Propagação Radioelétrica

2017/II

Profa. Cristina

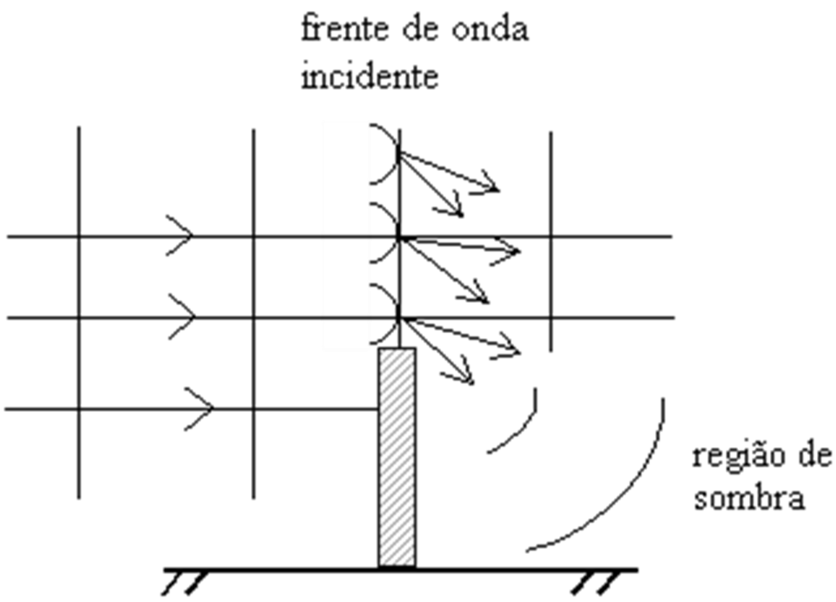
Módulo II

Fenômenos de Propagação

Efeitos da Difração na Propagação

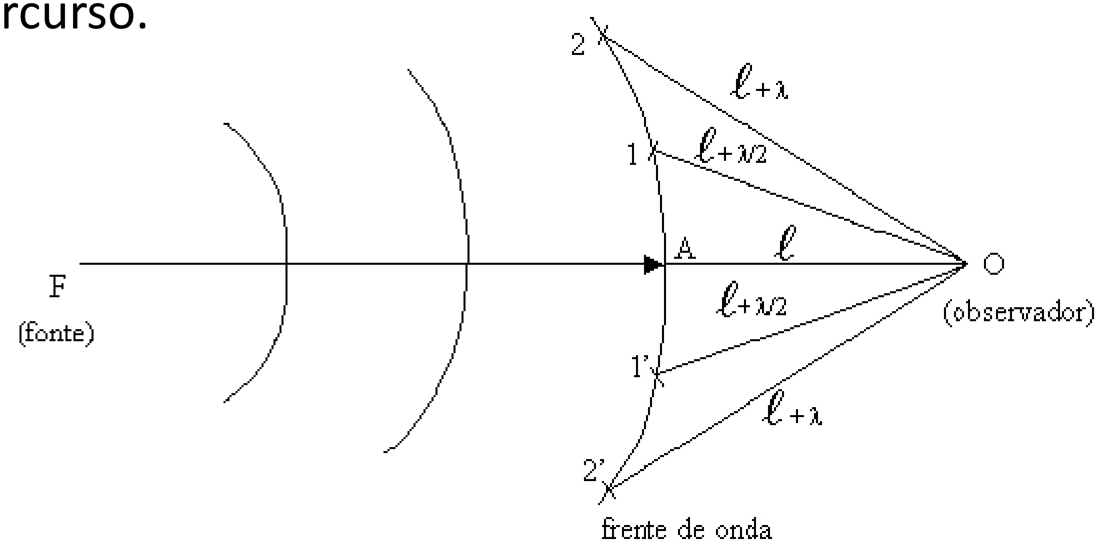
Difração

- Difração é a propriedade que toda onda eletromagnética tem de circundar o ápice de obstáculos existentes no percurso de propagação.
- A difração descreve as modificações sofridas por ondas eletromagnéticas quando circundam obstáculos.
- Huygens, em 1690, demonstrou que cada ponto de uma frente de onda esférica pode ser considerado uma nova frente de onda secundária, que se combina com outras frentes de ondas para formar uma nova frente de onda, de tal forma que, mesmo obstruída a onda circundará o obstáculo.



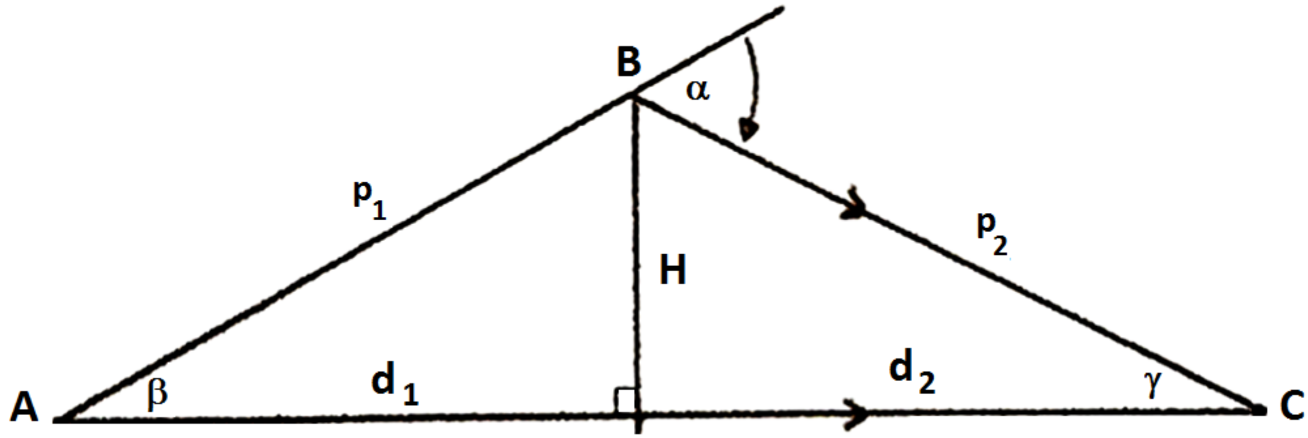
- No estudo de propagação é importante considerar a presença de obstáculos no percurso, como montanhas, por exemplo.

- As fontes pontuais da região não obstruída emitirão frentes de onda secundárias que iluminarão a região situada atrás do obstáculo, o que corresponde à difração da energia.
- Na figura abaixo pode-se observar que as frentes de onda oriundas de cada fonte secundária percorrem distâncias distintas até alcançar o receptor no ponto O.
- Portanto, dependendo da extensão do percurso, cada fonte secundária estabelecerá interferência construtiva ou destrutiva na onda do campo elétrico incidente em O, de acordo com o giro de fase que a onda experimenta em cada percurso.



Difração em obstáculo do tipo gume de faca (*knife-edge diffraction*)

Obstáculo simples



A condição de difração é ilustrada na figura acima, onde:

$d = d_1 + d_2$ é a distância entre as antenas TX e RX;

$H =$ é a distância entre a linha de visada direta e um ponto qualquer do terreno do percurso entre Tx e Rx;

$D = \overline{AC}$ é o percurso TX-RX da onda direta;

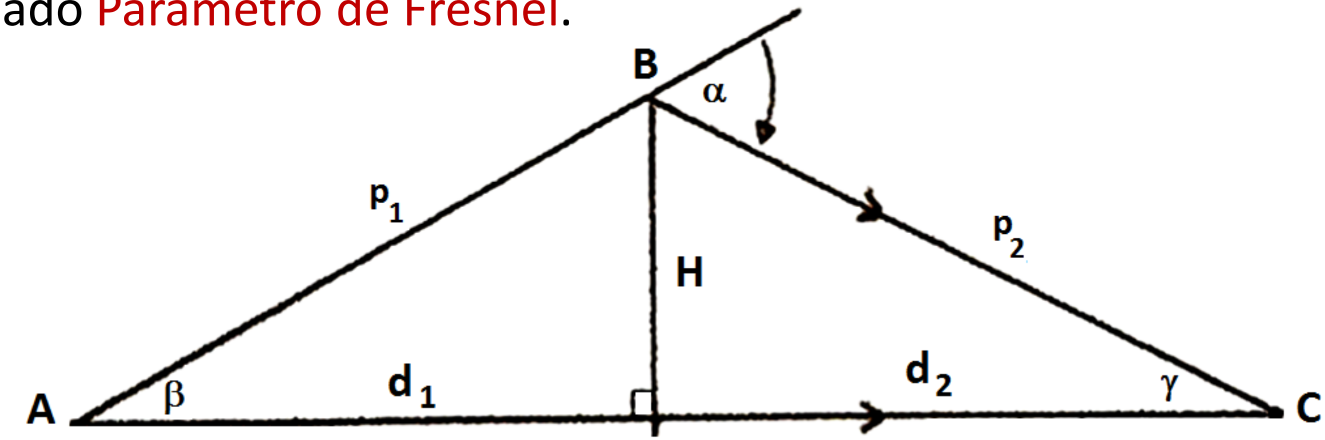
$d_{difr} = \overline{AB} + \overline{BC}$ é o percurso TX-RX da onda difratada.

- A diferença entre o percurso direto e o percurso difratado resulta em uma diferença de fase entre o sinal direto e o sinal difratado.
- A diferença de fase pode ser expressa por

$$\phi = \left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{2(d_1 + d_2)H^2}{\lambda d_1 d_2}\right) \text{, de onde se define } v^2 = \frac{2(d_1+d_2)H^2}{\lambda d_1 d_2},$$

de tal forma que $\phi = \frac{\pi}{2} v^2$.

- v é denominado Parâmetro de Fresnel.



Na expressão $\phi = \left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{2(d_1 + d_2)H^2}{\lambda d_1 d_2}\right)$ podemos identificar o termo

em vermelho como $\frac{1}{r_1^2}$, sendo r_1 o primeiro raio de Fresnel, expresso por

$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}}$, de tal forma que $\phi = \left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{2H^2}{r_1^2}\right) = \left(\frac{\pi}{2}\right)\left(2\left(\frac{H}{r_1}\right)^2\right)$

Comparando a expressão acima com $\phi = \frac{\pi}{2}v^2$, podemos concluir que

$v^2 = 2\left(\frac{H}{r_1}\right)^2$, de onde, $v = \pm\sqrt{2}\left(\frac{H}{r_1}\right)$, e também que

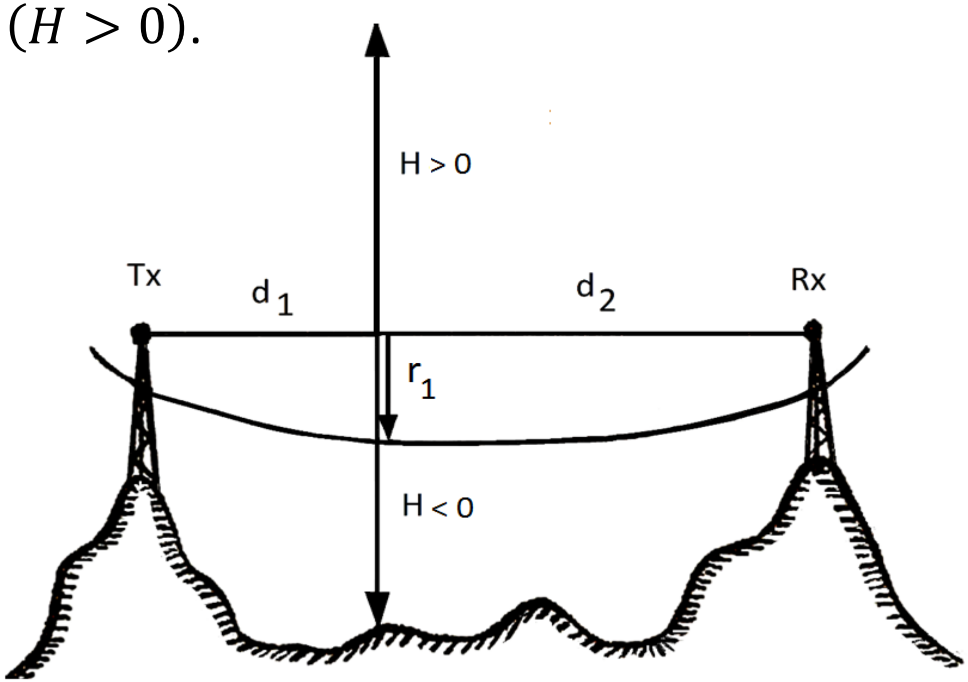
$$v = \pm H\left(\frac{\sqrt{2}}{r_1}\right) = \pm H\left(\frac{\sqrt{2}\sqrt{d_1 + d_2}}{\sqrt{\lambda d_1 d_2}}\right) = \pm H\left(\sqrt{\frac{2}{\lambda}\frac{(d_1 + d_2)}{d_1 d_2}}\right).$$

Conforme pode-se observar na figura, na expressão do Parâmetro de Fresnel:

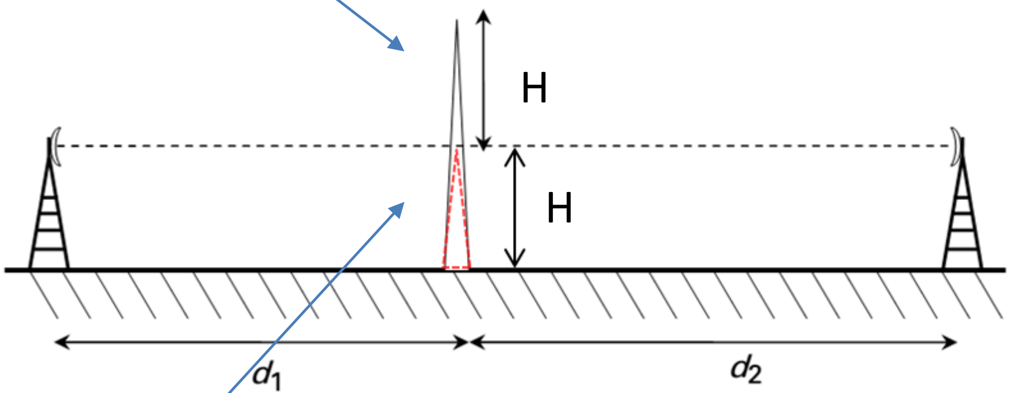
- H é a distância entre a linha de visada direta e um ponto qualquer do terreno do percurso entre Tx e Rx, e
- r_1 é o raio da primeira Zona de Fresnel.

Assim, o Parâmetro de Fresnel, dado por $v = \pm\sqrt{2}\left(\frac{H}{r_1}\right)$ será:

- Negativo, em caso de folga $(H < 0)$,
- Positivo, em caso de obstrução $(H > 0)$.



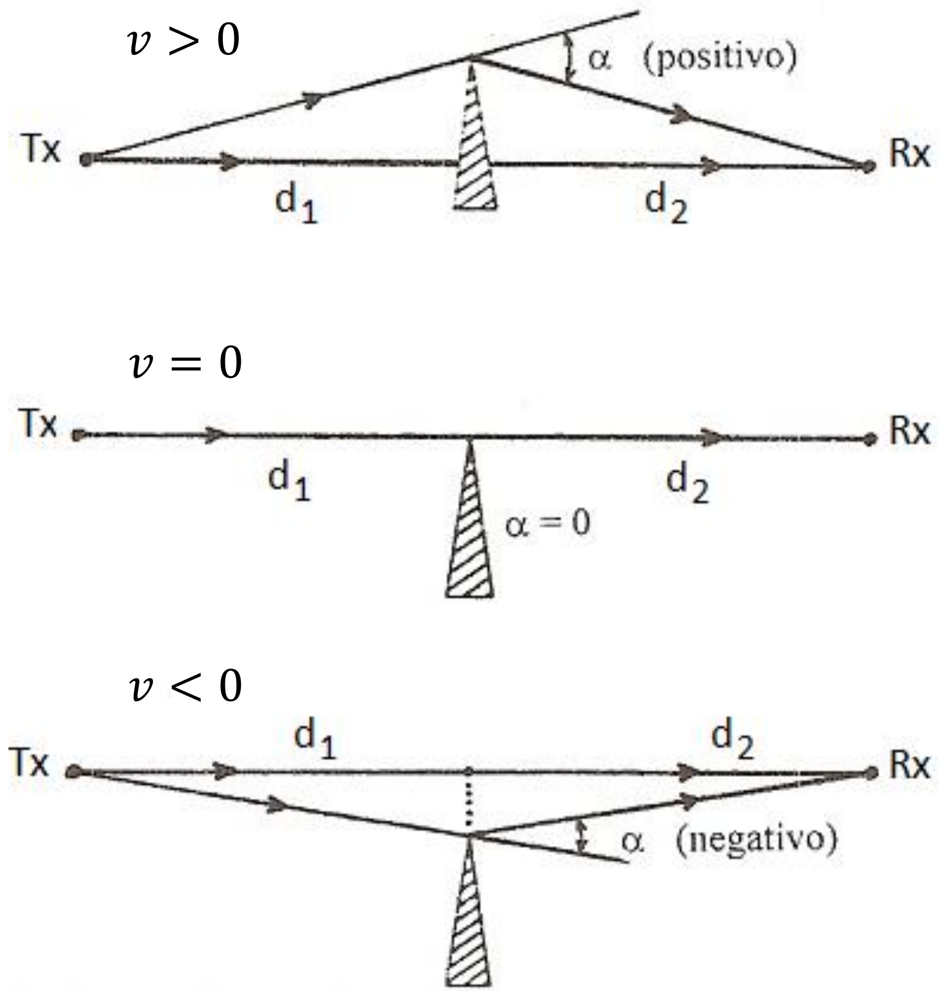
Positivo, em caso de obstrução $(H > 0)$



Negativo, em caso de folga $(H < 0)$

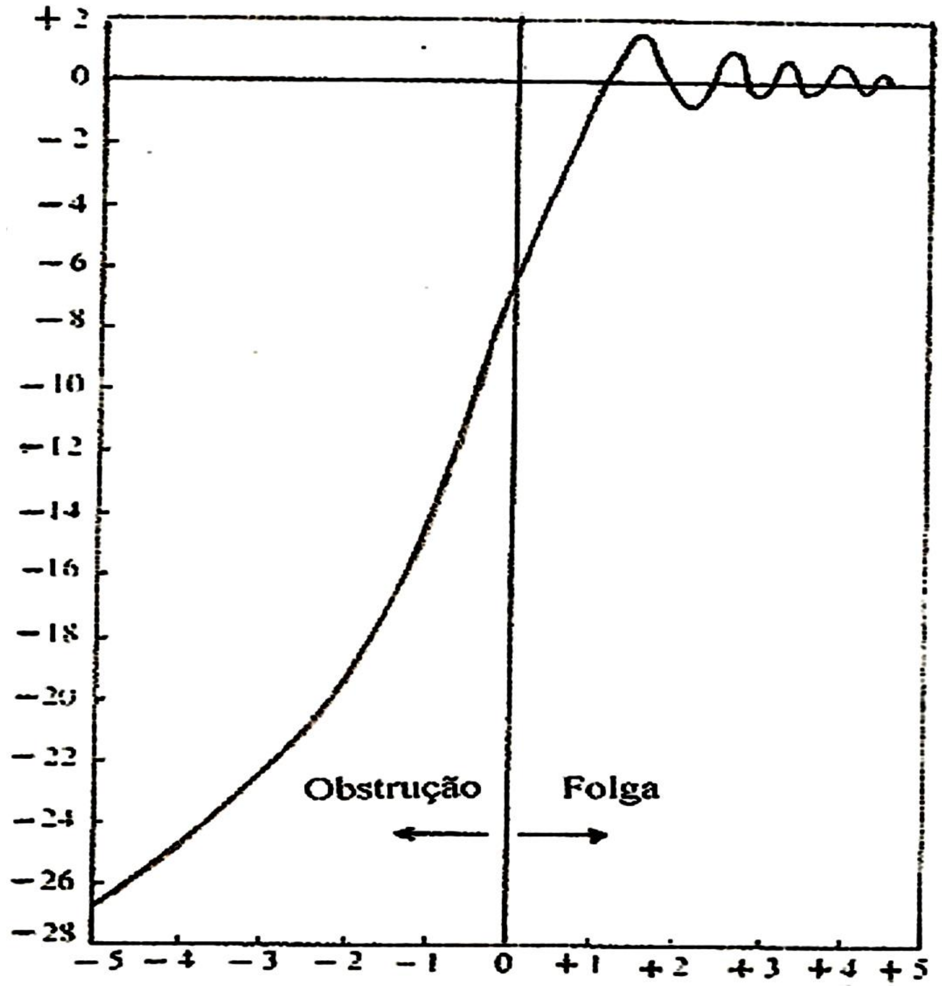
Obstrução: quando a borda está acima do percurso de propagação.

Folga: quando a borda está abaixo do percurso de propagação.



A atenuação no espaço livre devida a um obstáculo do tipo gume de faca é expressa em função da Folga de Percurso (H/r_1)

$$20\log\left|\frac{E}{E_0}\right|$$



H/r_1

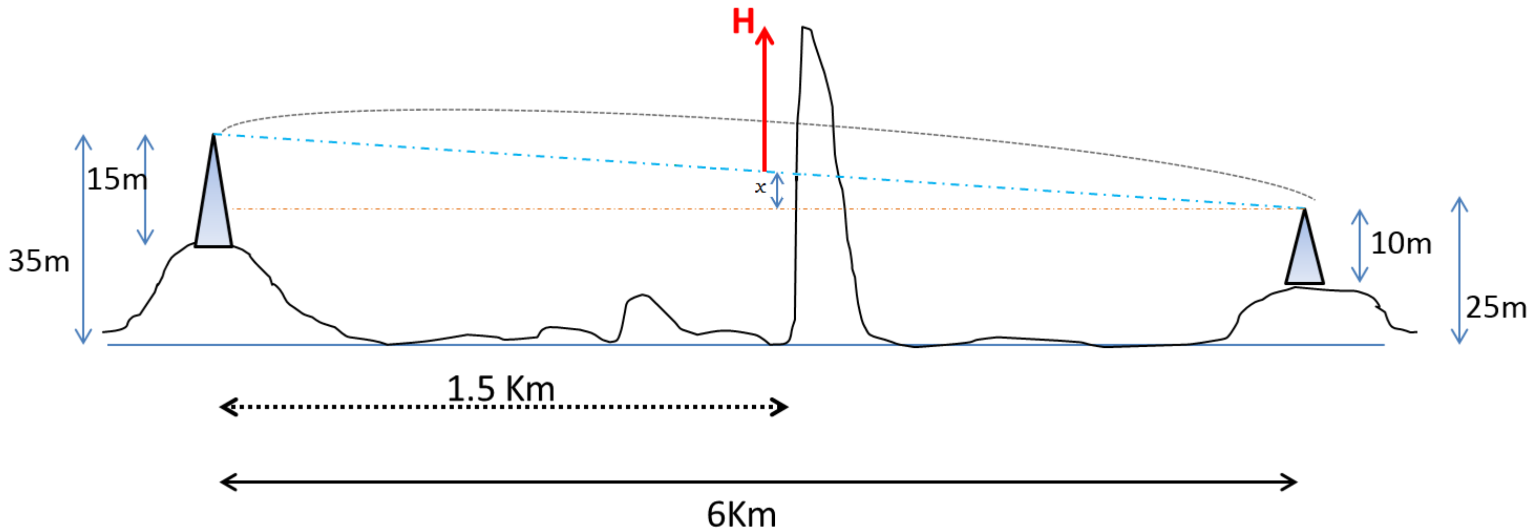
Perda por difração em obstáculos do tipo gume de faca

Difração por Gume de Faca - Exercício

Um rádio enlace entre duas cidades perfaz uma distância de 6km.

A frequência de operação é 450MHz. A antena transmissora está instalada em uma elevação, a 20m acima do nível do mar, em uma torre de 15m. A antena receptora está instalada em uma elevação, a 15m acima do nível do mar, em uma torre de 10m.

No percurso de propagação há um obstáculo simples, do tipo gume de faca, com altura de 100m e que está distante 1500m do transmissor. Determine a atenuação (em dB) devida à presença do obstáculo no percurso de propagação.



Passo 1: Verificar se a propagação é sobre terra plana ou esférica

Conforme vimos, a terra deixa de ser considerada plana quando a distância d a ser percorrida pela onda é tal que $d_{km} > 10\sqrt[3]{\lambda}$, onde d é a distância entre transmissor e receptor, dada em km, e λ é o comprimento de onda, dado em m.

Para o caso em análise,

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8\, m/s}{450 \times 10^6\, Hz} = 0.67m$$

$$d_{km} = 6km < 10\sqrt[3]{0.67} = 8.74km\ ,$$

portanto, podemos considerar condições de terra plana.

Passo 2: Determinar altura total das antenas Tx e Rx

Para propagação em terra plana, consideramos altura total das antenas Tx e Rx conforme

$$h_t = 15m + 20m = 35m$$

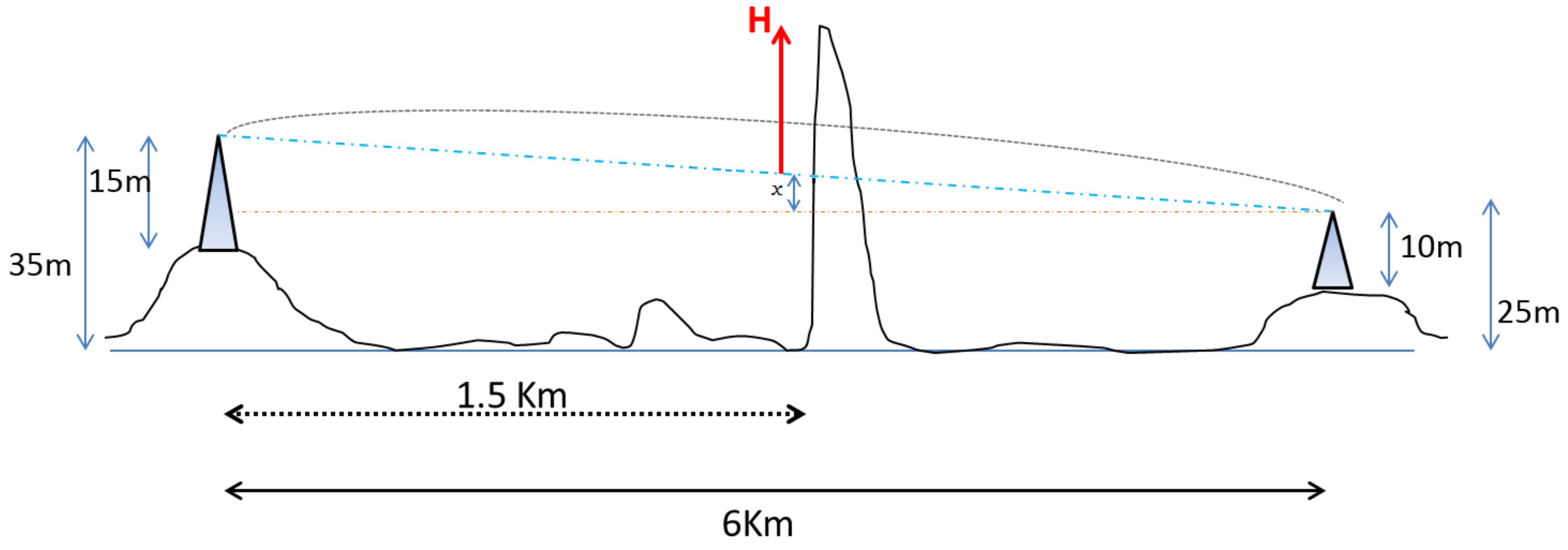
$$h_r = 10m + 15m = 25m$$

Passo 3: Determinar H para o cômputo da Folga de Percurso H/r_1

$$H = altura\ do\ obstáculo\ - altura\ de\ visada$$

$$altura\ do\ obstáculo = 100m$$

$$altura\ de\ visada = 25m + x$$



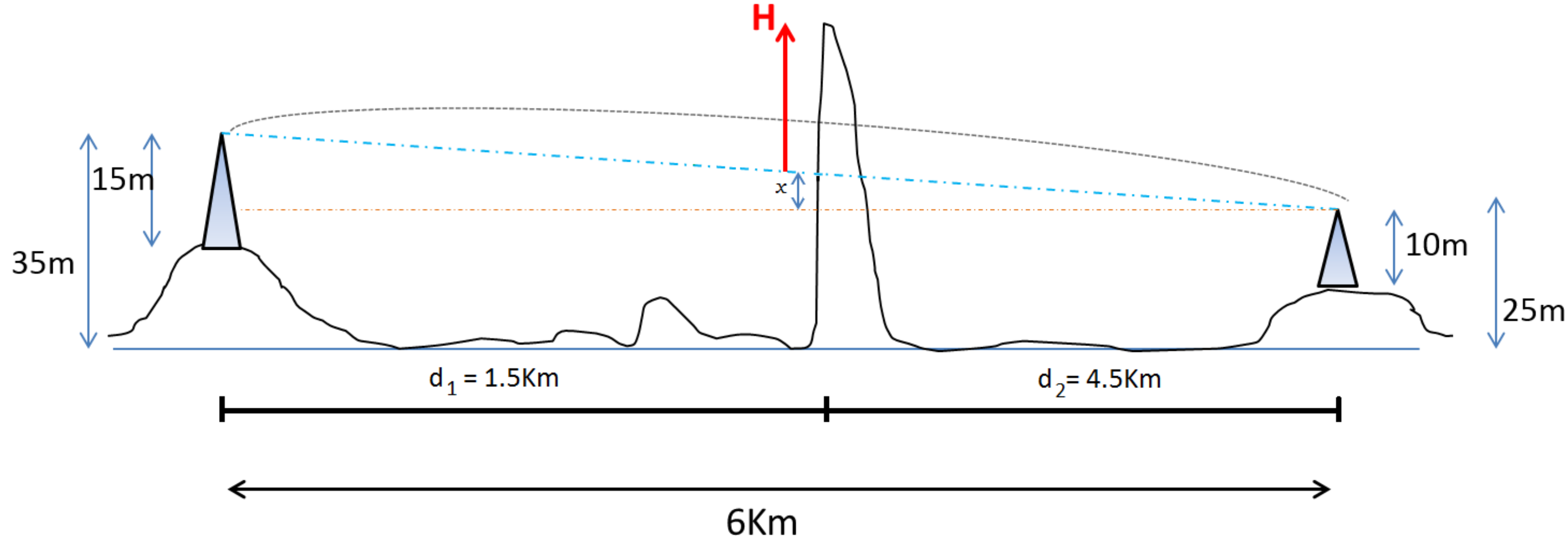
$$altura\ de\ visada = 25m + x$$

A partir da figura, pode-se determinar o valor de x por semelhança de triângulos, conforme

$$\frac{(h_t - h_r)}{d} = \frac{x}{d_2} \longrightarrow \frac{(35m - 25m)}{6000m} = \frac{x}{(6000m - 1500m)} \longrightarrow x = 7.5m$$

Portanto, $altura\ de\ visada = 25m + 7.5m = 32.5m$ e

$$H = altura\ do\ obstáculo\ - altura\ de\ visada = 100m - 32.5m = 67.5m$$



Passo 4: Determinar o primeiro raio de Fresnel (r_1) para o cômputo da Folga de Percurso H/r_1

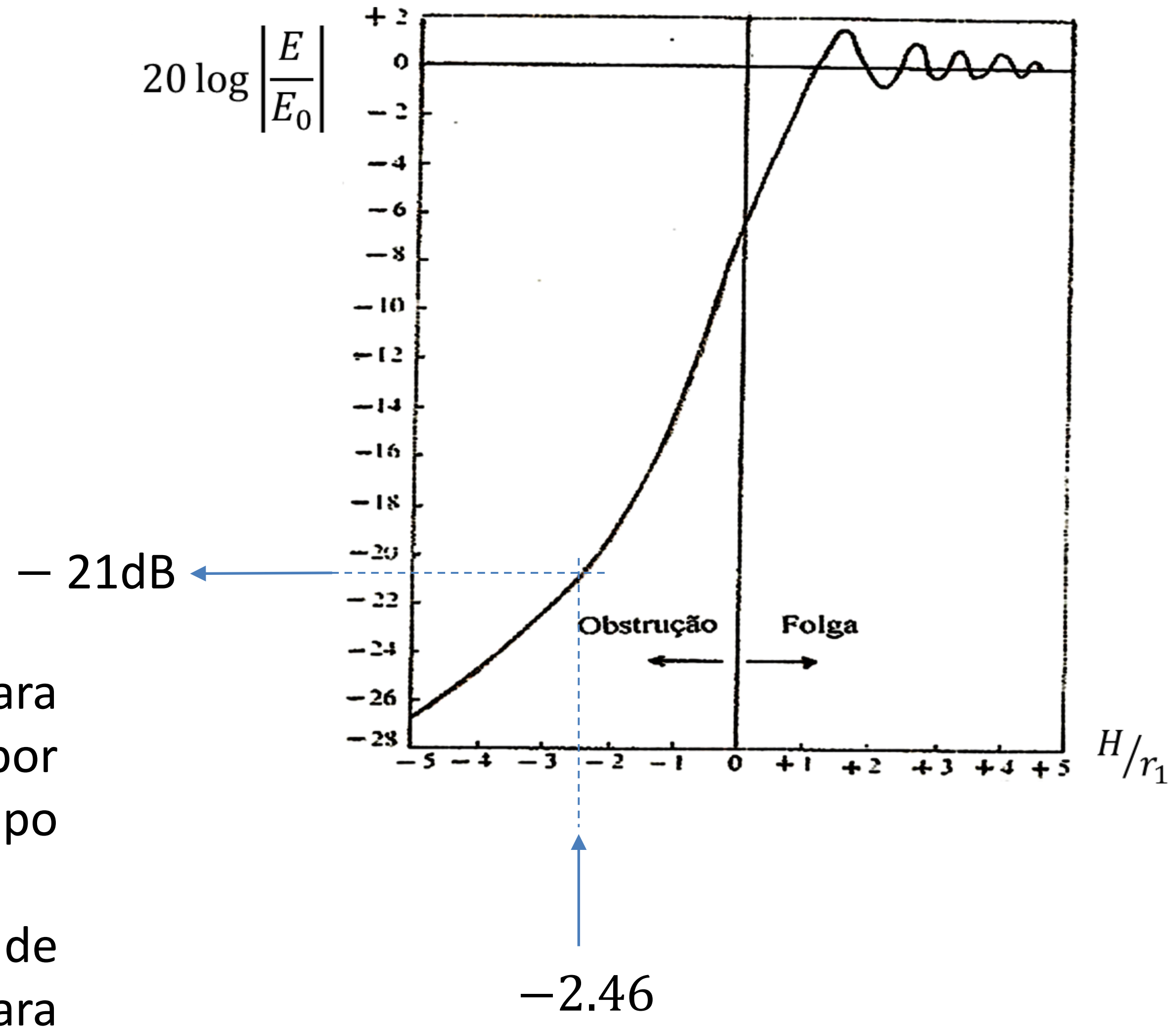
$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}} = \sqrt{\frac{0.67m \times 1500m \times 4500m}{(1500m + 4500m)}} = 27.45m$$

Passo 5: Determinar a Folga de Percurso H/r_1

$$\frac{H}{r_1} = \frac{67.5m}{27.45m} = 2.46$$

Dado que trata-se de obstrução do percurso de propagação, H/r_1 será considerado negativo.

Passo 6: Determinar a perda por efeito de difração em obstáculos do tipo gume de faca



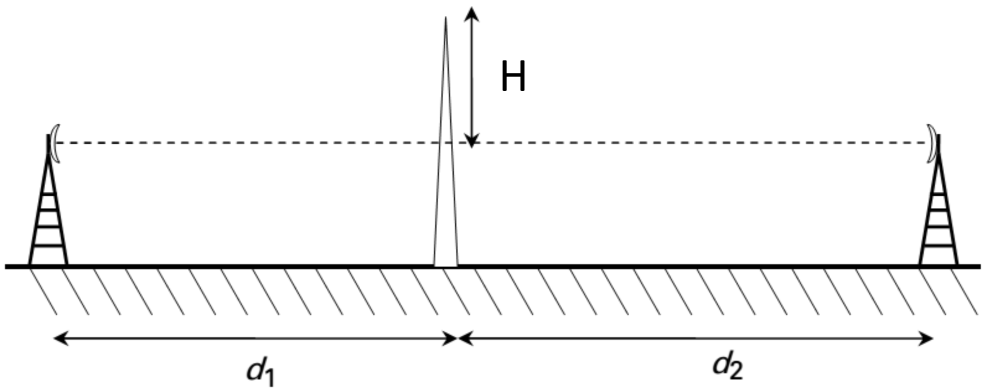
A partir do gráfico para determinação de perda por difração em obstáculos do tipo gume de faca,
obtemos uma atenuação de aproximadamente 21dB para $H/r_1 = -2.46$.

Difração em obstáculo do tipo gume de faca
Múltiplos Obstáculos

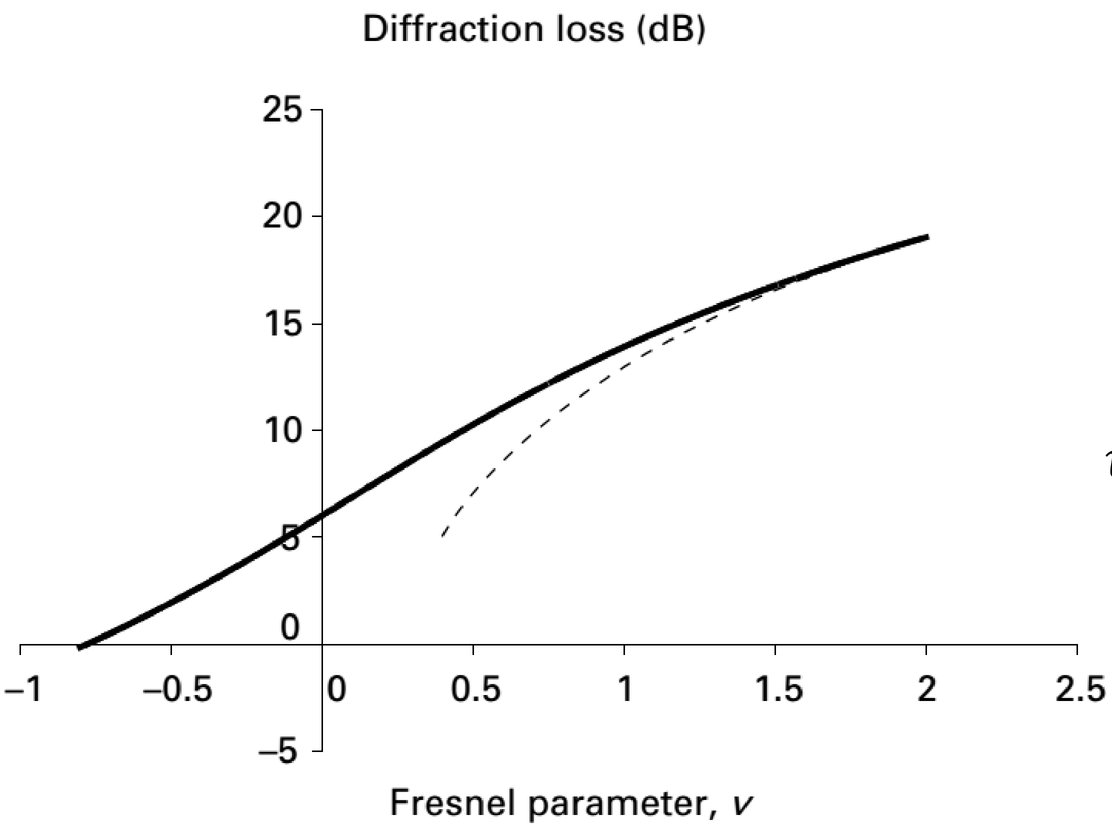
- Há diversos métodos para determinar a atenuação devida a múltiplos obstáculos, por exemplo: Bullington, Epstein-Petersen, Deygout.
- Todos os métodos são aproximações e podem apresentar erros, especialmente quando os obstáculos forem próximos.
- Estudaremos o Método de Deygout.
- Para tanto, inicialmente vamos analisar uma simplificação para determinar a atenuação por um único obstáculo do tipo gume de faca.

- Conforme já vimos, a perda por difração é afetada pela geometria do problema (terreno – obstáculo – altura das antenas), e pela frequência de operação.
- O parâmetro de Fresnel considera todos estes aspectos, e é dado por:

$$v = \pm H\sqrt{\frac{2}{\lambda}\frac{(d_1 + d_2)}{d_1 d_2}} = \pm H\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}$$



- Tendo determinado o parâmetro de Fresnel (v), a atenuação resultante da obstrução pelo obstáculo gume de faca pode ser obtida a partir da curva abaixo, a qual relaciona a perda por difração (em dB) com o parâmetro v:

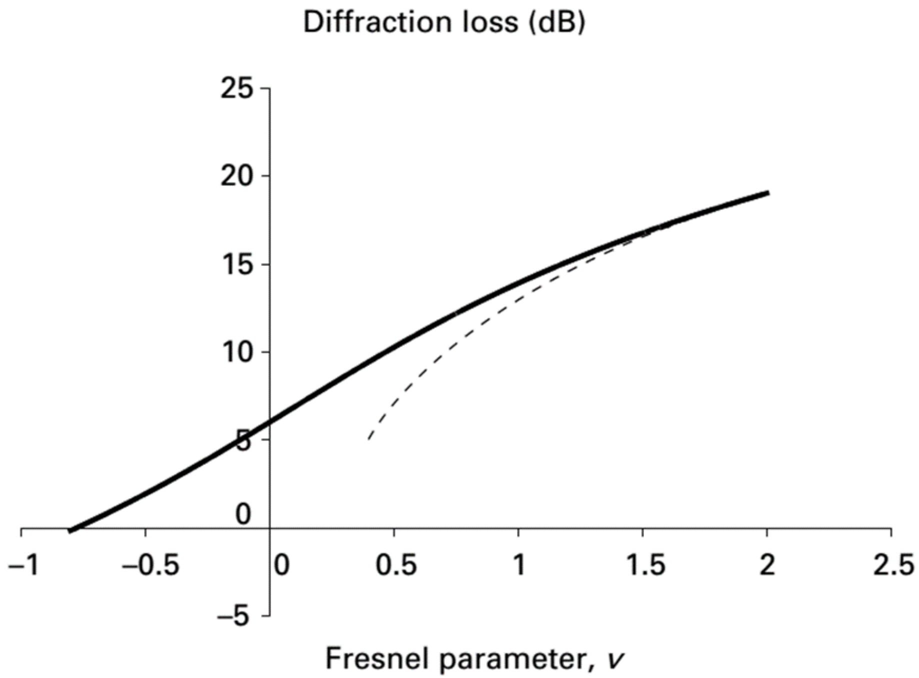


$$v = \pm H\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}\right)}$$

- De forma alternativa, a atenuação por difração pode ser calculada por:

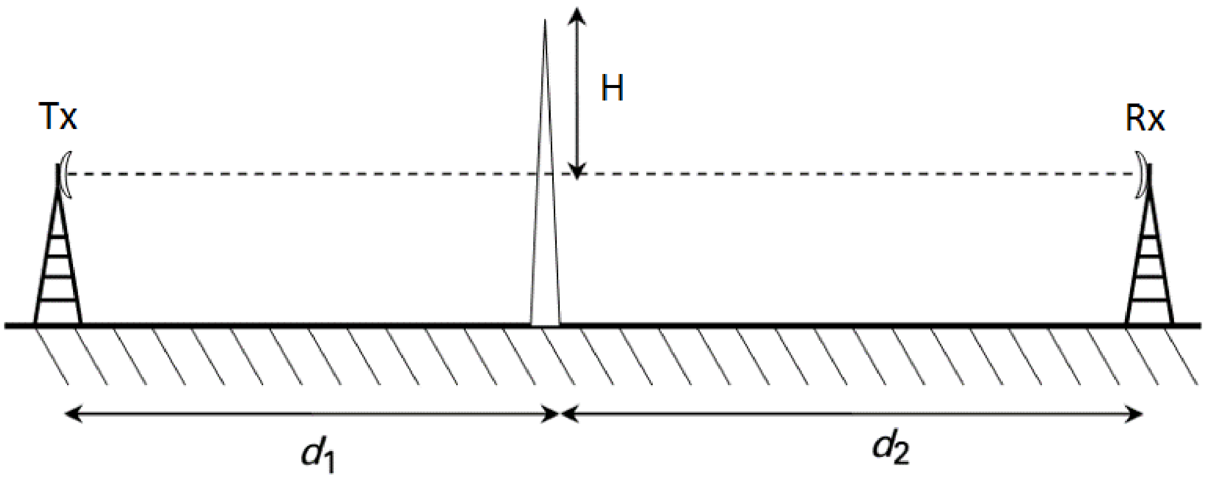
Para $v \succ -0.7$ $\longrightarrow$ $loss = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(v-0.1)^2+1}+v-0.1\right) dB$

Para $v \succ 1.5$ $\longrightarrow$ $loss = 13 + 20\log v\, dB$



Difração por Gume de Faca – Método Alternativo – Exercício

Determine a perda por difração em um único obstáculo do tipo gume de faca, para o link descrito na figura a seguir. Considere as frequências de operação de 1GHz e 10GHz.



$$d_1 = 10km \qquad d_2 = 5km \qquad H = 20m$$

Para $f = 1GHz$:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \, m/s}{1 \times 10^9 \, Hz} = 0.3m$$

$$v = H\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} = 20\sqrt{\frac{2}{0.3}\left(\frac{1}{10000} + \frac{1}{5000}\right)} = 0.89$$

Para $-0.7 < v < 1.5$, $loss = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(v-0.1)^2+1} + v - 0.1\right) dB$

Assim,

$$loss = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(0.89-0.1)^2+1} + 0.89 - 0.1\right) = 13.2 \, dB$$

Para $f = 10GHz$:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8\, m/s}{10 \times 10^9\, Hz} = 0.03m$$

$$v = H\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} = 20\sqrt{\frac{2}{0.03}\left(\frac{1}{10000} + \frac{1}{5000}\right)} = 2.83$$

Para $-0.7 < v < 1.5,\ loss = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1\right) dB$

Assim,

$$loss = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(2.83\ - 0.1)^2 + 1} + 2.83\ - 0.1\right) = 21.92\, dB$$

Note, a partir dos resultados encontrados, que frequências menores sofrem menor atenuação na presença de obstrução.

Para $f = 1GHz, \; loss = 13.2 \; dB$

Para $f = 10GHz, \; loss = 21.92 \; dB$

Portanto, para um dado tamanho de obstáculo, quanto menor for a frequência da onda incidente no obstáculo, menor será a atenuação da onda difratada pelo mesmo.

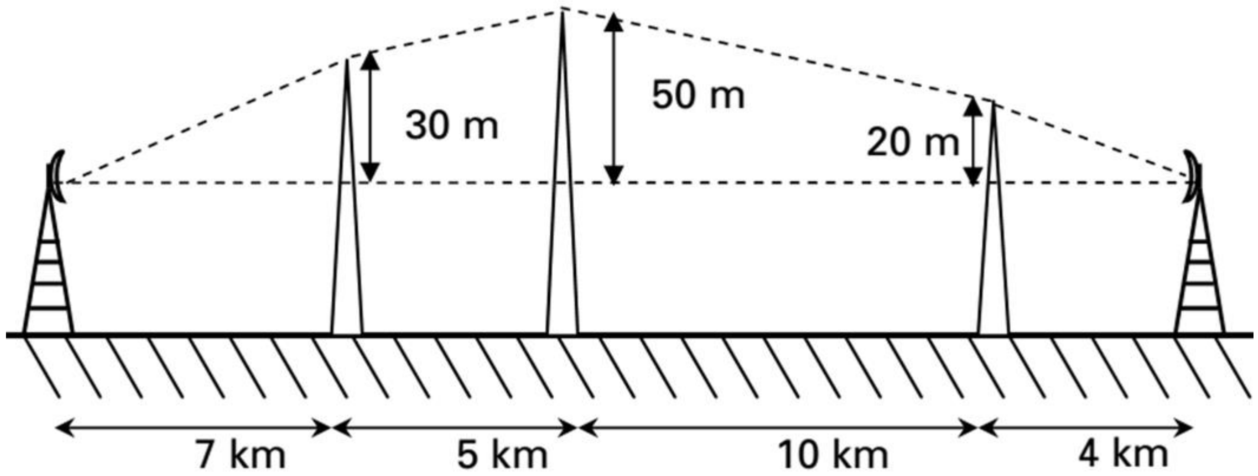
Difração em obstáculo do tipo gume de faca
Múltiplos Obstáculos – O Método de Deygout

- O Método de Deygout consiste em determinar o gume predominante, através da abordagem simplificada que acabamos de analisar para o caso de uma obstrução única por gume de faca.
- O gume predominante é aquele que produz o maior efeito de difração.
- Tendo determinado o gume predominante, calcula-se a perda por difração por efeito deste gume.
- O próximo passo é dividir o link em duas seções, considerando o link dominante como um dos extremos da nova seção de link (Tx ou Rx, conforme for o caso).
- Em cada uma das duas novas seções do link é determinado o gume predominante e a perda por difração por efeito deste gume, e o processo é repetido até que todos os múltiplos obstáculos tenham sido considerados.
- A perda total em dB para o conjunto de obstáculos múltiplos é a soma das perdas obtidas em cada seção.

Difração por Gume de Faca – Método de Deygout – Exercício

Vamos estudar o Método de Deygout a partir de um exemplo, em que iremos determinar a perda total por difração em um cenário de múltiplos obstáculos do tipo gume de faca.

Considere o link descrito na figura a seguir, em que a frequência de operação é 0.6GHz.



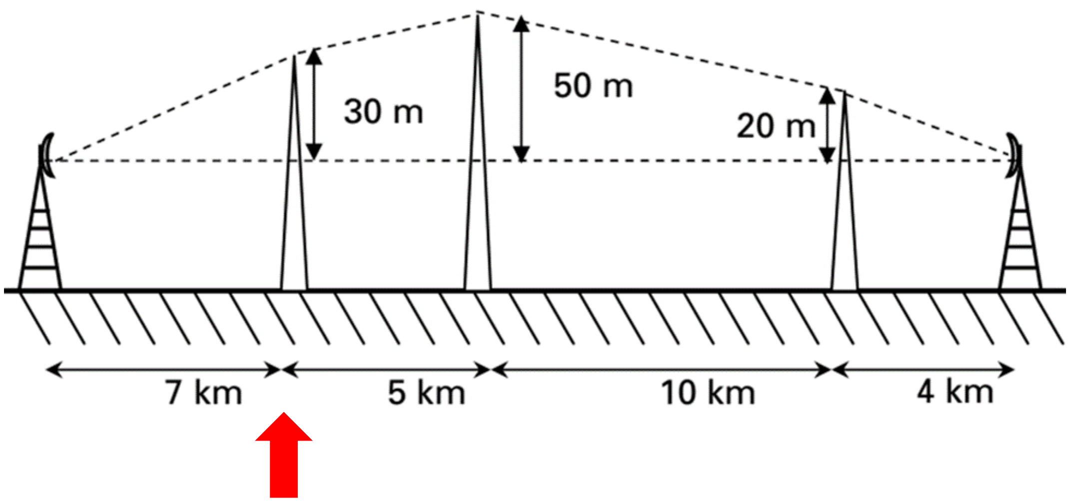
Passo 1: Através do parâmetro de Fresnel, determinar o gume predominante.

Gume 1

$d_1 = 7km$

$d_2 = 19km$

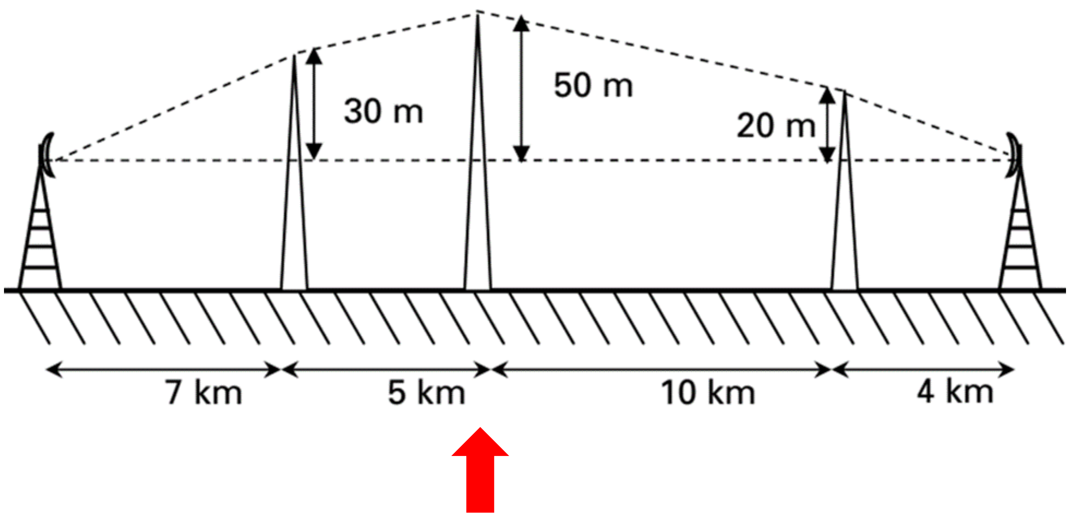
$H_1 = 30m$



$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8\ m/s}{0.6 \times 10^9\ Hz} = 0.5m$$

$$v_1 = H_1\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} = 30\sqrt{\frac{2}{0.5}\left(\frac{1}{7000} + \frac{1}{19000}\right)} = 0.84$$

Gume 2



$$d_1 = 12km$$

$$d_2 = 14km$$

$$H_2 = 50m$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8\ m/s}{0.6 \times 10^9\ Hz} = 0.5m$$

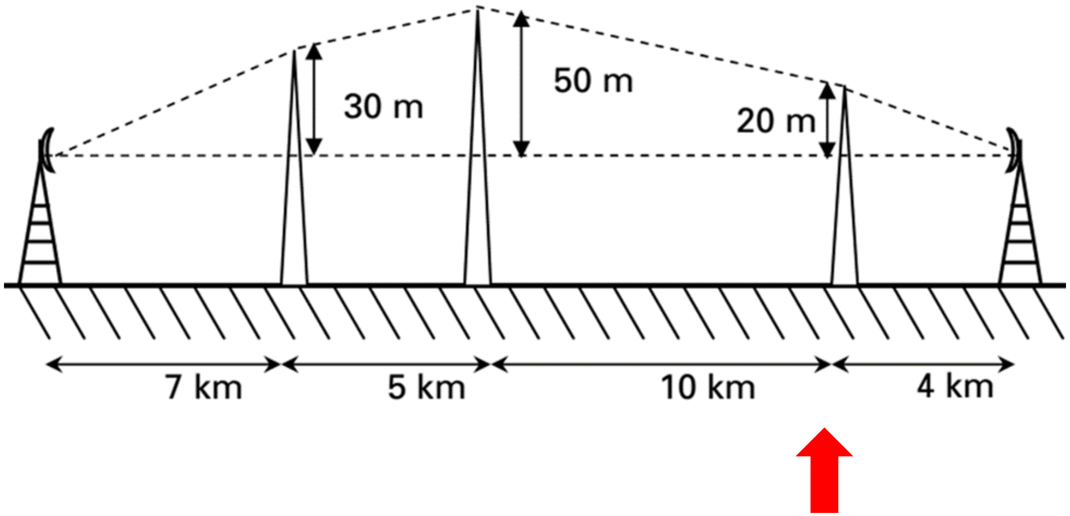
$$v_2 = H_2 \sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} = 50\sqrt{\frac{2}{0.5}\left(\frac{1}{12000} + \frac{1}{14000}\right)} = 1.24$$

Gume 3

$$d_1 = 22km$$

$$d_2 = 4km$$

$$H_3 = 20m$$



$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8\, m/s}{0.6 \times 10^9\, Hz} = 0.5m$$

$$v_3 = H_3 \sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} = 20 \sqrt{\frac{2}{0.5}\left(\frac{1}{22000} + \frac{1}{4000}\right)} = 0.69$$

O gume dominante é aquele que apresenta o <u>maior valor para o Parâmetro de Fresnel</u> (v):

$v_1 = 0.84 \qquad v_2 = 1.24 \qquad v_3 = 0.69$

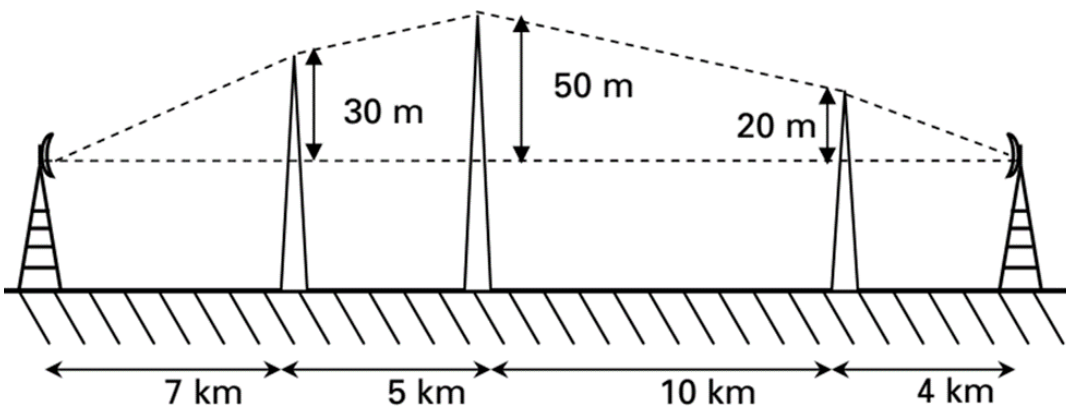
Portanto, o gume dominante será:

$d_1 = 12km$

$d_2 = 14km$

$H_2 = 50m$

$v_2 = 1.24$



gume dominante

Passo 2: Determinar a atenuação devida ao gume predominante.

Para $v \succ -0.7$ $\longrightarrow$ $loss = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(v-0.1)^2+1}+v-0.1\right) dB$

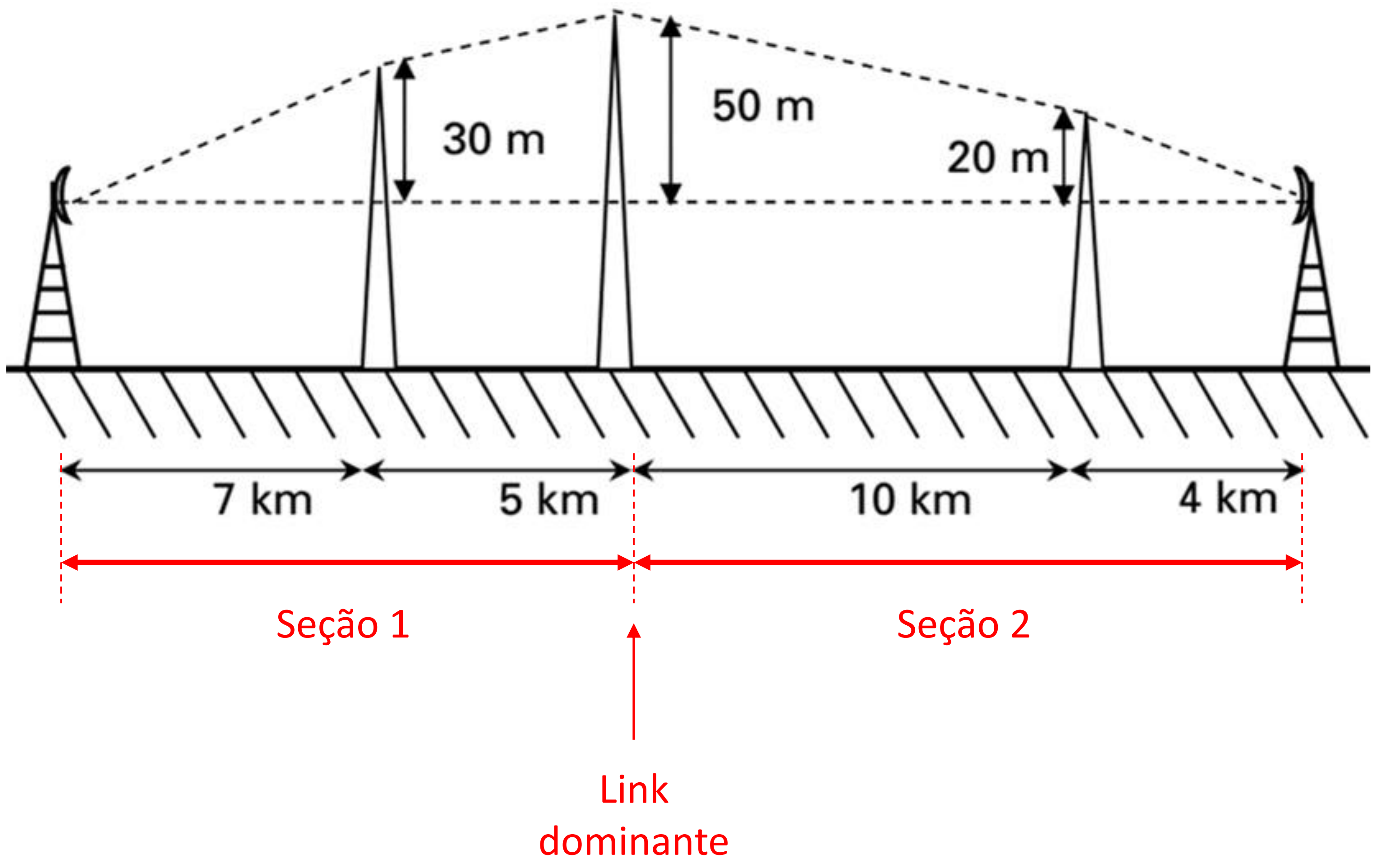
Para $v \succ 1.5$ $\longrightarrow$ $loss = 13 + 20\log v\, dB$

A perda por difração, considerando apenas o gume dominante é:

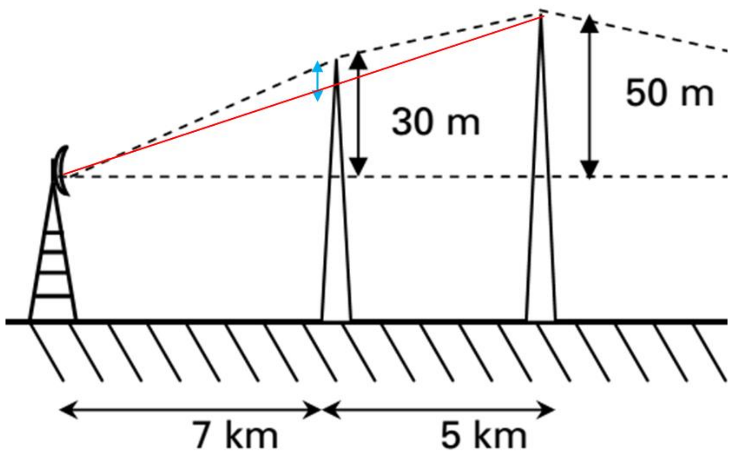
Para $-0.7 < v < 1.5$,

$$loss = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(1.24-0.1)^2+1}+1.24-0.1\right) = 15.39dB$$

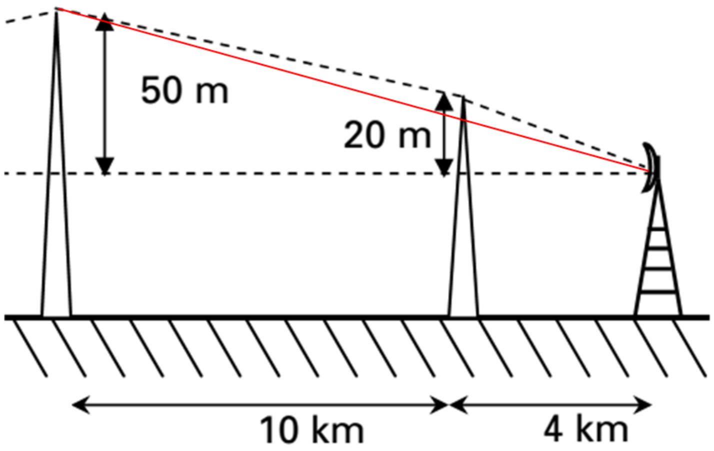
Passo 3: Dividir o link em duas seções, considerando o gume dominante como um dos extremos de cada nova seção de link (como se fosse um Tx virtual ou um Rx virtual).



Passo 4: Para cada nova seção do link é determinado o gume predominante e a perda por difração por efeito deste gume, e o processo é repetido até que todos os múltiplos obstáculos tenham sido considerados.

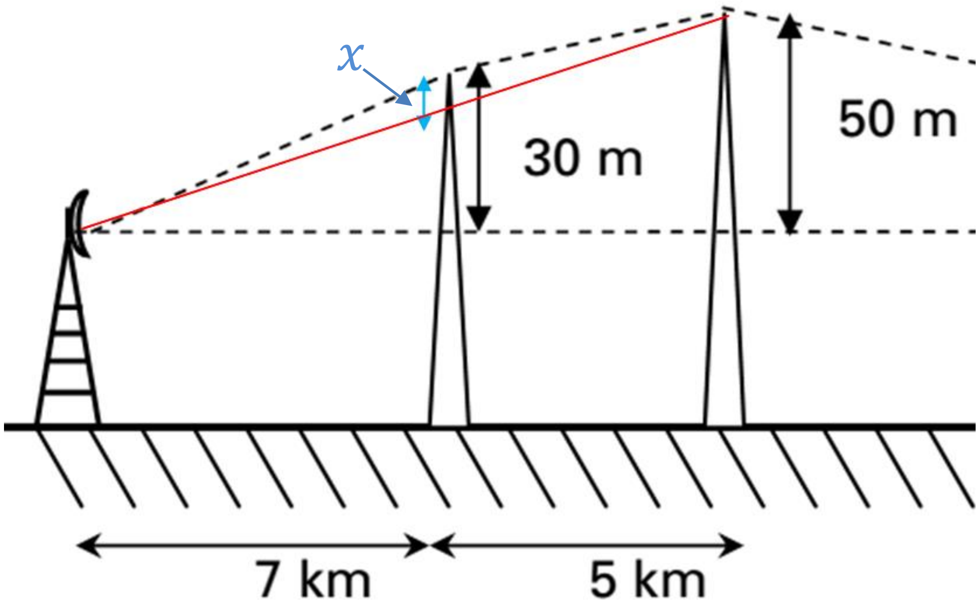


Seção 1



Seção 2

Determinação da atenuação por gume de faca para a Seção 1:

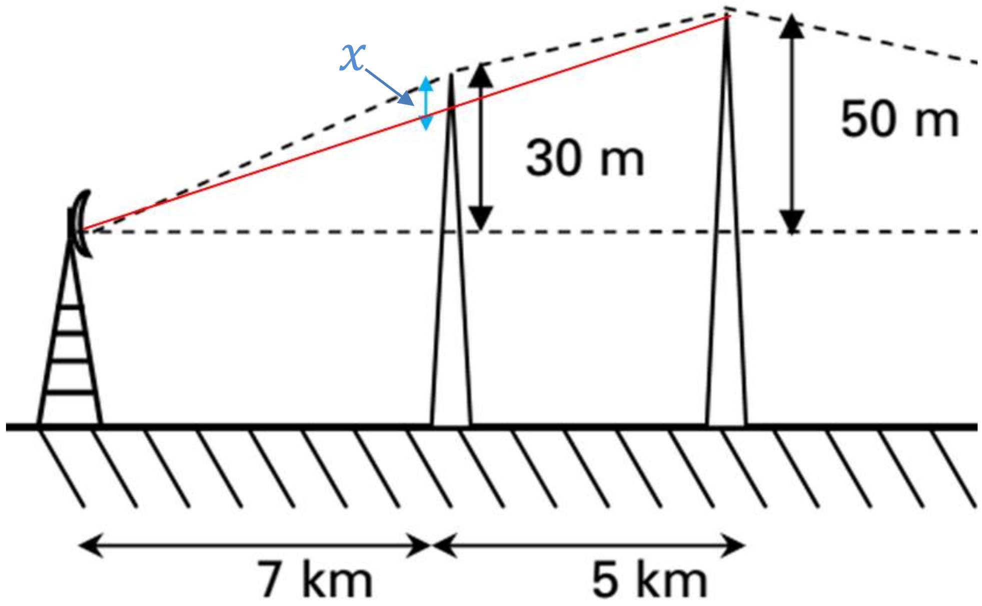


$$Hs1 = altura\ do\ obstáculo\ - altura\ de\ visada$$

$$altura\ do\ obstáculo = 30m$$

$$altura\ de\ visada = x$$

A partir da figura, pode-se determinar o valor de x por semelhança de triângulos, conforme



$$\frac{50m}{12000m} = \frac{x}{7000m} \longrightarrow x = 29.17m$$

Portanto, $altura\ de\ visada = 29.17m$ e

$$Hs1 = altura\ do\ obstáculo\ - altura\ de\ visada = 30m - 29.17m = 0.83m$$

O parâmetro de Fresnel é, então, dado por:

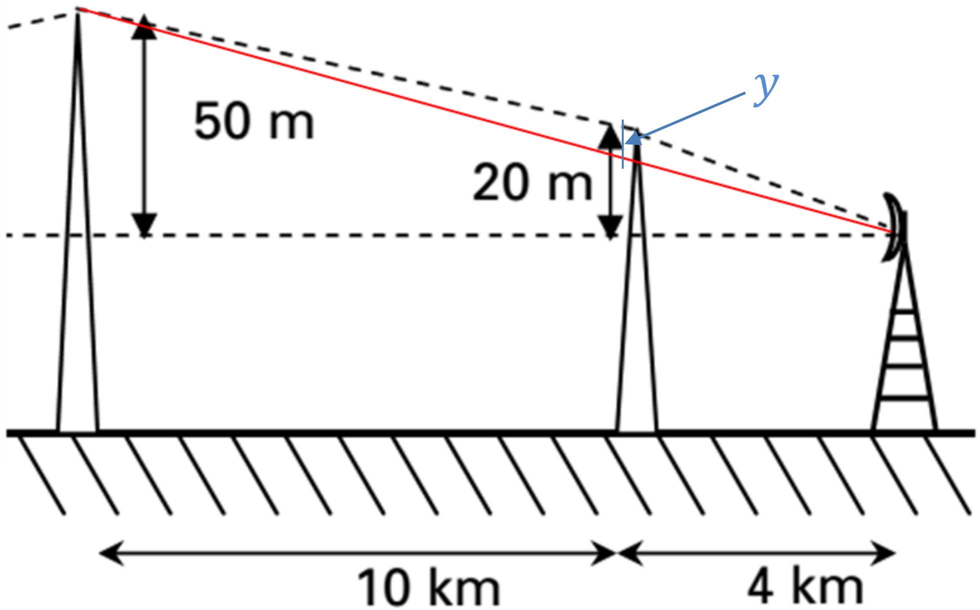
$$v_{s1} = H_{s1}\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} = 0.83\sqrt{\frac{2}{0.5}\left(\frac{1}{7000} + \frac{1}{5000}\right)} = 0.031$$

A perda por difração é assim obtida:

Para $-0.7 < v < 1.5$,

$$loss_{s1} = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(0.031 - 0.1)^2 + 1} + 0.031 - 0.1\right) = 6.3dB$$

Determinação da atenuação por gume de faca para a Seção 2:

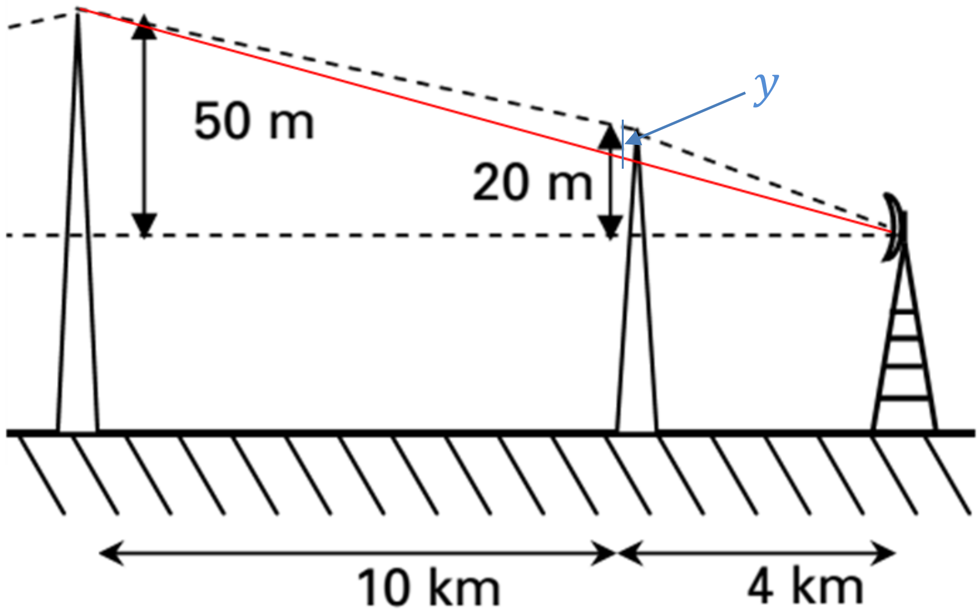


$$Hs2 = altura\ do\ obstáculo\ - altura\ de\ visada$$

$$altura\ do\ obstáculo = 20m$$

$$altura\ de\ visada = y$$

A partir da figura, pode-se determinar o valor de y por semelhança de triângulos, conforme



$$\frac{50m}{14000m} = \frac{y}{4000m} \longrightarrow y = 14.29m$$

Portanto, $altura\ de\ visada = 14.29m$ e

$$Hs2 = altura\ do\ obstáculo - altura\ de\ visada = 20m - 14.29m = 5.71m$$

O parâmetro de Fresnel é, então, dado por:

$$v_{s2} = H_{s2}\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}\right)} = 5.71\sqrt{\frac{2}{0.5}\left(\frac{1}{10000}+\frac{1}{4000}\right)} = 0.2136$$

A perda por difração, é assim obtida:

Para $-0.7 < v < 1.5$,

$$loss_{s2} = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(0.2136 - 0.1)^2+1} + 0.2136 - 0.1\right) = 7.88dB$$

Passo 5: A perda total em dB para o conjunto de obstáculos múltiplos é a soma das perdas obtidas em cada seção.

A perda total por efeito de difração nos múltiplos obstáculos do tipo gume de faca é dada por:

$$\boxed{\begin{gathered} Perda\ total\ por\ difração = \\ Perda\ relativa\ ao\ gume\ dominante\ do\ link + \\ Perda\ relativa\ ao\ gume\ da\ seção\ 1 + \\ Perda\ relativa\ ao\ gume\ da\ seção\ 2 + \end{gathered}}$$

$$Perda\ total\ por\ difração = 15.4 + 6.3 + 7.9 = 29.6dB$$