio da
1ª Zona de Fresnel

O eixo do Elipsoide de
Fresnel é a “linha de
visada” entre as duas
antenas

Distância d1	Altitude real	Altitude k=4/3	Altitude k=mínimo	Eixo de Fresnel	Fresnel k=mínimo
0	923	923	923	941	941,00
1	920	921,53	923,14	942,22	938,91
2	922	924,95	928,04	943,45	938,87
3	923	927,25	931,69	944,67	939,17
4	923	928,43	934,11	945,9	939,68
5	922	928,49	935,28	947,12	940,32
6	920	927,44	935,22	948,35	941,07
7	919	927,26	935,91	949,57	941,90
8	917	925,97	935,36	950,8	942,81
9	917	926,56	936,56	952,02	943,77
10	912	922,03	932,53	953,24	944,79
11	922	932,39	943,25	954,47	945,87
12	922	932,62	943,74	955,69	946,99
13	925	935,74	946,98	956,92	948,18
14	926	936,74	947,98	958,14	949,40
15	929	939,62	950,74	959,37	950,67
16	934	944,39	955,25	960,59	951,99
17	936	946,03	956,53	961,82	953,37
18	925	934,56	944,56	963,04	954,79
19	926	934,97	944,36	964,26	956,27
20	922	930,26	938,91	965,49	957,82
21	923	930,44	938,22	966,71	959,43
22	922	928,49	935,28	967,94	961,14
23	922	927,43	933,11	969,16	962,94
24	924	928,25	932,69	970,39	964,89
25	925	927,95	931,04	971,61	967,03
26	930	931,53	933,14	972,84	969,53
27	932	932	932	974,06	974,06

km m

Verificação do Perfil Topográfico



O eixo do Elipsoide de Fresnel é a “linha de visada” entre as duas antenas

- Verifica-se que haverá problemas de atenuação no ponto onde há uma elevação do terreno entre o km 15 e o km 17 da rota.
- Esta atenuação é devido à consideração do fator $K_{\text{mínimo}}$
- Se for considerado apenas $K=4/3$ não seria feito o projeto corretamente!



Conclusões

- ▶ O projeto de enlaces em radiofrequência deve levar em conta a refração dos sinais de rádio na atmosfera.
- ▶ Em enlaces curtos, a influência de K_{minimo} é geralmente desprezível.
- ▶ Programas e planilhas facilitam o projeto!