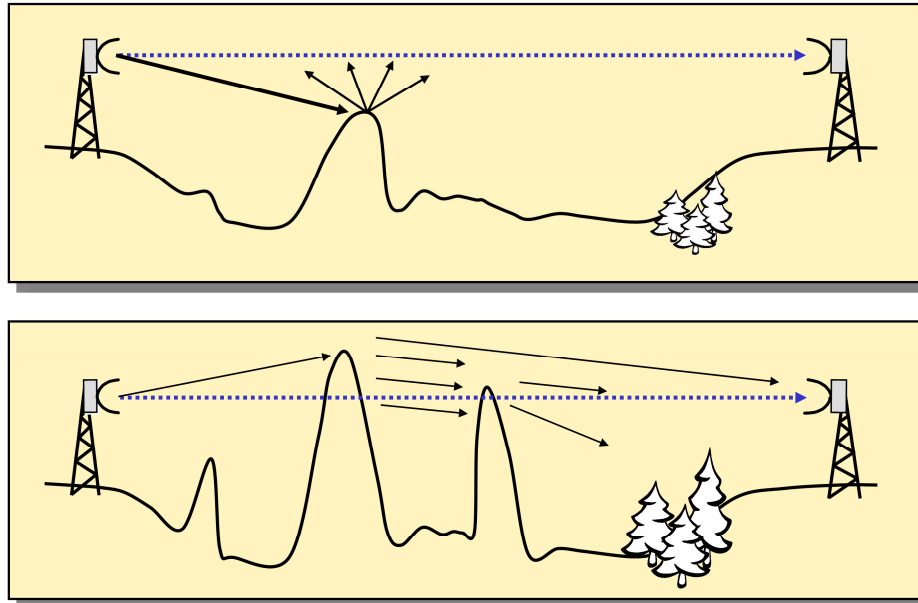


CAPITULO III

Subsídios para Análise e Projeto de Radioenlace em VHF e UHF

Agenda

- **Comunicações nas faixas de VHF e UHF**
 - ✓ Características
 - ✓ Aplicações
- **Considerações sobre a topologia da rota**
 - ✓ Efeitos da refração atmosférica
 - ✓ Conceito de raio terrestre equivalente
 - ✓ Fator K (“índice de refração atmosférica”)
- **Subsídios para projeto**
 - ✓ Influência dos obstáculos
 - ✓ Outras atenuações
 - ✓ Equacionamento do enlace
 - ✓ Margem de fading
- **Estudo de caso**

Comunicações nas faixas de VHF e UHF

Nas faixas de VHF e UHF, o mecanismo principal de propagação é através de Ondas Diretas, com eventual difração em obstáculos. Podem ocorrer Ondas Refletidas, que são indesejáveis, pois geram alterações no campo recebido e na maioria das vezes causa degradação no sinal recebido.

Nota-se a necessidade do conhecimento do “perfil” do terreno, que mostra as variações de altitude do mesmo, em relação ao nível do mar ou a uma outra cota qualquer, ao longo de uma reta que liga as duas estações (sistema ponto a ponto). Na rota mostrada acima vemos

- (a) A altitude das antenas garante a excelente situação de propagação por Onda Direta;
- (b) A presença de obstáculos faz com que a comunicação se faça por difração, devendo-se levar em conta no desempenho do enlace a influência dos mesmos. Verificar-se-á posteriormente que esta situação ocorre na maioria dos radioenlaces operando em VHF e UHF.

Características das faixas de VHF e UHF

- 1) O “fading” é baixo, ou pelo menos menor do que na faixa de HF;
- 2) O ruído externo à antena é baixo, fazendo com que a sensibilidade do receptor possa ser elevada; além do mais, os critérios de desempenho do radioenlace serão mais dependentes do ruído interno (equipamento), mais “controlável” nos cálculos, e mais em função da qualidade do equipamento do que de causas naturais;
- 3) As duas características anteriores asseguram operação com grande qualidade e confiabilidade;

Características das Faixas de VHF e UHF

- 1) O “fading” é baixo, ou pelo menos menor do que na faixa de HF;
- 2) O ruído externo à antena é baixo, fazendo com que a sensibilidade do receptor possa ser elevada; além do mais, os critérios de desempenho do radioenlace serão mais dependentes do ruído interno (equipamento), mais “controlável” nos cálculos, e mais em função da qualidade do equipamento do que de causas naturais;
- 3) As duas características anteriores asseguram operação com grande qualidade e confiabilidade;

Características das faixas de VHF e UHF

www.inatel.br

- 4) A capacidade dos sistemas já pode ser grande, pois a frequência da portadora é maior e as condições de ruído e “fading” proporcionam baixa degradação do sinal transmitido;
- 5) As antenas já são de ganho (e diretividade) razoável, bem como de tamanho pequeno; isto proporciona barateamento das instalações, na infraestrutura necessária e na potência de transmissão;
- 6) Como existe apreciável atenuação após o horizonte visual, ocorre pouca possibilidade de interferência a longas distâncias; isto permite o compartilhamento da faixa por muitos usuários e serviços;

- 4) A capacidade dos sistemas já pode ser grande, pois a frequência da portadora é maior e as condições de ruído e “fading” proporcionam baixa degradação do sinal transmitido;
- 5) As antenas já são de ganho (e diretividade) razoável, bem como de tamanho pequeno; isto proporciona barateamento das instalações, na infraestrutura necessária e na potência de transmissão;
- 6) Como existe apreciável atenuação após o horizonte visual, ocorre pouca possibilidade de interferência a longas distâncias; isto permite o compartilhamento da faixa por muitos usuários e serviços;

Características das faixas de VHF e UHF

7) A propagação é muito dependente das condições topográficas, podendo ocorrer com facilidade atenuação ou mesmo obstrução da onda; tal fato, aliado ao de que as distâncias por lance são relativamente pequenas (dezenas de quilômetros), fazem com que eventualmente seja necessária a utilização de estações repetidoras.

7) A propagação é muito dependente das condições topográficas, podendo ocorrer com facilidade atenuação ou mesmo obstrução da onda; tal fato, aliado ao de que as distâncias por lance são relativamente pequenas (dezenas de quilômetros), fazem com que eventualmente seja necessária a utilização de estações repetidoras.

Aplicações típicas das faixas de VHF e UHF

1. Comunicação a curtas e médias distâncias (centenas de quilômetros), em serviços ponto-a-ponto ou ponto-área (multiponto), com confiabilidade elevada;
2. Radiodifusão local de alta qualidade (geralmente em FM);
3. Serviços locais de televisão; com a utilização de repetidores e retransmissores, televisão a longas distâncias;
4. Telefonia celular, etc.

Aplicações Típicas das Faixas de VHF e UHF

1. Comunicação a curtas e médias distâncias (centenas de quilômetros), em serviços ponto-a-ponto ou ponto-área (multiponto), com confiabilidade elevada;
2. Radiodifusão local de alta qualidade (geralmente em FM);
3. Serviços locais de Televisão; com a utilização de repetidores e retransmissores, televisão a longas distâncias;
4. Telefonia Celular, etc.

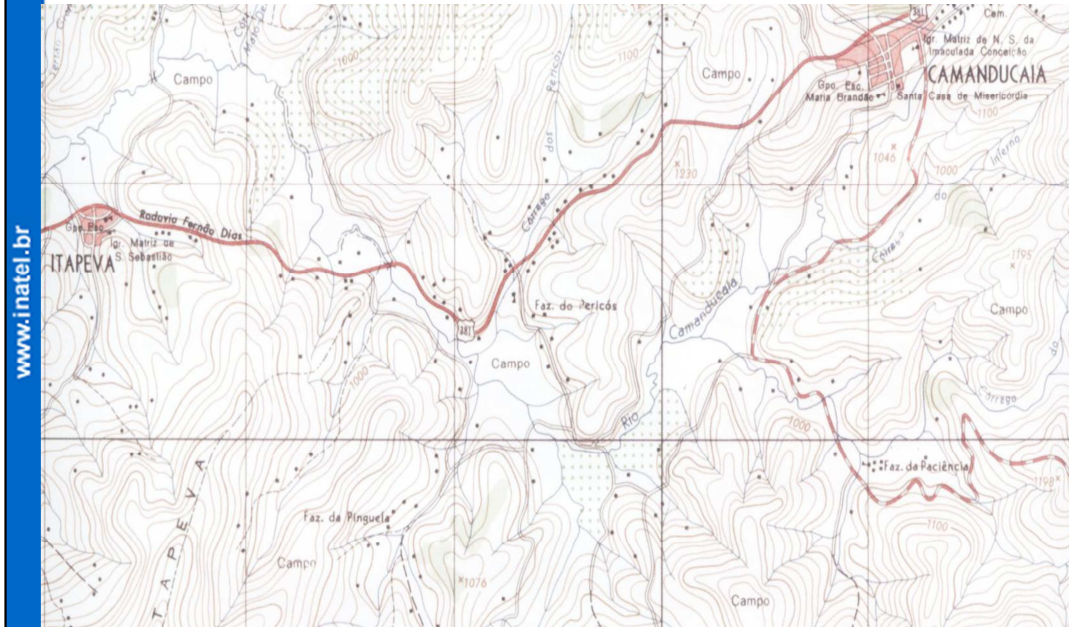
Nas aplicações gerais acima citadas, existe uma grande quantidade de serviços, como serviço móvel (terrestre, aéreo e marítimo – este, em áreas de porto), radionavegação aeronáutica, telefonia de média e grande capacidade, telefonia rural, etc.

De modo geral, a faixa de VHF e UHF apresentam condições favoráveis para grande utilização pois tem nas características de propagação e pode ser operada com equipamento a um custo razoável. Para consolidar tal afirmação, o sistema de modulação geralmente utilizado é o angular (modulação em frequência ou fase) e em sistemas de grande capacidade, modulações digitais.

Agenda

- **Comunicações nas faixas de VHF e UHF**
 - ✓ Características
 - ✓ Aplicações
- **Considerações sobre a topologia da rota**
 - ✓ Efeitos da refração atmosférica
 - ✓ Conceito de raio terrestre equivalente
 - ✓ Fator K (“índice de refração atmosférica”)
- **Subsídios para projeto**
 - ✓ Influência dos obstáculos
 - ✓ Outras atenuações
 - ✓ Equacionamento do enlace
 - ✓ Margem de fading
- **Estudo de caso**

O Perfil do terreno



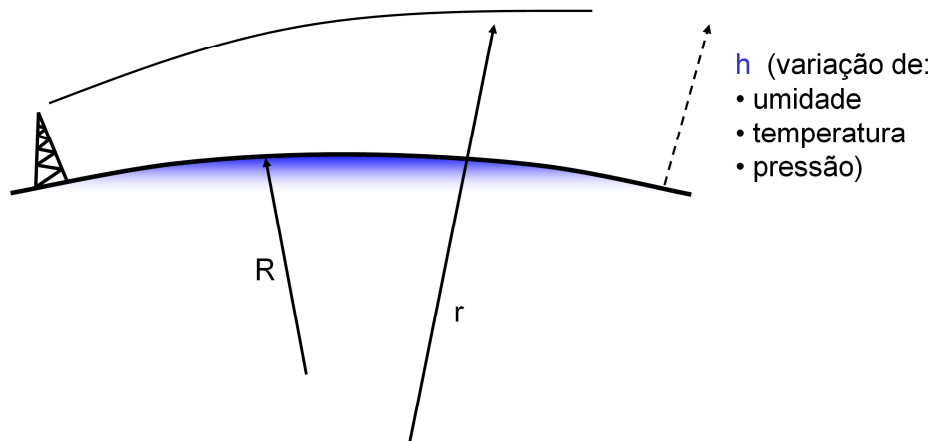
Como já foi comentado, para um radioenlace operando em VHF e nas faixas de frequências superiores (menos comunicação por satélite), o perfil do terreno é ponto importante para avaliar-se o desempenho da rota.

Tal perfil representa a altitude de cada ponto do relevo, ao longo da rota, em relação ao nível do mar ou em relação a uma cota determinada. Para ser traçado, é preciso ter em mãos:

- Um mapa que contenha curvas de nível, com boa precisão, para que possam ser avaliadas as cotas dos pontos a considerar;
- Um papel próprio para traçado do perfil, que leve em consideração o “encurvamento” da onda, provocado pela refração atmosférica.

O mapa geralmente utilizado é do tipo editado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), na escala de 1:50000 ou 1:1000000. Tais mapas, levantados por Aerofotogrametria, apresentam curvas de nível equidistantes de 20 metros ou 50 metros.

Efeitos da refração atmosférica



R → Raio real da Terra ≈ 6368 Km

r → Raio efetivo da onda que se propaga

O papel próprio para o traçado do perfil leva em conta o efeito da refração atmosférica, de modo que o trajeto do sinal possa ser representado por uma linha reta. Para tal, ele é traçado em função do “raio equivalente” da Terra, dado por:

$$R' = K \times R$$

Em que:

R → raio real (geométrico) na Terra, de valor igual a 6368 Km

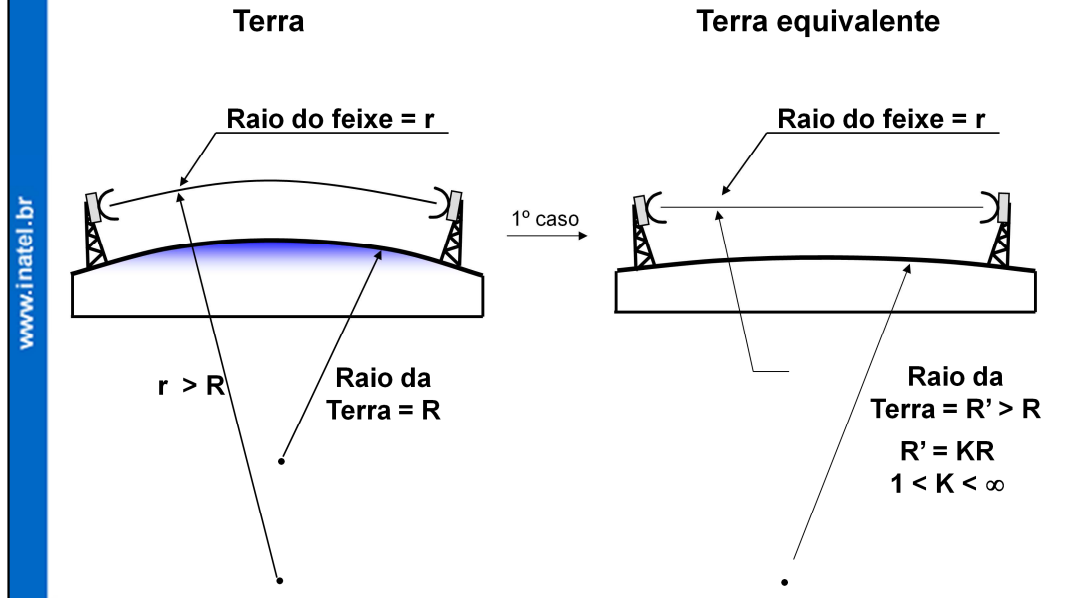
K → coeficiente que leva em conta a refração atmosférica

R' → raio da Terra equivalente

O valor de K é usualmente 4/3 para rotas em VHF, mas pode alcançar outros valores, menores ou maiores. Para radioenlaces nas faixas de UHF e SHF, muitas vezes utiliza-se papel para K=1 ou K=2/3.

De qualquer forma, o conhecimento do k predominante na região onde se implantará um sistema diminui em muito a possibilidade de “fading” longo por deflexão ou mesmo obstrução da onda.

Conceito do raio terrestre equivalente



Na análise da propagação da onda na atmosfera, usa-se o artifício de considerar o feixe sem curvatura, aumentando-se entretanto o raio da terra. Dessa forma tem-se o feixe representado em linha reta (linha de visada) e a curvatura da terra diminuída (raio aumentado). O novo raio da terra considerado (R') é chamado de raio equivalente.

Este artifício facilita o trabalho de projeto das ligações, pois se pode considerar a onda que se propaga entre as antenas através de um feixe retilíneo. Existem na prática cartas especiais desenhadas com a curvatura da terra para o valor de raio equivalente adequado, sendo o perfil do relevo do terreno entre as antenas desenhado nessas cartas.

O caso representado acima corresponde a **situação usual** em que o índice de refração decresce com a altura de modo que o raio de curvatura do feixe é *maior* que o raio de curvatura da terra. Nesta situação existe um aumento do alcance da ligação em relação à linha de visada ótica.

Determinando o fator K

Índice de refração atmosférica:

$$(N-1) \cdot 10^6 = \frac{79 \cdot P}{T} - \frac{11 \cdot V}{T} + \frac{3,8 \cdot 10^5 V}{T^2} \quad \text{fórmula empírica} \quad \text{Eq. 1}$$

P → pressão em milibares (1 mm Hg ≈ 1,333 mb)

T → temperatura em Kelvin (273 °K + 0°)

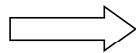
V → pressão do vapor d'água em milibares

Na superfície da Terra, normalmente:

P = 1000 mb

T = 300 K

V = 10 mb

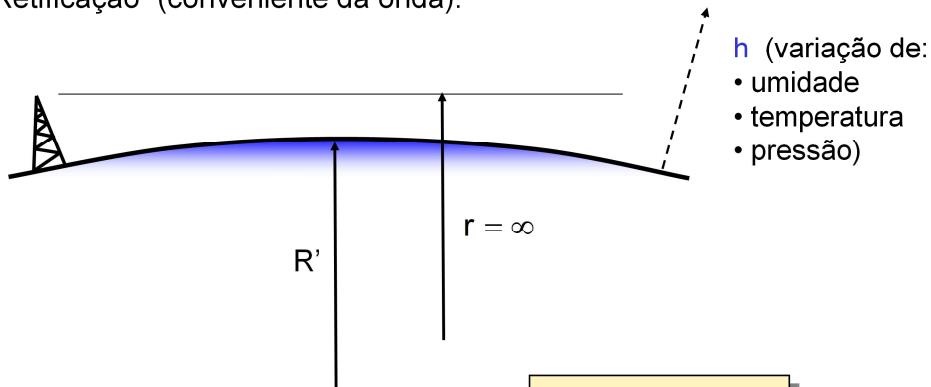


$$(N-1) = 300 \cdot 10^{-6}$$

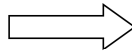
O encurvamento da onda é provocado pela variação de N com a altura.

Determinando o fator K

“Retificação” (conveniente da onda):



R' (raio equivalente)



$$R' = \frac{R}{1 + R \frac{dN}{dh}}$$

Equação 2

Retificação da onda de forma que o trajeto do sinal possa ser representado por uma linha reta. Para tal, ele é traçado em função do “raio equivalente” da Terra, como mostrado acima.

Determinando o fator K

Pode-se definir o fator K (“índice de refração atmosférica”) por:

$$K = \frac{R'}{R}$$

equação 3

Logo, substituindo a equação 2 em 3:

$$K = \frac{1}{1 + R \frac{dN}{dh}}$$

equação 4

Determinando o fator K

Como em condições normais dN/dh é negativo, geralmente $K > 1$.
Um valor padrão, para climas temperados, é:

$$K = \frac{4}{3}$$

Com isso o raio da Terra equivalente fica:

$$R' = \frac{4}{3} \cdot 6368(\text{Km}) \cong 8500(\text{Km})$$

Atmosfera Padrão

A atmosfera padrão é caracterizada por uma **variação linear** de N com a altura h:

$$N \cong N_0 + \beta h \quad \text{em que} \quad \beta = \frac{dN}{dh}$$

No caso,

$$\beta = \frac{1}{R} \left(-0,2 + 30 \frac{dV}{dh} - 6 \frac{dT}{dh} \right)$$

0,2 → variação de densidade

Para atmosfera padrão:

$$\frac{dV}{dh} = -0,0033 \text{ milibares/m} \quad \frac{dT}{dh} = -0,009^\circ \text{C/m}$$

Substituindo os valores,

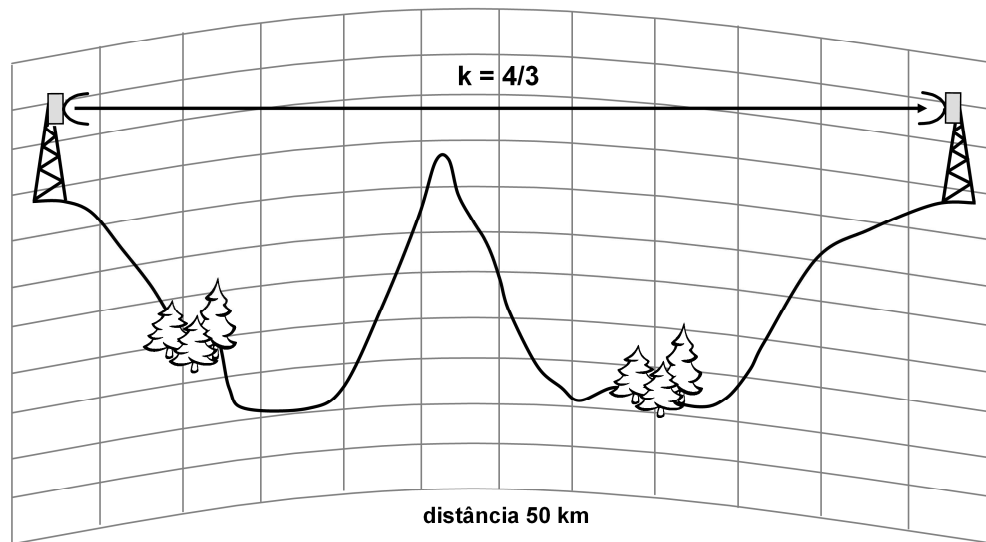
$$\beta = \frac{1}{R} [(-0,2) + (30 \times (-0,0033)) - (6 \times (-0,009))]$$

$$\beta = \frac{1}{4R}$$

Como $\beta = \frac{dN}{dh}$, substituindo na equação de a':

$$R' = \frac{R}{1 + R \left(-\frac{1}{4R} \right)} = \frac{4}{3}R$$

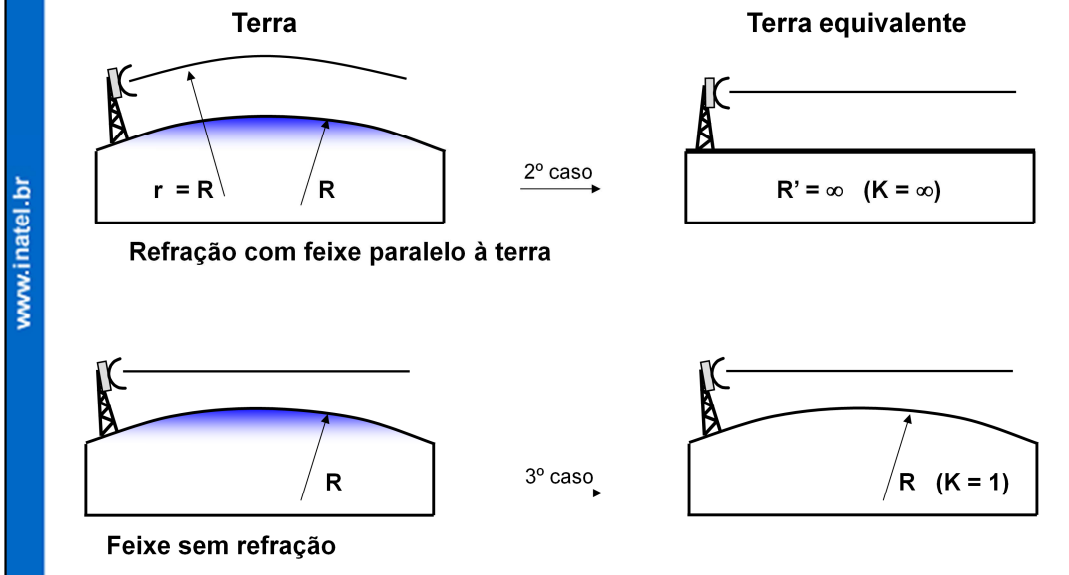
$$K = \frac{4}{3}$$

Conceito do raio terrestre equivalente

A transparência acima ilustra uma carta correspondente a $K = 4/3$ e um desenho de um perfil na mesma.

O valor apresentado $K = 4/3$ decorre de uma certa taxa de decréscimo do índice de refração da atmosfera com a altitude, e define o que se chama de “atmosfera padrão”. Entretanto ocorrem situações em que o índice de refração varia com a altitude de forma bem distinta deste caso, existindo inclusive locais onde durante um certo tempo se observa um aumento do índice de refração com a altitude. A transparência seguinte tratará deste conceito.

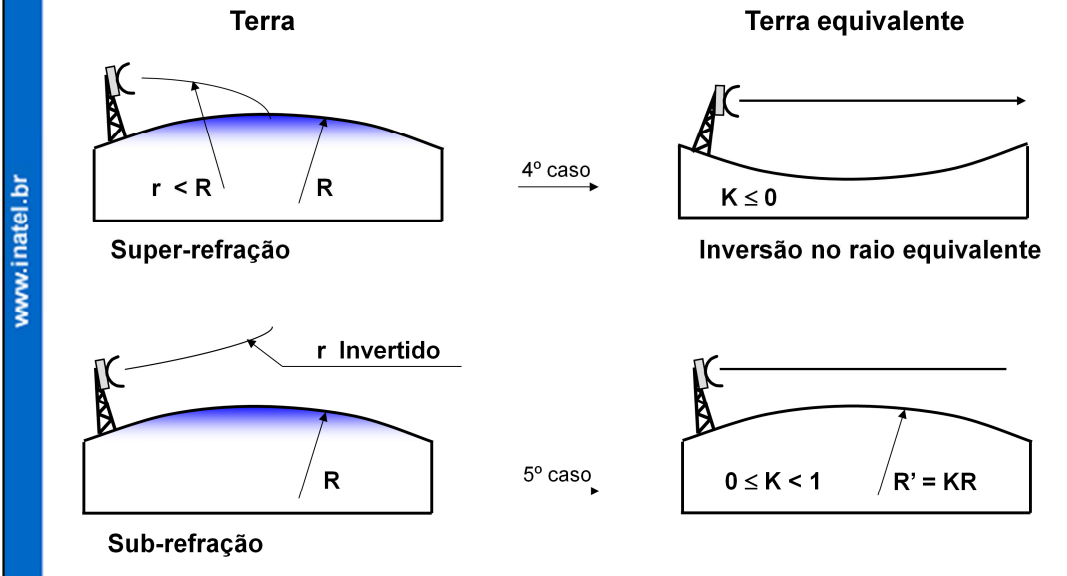
Diferentes casos de refração - 2º e 3º casos



No segundo caso, mostrado acima, tem-se a situação limite em que o índice de refração decresce com a altura de modo que o raio de curvatura do feixe resulta idêntico ao da terra. Nesse caso, o traçado da terra equivalente é tal que $K = \infty$ ($R' = \infty$) e se trabalha com uma superfície terrestre plana. Concluindo, neste caso tem-se **refração com feixe paralelo à terra**.

Na terceira condição limite apresentada, supõe-se o índice de refração constante com a altitude, não sofrendo o feixe, portanto, refração. Para esse caso a terra equivalente não se modifica.

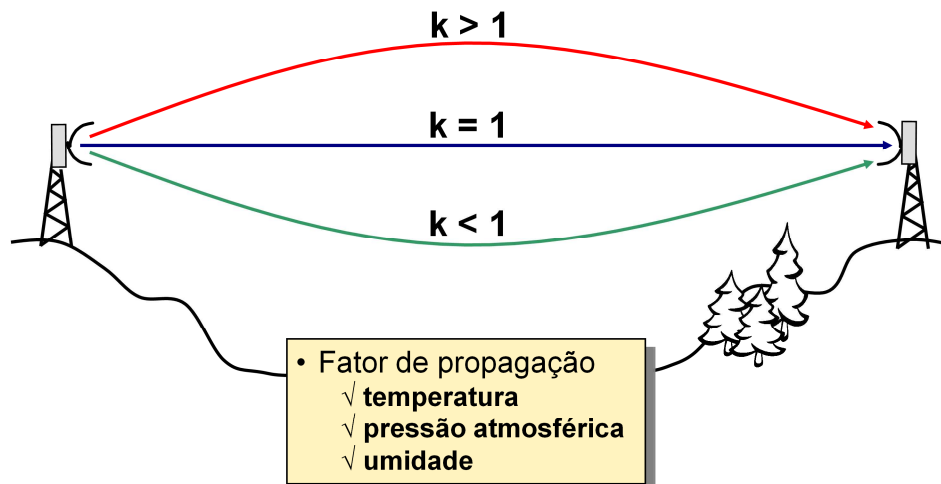
Diferentes casos de refração - 4º e 5º casos



No quarto caso, apresenta o caso em que o índice de refração decresce acentuadamente com a altitude, resultando numa curvatura do feixe *menor* que a curvatura da terra (fenômeno da super-refração). Para esta situação a terra equivalente tem sua curvatura invertida, significando um valor de $K < 0$.

No último caso apresentado há uma inversão do comportamento do índice de refração, o qual cresce com a altitude (fenômeno de sub-refração). Observa-se que o raio é então inclinado para cima. A terra equivalente apresenta uma elevação pronunciada, já que tem-se $K < 1$.

Conclusão



A refração do feixe de microondas altera basicamente a geometria do percurso, isto é, o caminho percorrido pela onda as antenas transmissora e receptora.

Como resultado do encurvamento do feixe, que em geral é variável com o tempo, temos como principais consequências :

- Obstrução parcial das ondas por obstáculos (por exemplo morros);
- Desvio da energia irradiada da antena receptora;
- Anomalias de propagação, citando-se os caso de multipercurso e formação de dutos;
- Modificação nas condições de reflexão da onda.

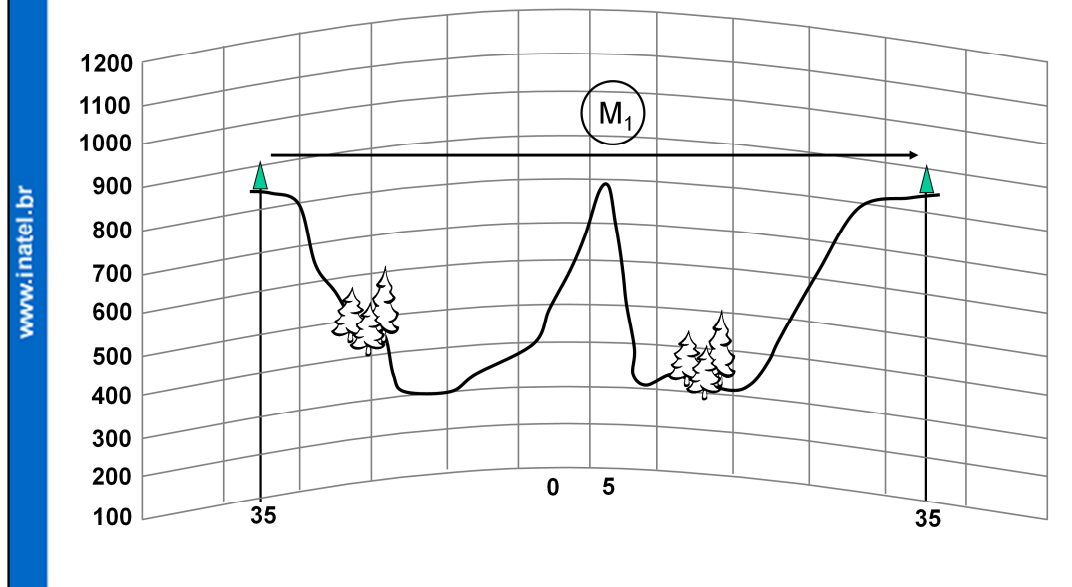
Na prática não existem expressões que permitam calcular a variação exata do índice de refração para as diversas regiões. Dispõe-se de estudos estatísticos para certos tipos de região, as quais fornecem uma idéia do comportamento deste parâmetro.

Como exemplo, numa região de clima temperado o índice de refração varia de tal modo que o valor resultante de K para o traçado da terra equivalente raramente ultrapassa os limites de 0,8 a 2, permanecendo a atmosfera a maior parte do tempo em condições que correspondem a um fator $K = 4/3$, conforme mostrado anteriormente.

Agenda

- **Comunicações nas faixas de VHF e UHF**
 - ✓ Características
 - ✓ Aplicações
- **Considerações sobre a topologia da rota**
 - ✓ Efeitos da refração atmosférica
 - ✓ Conceito de raio terrestre equivalente
 - ✓ Fator K (“índice de refração atmosférica”)
- **Subsídios para projeto**
 - ✓ Influência dos obstáculos
 - ✓ Outras atenuações
 - ✓ Equacionamento do enlace
 - ✓ Margem de fading
- **Estudo de caso**

Influência dos obstáculos (A_o)



Influência dos Obstáculos

Em VHF e UHF, torna-se muito importante a influência dos obstáculos. De fato, pode-se demonstrar que uma região do espaço denominada “1ª Zona de Fresnel”, localizada entre as antenas, define as condições de propagação da rota, em relação aos mesmos.

A “1ª Zona de Fresnel” é um elipsóide, que tem as antenas como focos, e cujo raio em qualquer ponto é dado por:

$$R_f = \sqrt{\lambda \frac{d_1 \times d_2}{d}}$$

Em que: $R_f \rightarrow$ é o raio da “1ª Zona de Fresnel”, em metros;
 $\lambda \rightarrow$ é o comprimento de onda, em metros, dado por:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)}{f(\text{MHz})}$$

$d \rightarrow$ distância entre as antenas em metros;

d_1 e $d_2 \rightarrow$ distâncias, a partir de cada uma das antenas, ao ponto onde é desejado o valor de R , em metros.

Uma fórmula simplificada, de utilização mais fácil, é:

$$R_f = 547 \sqrt{\frac{d_1 \times d_2}{d}}$$

d , d_1 e $d_2 \rightarrow$ mesma definição, mas em quilômetros;

$f \rightarrow$ frequência de operação da rota, em MHz.

Influência dos obstáculos - exemplo

No perfil apresentado no anteriormente, vamos calcular o raio da 1ª zona de Fresnel, para uma frequência de operação de 150 MHz, no ponto em que há uma possível obstrução (M_1). Cada torre tem 20 metros de altura, e as antenas estão no topo da torre.

Cálculo do comprimento de onda:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 (\text{m/s})}{150 \times 10^6 (\text{Hz})} = 2(\text{m}) \quad \lambda = 2(\text{m})$$

Do perfil, observamos que:

$$d = 70(\text{Km}) \quad d_1 = 40(\text{Km}) \quad d_2 = 30(\text{Km})$$

No perfil apresentado no anteriormente, vamos calcular o raio da 1ª Zona de Fresnel, para uma frequência de operação de 150 MHz, no ponto em que há uma possível obstrução (M_1). Cada torre tem 20 metros de altura, e as antenas estão no topo da torre.

Cálculo do comprimento de onda:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 (\text{m/s})}{150 \times 10^6 (\text{Hz})} = 2(\text{m})$$

Do perfil observamos que:

$$d = 70(\text{Km}) \quad d_1 = 40(\text{Km}) \quad d_2 = 30(\text{Km})$$

Influência dos obstáculos - exemplo

Logo podemos calcular a 1ª zona de Fresnel:

$$R_f = 547 \sqrt{\frac{40 \times 30}{150 \times 70}}$$
$$R_f = 184,9(\text{m})$$

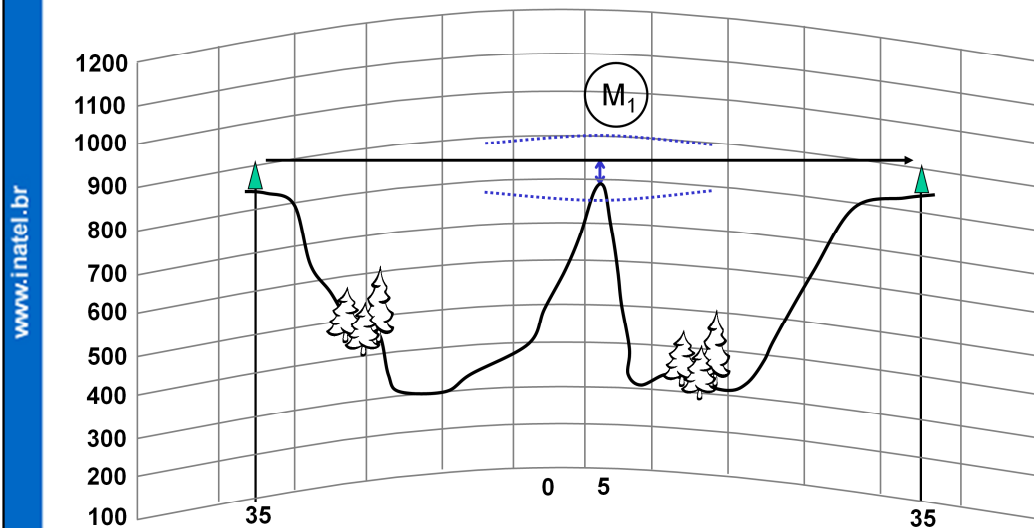
A posição da 1ª zona de Fresnel pode então ser marcada no perfil, como pode ser visto no slide seguinte. Repare que a altura das torres foi levada em consideração.

Pode-se reparar também que o obstáculo M_1 está dentro da 1ª zona de Fresnel, e isto pode provocar alguma atenuação à transmissão.

Logo podemos calcular a Zona de Fresnel:

$$R_f = 547 \sqrt{\frac{40 \times 30}{150 \times 70}} = 184,9(\text{m})$$

Influência dos obstáculos - exemplo



A posição da 1ª Zona de Fresnel pode então ser marcada no perfil, como pode ser visto acima. Repare que a altura das torres foi levada em consideração.

Pode-se reparar que o obstáculo M_1 está dentro da 1ª Zona de Fresnel, e isto pode provocar alguma atenuação à transmissão.

Consideração sobre a zona de Fresnel

A 1ª zona de Fresnel será tanto maior quanto:

- a) *Maior* for a distância entre as antenas;
- b) *Menor* for a frequência

Se o enlace anterior estivesse trabalhando em 7 GHz:

$$R_f = 547 \sqrt{\frac{40 \times 30}{7000 \times 70}} = 27(\text{m})$$

A 1ª Zona de Fresnel será tanto maior quanto

- a) *Maior* for a distância entre as antenas;
- b) *Menor* for a frequência.

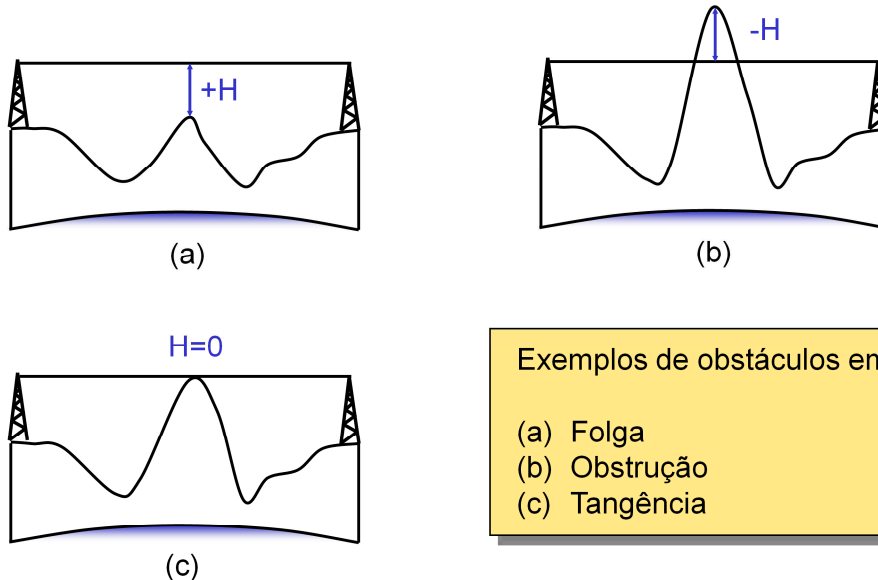
De fato, em rotas de microondas, por exemplo, o raio R_f é pequeno, sendo que torres de tamanho razoável já conseguem fazer com que a 1ª Zona de Fresnel esteja totalmente desobstruída.

Seja recalcular o raio da 1ª Zona de Fresnel, para a rota vista anteriormente, para uma frequência de 7 GHz.

$$R_f = 547 \sqrt{\frac{40 \times 30}{7000 \times 70}} = 27(\text{m})$$

Nota-se o valor pequeno de R , em relação ao calculado para uma frequência na faixa de VHF.

Relação H/R para definir a influência dos obstáculos



Para calcular-se a influência dos obstáculos ao longo da rota, existem vários modelos matemáticos disponíveis. O que será mostrado a seguir é razoavelmente preciso para cálculos em VHF e UHF, sendo de simples realização. Sugere-se um teste de campo, para confirmar ou ajustar seus resultados, quando desejar-se a implementação de uma rota de responsabilidade maior.

O modelo baseia-se em considerar os obstáculos do tipos “gume de faca”, e fornece a atenuação de cada obstáculo, em relação à um valor H/R_f em que:

$R_f \rightarrow$ é o raio da 1ª Zona de Fresnel no obstáculo;

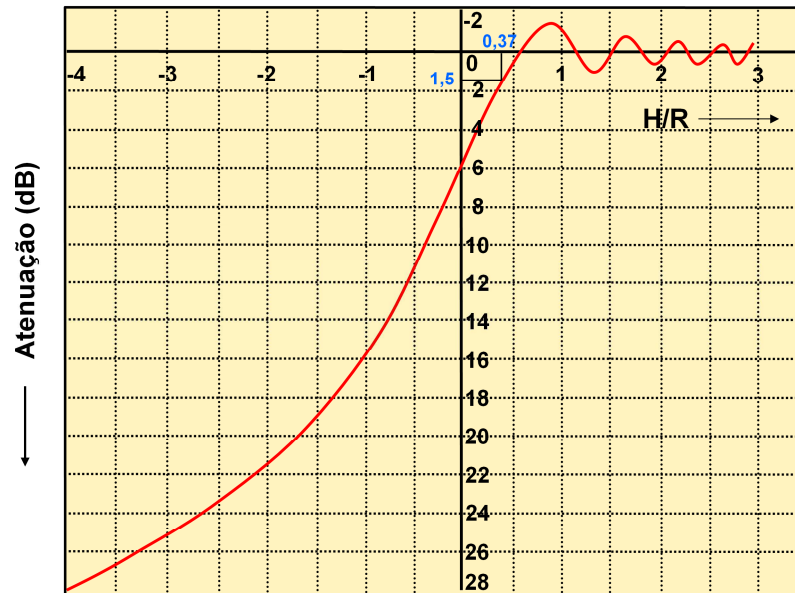
$H \rightarrow$ é a distância, em metros, do topo do obstáculo à linha de visada, e pode ser:

$+H \rightarrow$ quando se trata de “folga”, ou seja, o obstáculo está *abaixo* da linha de visada;

$-H \rightarrow$ quando se trata de “obstrução”, ou seja, o obstáculo está *acima* da linha de visada.

$H=0 \rightarrow$ quando o obstáculo *tangencia* a linha de visada.

Gráfico de atenuação por obstáculos “Gume de Faca”



Como é possível calcular-se R no obstáculo, e obter-se H no perfil, pode-se ter o valor de H/R para o obstáculo. Com tal valor, obtém-se a atenuação provocada pelo mesmo na curva do slide a seguir.

Vamos calcular a atenuação provocada por M_1 , no perfil que estamos analisando, para uma frequência de 150 MHz.

O valor de R já foi calculado, e é:

$$R = 185(\text{m})$$

O obstáculo está em “folga”, e o valor de H é:

$$H = 0,55(\text{cm})$$

Como cada 0,8 cm vale 100 metros, H é:

Logo,

$$H \cong 69(\text{metros})$$

$$\frac{H}{R} = \frac{69}{185} \quad \therefore \quad \frac{H}{R} = 0,37$$

Da curva do slide podemos ver que a atenuação causada, pelo obstáculo, será de :

$$A_{M1} = 15(\text{dB})$$

Como pode ser constatado, o obstáculo M_1 , mesmo abaixo da linha de visada, provoca uma atenuação de 1,5 dB, ou seja, de 1,4 vezes na potência transmitida.

Com uma calculadora programável, ou com um micro-computador, é possível evitar a utilização, sempre trabalhosa, da curva. De fato, a mesma descrita em Série de Potências é:

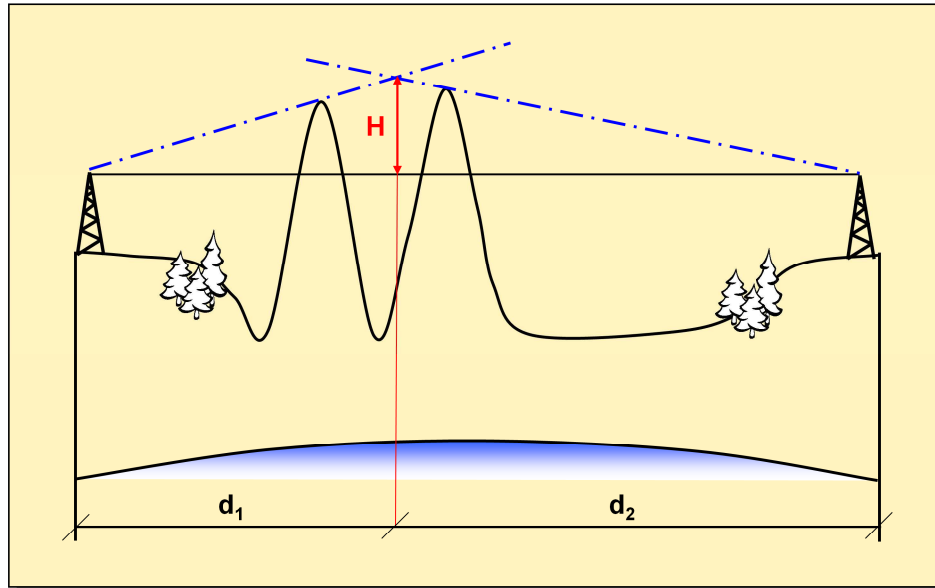
Alguns detalhes a mais devem ser indicados:

$$A(\text{dB}) = 6,05336 - 11,188(H/R) - 0,20239(H/R)^2 + 1,45806(H/R)^3 +$$

+ 0,46117(H/R)⁴ - 0,04309(H/R)⁵
a) Quando na tangência do obstáculo, $H/R = 0$ e $A_M = 6$ dB. De fato, metade do campo transmitido estará obstruído e a atenuação será de $[20 \log (0,5) = -6 \text{ dB}]$.

b) Quando $H/R = 0,6$, $A_M = 0$. Isto indica o importante fato de que para um obstáculo não ser obstrutor é preciso que pelo menos 60% da 1ª Zona de Fresnel esteja desobstruída. Tal critério é muito importante para dimensionamento de altura de torres em rotas de microondas, para verificação de influência de obstáculos ao longo da rota, etc.

c) Com valores de H/R superiores a 0,6, as atenuações ou ganhos que ocorrerem serão devidos à reflexões, e não devem ser considerados na prática, pois as condições para ótima reflexão não são obtidas nas rotas reais. Por tal motivo, se H/R pra algum obstáculo for superior a 0,6, sua influência será nula, com $A_M = 0$.

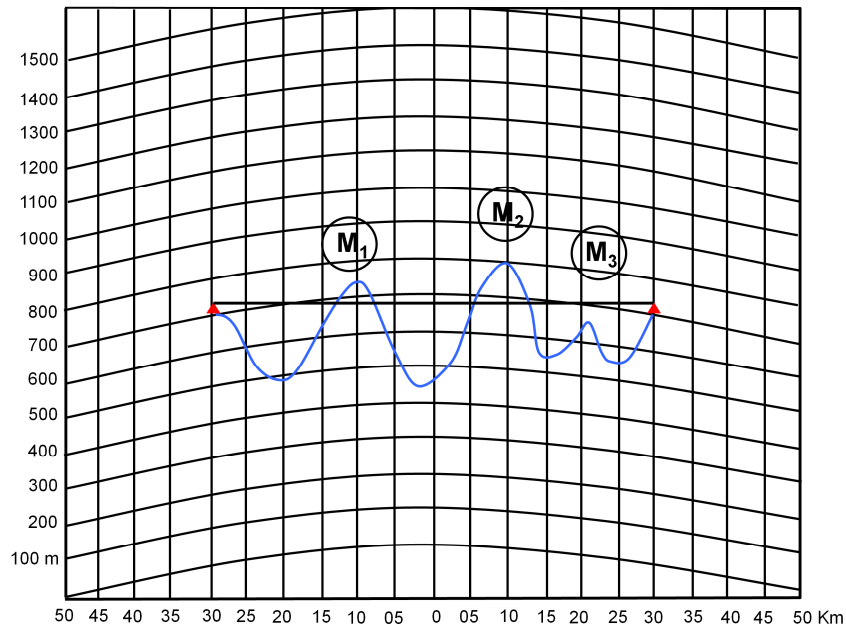
Obstáculos próximos

Para considerar o caso de obstáculos múltiplos, que é o modelo mais freqüente, temos a análise de obstáculos próximos e a análise de obstáculos separados. Vamos considerar o primeiro o caso de obstáculos próximos e em seguida analisar o caso de obstáculos separados.

1) Obstáculos próximos

É o caso mostrado no slide acima. Nesse caso obtém-se um só valor de H/R , com H , d_1 e d_2 obtidos do ponto de intersecção das tangentes ao ponto máximo dos obstáculos, a partir das antenas. A atenuação do conjunto de obstáculos próximos será dado por este valor de H/R .

Obstáculos separados



2) Obstáculos Separados

É o mais comumente caso encontrado na prática conforme vemos acima.

O cálculo baseia-se em dividir a rota principal, ou de 1ª ordem, em duas rotas secundárias, ou de 2ª ordem, a partir do obstáculo que mais influencie, e que será denominado de *obstáculo principal*.

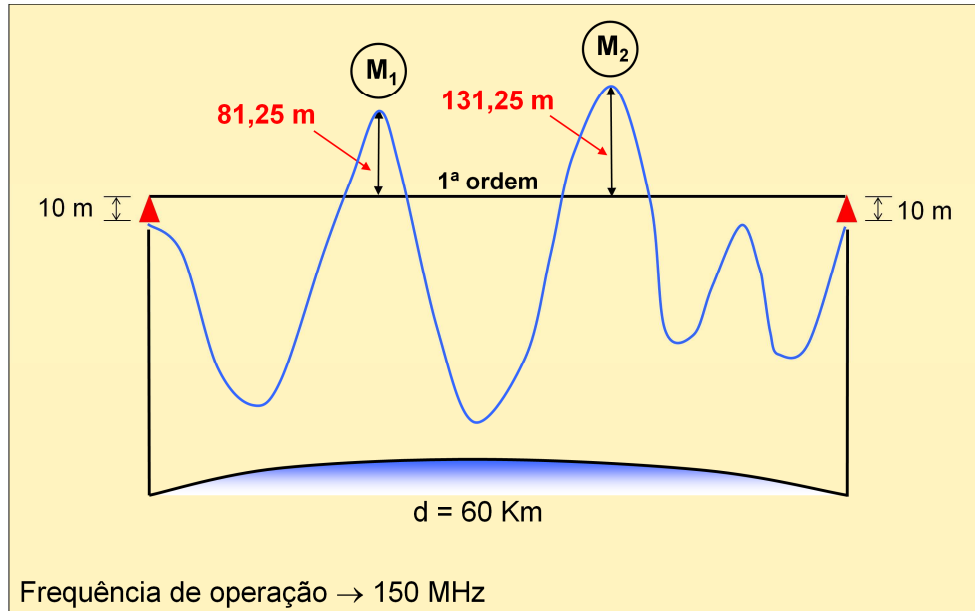
Tal obstáculo será o de *maior valor* de H/R , sendo que tanto H como R serão calculados, na 1ª fase do processo, na rota total.

Toda a sistemática de cálculo será mostrada e exemplificada a seguir.

Seja calcular a atenuação total de obstáculos na rota mostrada acima, para uma frequência de 150 MHz. As torres tem 10 metros de altura, com cada antena no topo.

Veja a solução a seguir ...

1ª Fase – Decisão do obstáculo principal



1ª fase : Decisão do obstáculo principal

Marcadas as torres, e traçada a linha de visada, verifica-se por inspeção que o obstáculo principal dever ser o M_1 ou o M_2 . Será calculado o valor de H/R para cada um deles, para servir de base á decisão.

Cálculo de M_1 :

$$H(\text{doperfil}) = 81,25 \text{ metros}$$

$$R = 547 \sqrt{\frac{20 \times 40}{150 \times 60}} \quad \therefore \quad R = 163 \text{ metros}$$

Logo,

$$\frac{H}{R} = \frac{81,25}{163} \quad \therefore \quad \frac{H}{R} = 0,5$$

Cálculo de M_2 :

$$H(\text{doperfil}) = 131,25 \text{ metros}$$

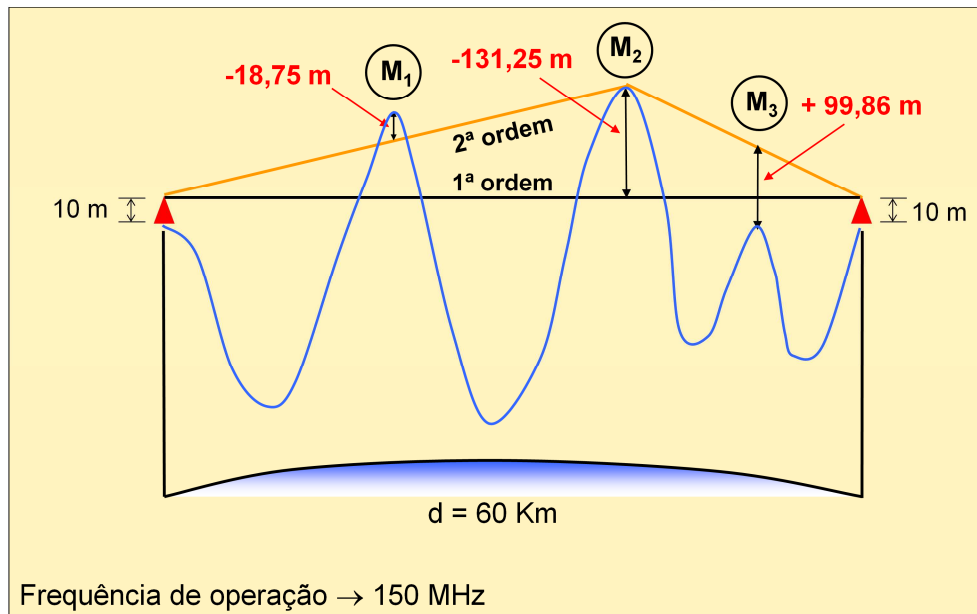
$$R = 547 \sqrt{\frac{40 \times 20}{150 \times 60}} \quad \therefore \quad R = 163 \text{ metros}$$

Logo,

$$\frac{H}{R} = \frac{13125}{163} \quad \therefore \quad \frac{H}{R} = 0,8$$

Como H/R de M_2 é superior a H/R de M_1 , pode-se concluir que M_2 é o obstáculo principal.

2ª Fase – Cálculo das atenuações



2ª fase : Cálculo das Atenuações

Com M_2 como obstáculo principal, pode-se passar ao cálculo das atenuações dos diversos obstáculos.

Cálculo da atenuação provocada por M_2 :

M_2 , como obstáculo principal, é considerado na *rota principal*. Logo, os valores calculados para a decisão continuam válidos, ou seja:

$$H = -131,25(\text{m}) \quad \text{obstrução}$$

$$R = 163(\text{m})$$

$$H/R = -0,8$$

Da curva vem:

$$AM_2 = 14,5 \text{ dB}$$

Cálculo da atenuação provocada por M_1 :

M_1 é obstáculo secundário, e deve ser considerado na *rota secundária* que vai da Estação A ao obstáculo M_2 . Reparar que todos os valores, H e R, são determinados agora na rota secundária, a partir de uma nova linha de visada, inclusive.

$H = -18,75 \text{ (m)}$ (obstrução), em relação à nova linha de visada

$$R = 547 \sqrt{\frac{20 \times 20}{150 \times 40}} \quad \therefore \quad R = 14123 \text{ (m)}$$

Logo,

$$\frac{H}{R} = \frac{-18,75}{14123} \quad \therefore \quad \frac{H}{R} = -0,13$$

Da curva, vem:

$$AM_1 = 7,5 \text{ dB}$$

Cálculo da atenuação provocada por M_3 :

Utilizando o mesmo critério adotado para M_1 , vem:

$H = +93,75 \text{ (m)}$ (folga)

$$R = 547 \sqrt{\frac{10 \times 10}{150 \times 20}} \quad \therefore \quad R = 99,86 \text{ (m)}$$

Logo,

Como $\frac{H}{R} = \frac{93,75}{99,86} = 0,94$ da 1ª Zona de Fresnel encontra-se desobstruída, e o obstáculo não oferece atenuação; portanto,

$$AM_3 = 0 \text{ dB}$$

Finalizando:

$$A_{o(\text{total})} = A_{M1} + A_{M2} + A_{M3}$$

$$A_{o(\text{total})} = 7,5 + 14,5 + 0 \quad \therefore \quad A_{MT} = 22 \text{ (dB)}$$

Deve-se reparar, finalizando o presente item, o fato de que como a atenuação é dependente de H/R , e já que H depende exclusivamente da geometria da rota, quanto maior a frequência, menor será o valor de R , e maior o valor de H/R . Logo, na mesma rota, se houver obstrução, frequências maiores serão mais atenuadas. Por tal motivo, nas rotas que operam na faixa superior de UHF ou em SHF a ausência de obstáculos obstrutores é fundamental; mesmo a utilização de torres elevadas é válida para eliminar a atenuação por obstáculos. Assim, principalmente em SHF, a utilização de rotas em “visada direta” é comum.

Outras atenuações em VHF

Atenuação no espaço livre;
Atenuação na linha de transmissão;
Atenuação em filtros, conectores e etc.

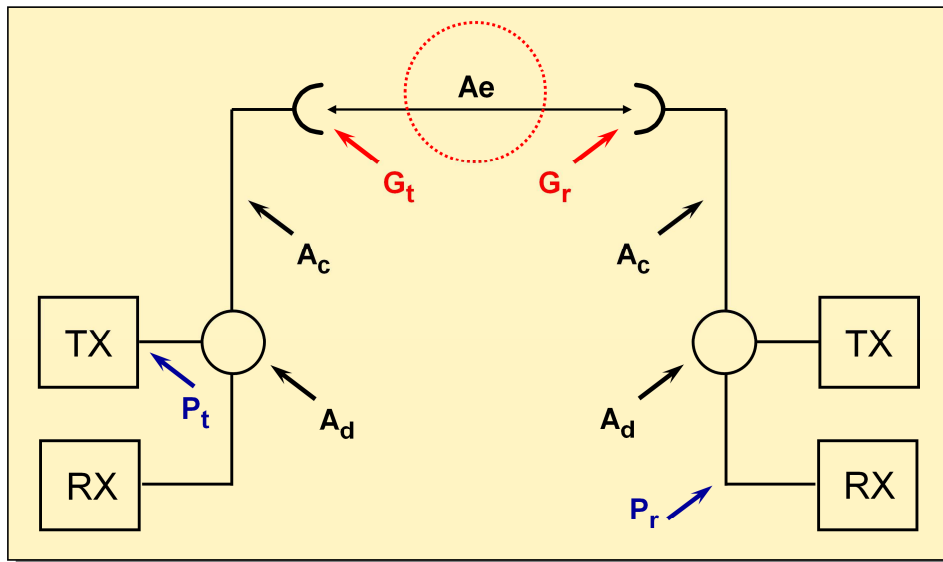
Outras atenuações devem ser consideradas em um rota em VHF. São elas:

a) Atenuação no Espaço Livre: atenuação provocada pela propagação da onda, mesmo entre duas antenas dispostas no espaço livre, ou seja, sem nenhuma influência perturbadora (obstruções, reflexões). Tal atenuação está presente em qualquer sistema, e apresenta valor alto, sendo responsável pelo maior valor presente na totalidade das atenuações.

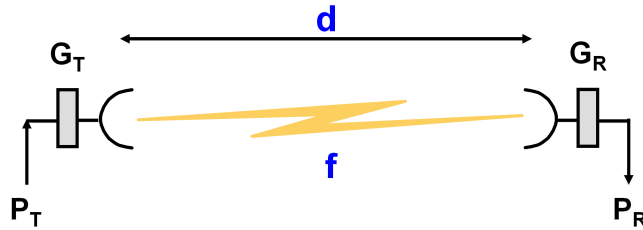
b) Atenuação na Linha de Transmissão: atenuação introduzida pelos cabos coaxiais que ligam os transceptores às antenas.

c) Atenuação em Filtros, Conectores, etc.: atenuação provocada por filtros, wattímetros coaxiais, conectores, etc., que possam estar inseridos entre os transceptores e antenas.

Atenuação no espaço livre (A_E)



Atenuação no espaço livre (A_E)



$$A = 32.44 + 20 \log d + 20 \log f$$

onde d = distância em Km

f = frequência em MHz

(referente a antena isotrópica)

Condições: não existem influências do solo, absorção por gases, desvios de trajetória, etc. Ou seja, ESPAÇO LIVRE.

Logo, a uma distância d do transmissor, a potência será:

$$P = \frac{P_T}{4\pi \times d^2} \left[W/m^2 \right]$$

A potência transmitida está “distribuída” pela superfície de uma esfera de raio d .

Portanto, a potência recebida por uma antena de Área Efetiva ERA (m^2) será, a uma distância d da antena transmissora:

$$P_R = \frac{P_T}{4\pi \times d^2} A_{ER} \left[W \right]$$

Com o ganho G_T da antena transmissora,

$$P_R = \frac{P_T \times G_T}{4\pi \times d^2} A_{ER} \left[W \right]$$

Em relação à antena isotrópica, a relação entre o ganho G de uma antena e sua Área Efetiva é:

$$A_E = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

Logo,

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_R$$

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R}{(4\pi)^2} \cdot \frac{\lambda^2}{d^2}$$

G_T e $G_R \rightarrow$ referenciados à antena isotrópica.

Relacionando P_T/P_R :

Em dB,

$$\frac{P_T}{P_R} = \frac{(4\pi d)^2}{G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2}$$

Portanto, a atenuação em ESFALÇO LIVRE é (em relação a antena isotrópica):

$$10 \log \frac{P_T}{P_R} = 32,44 + 20 \log d(\text{Km}) + 20 \log f(\text{MHz}) - G_T - G_R$$

Outras referências:

$A_E(\text{dB}) = 32,44 + 20 \log d(\text{Km}) + 20 \log f(\text{MHz})$
 $\rightarrow$ Em relação ao dipolo curto :

$\rightarrow$ Em relação ao dipolo de $\lambda/2$:

$$A_E(\text{dB}) = 28,9 + 20 \log d(\text{Km}) + 20 \log f(\text{MHz})$$

$$A_E(\text{dB}) = 28,2 + 20 \log d(\text{Km}) + 20 \log f(\text{MHz})$$

Atenuação no espaço livre - exemplo

Seja calcular a atenuação no espaço livre na rota dada anteriormente (d=60 Km) para uma frequência de 150 MHz e antenas com ganho referido à isotrópica.

$$A_E(\text{dB}) = 32,44 + 20 \log d(\text{Km}) + 20 \log f(\text{MHz})$$

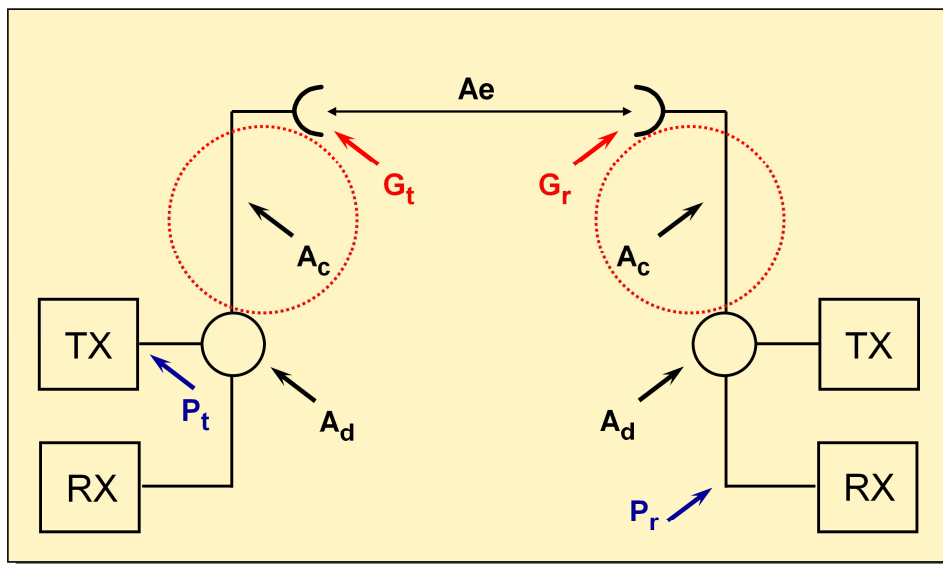
$$A_E(\text{dB}) = 32,44 + 20 \log 60 + 20 \log 150$$

$$A_E(\text{dB}) = 111,52$$

Pode-se reparar o grande valor de atenuação, responsável, no caso, por uma perda superior a 10^{10} .

Como A_E varia diretamente com o quadrado da distância e da frequência, daí para maiores distâncias e frequências mais elevadas a atenuação cresce. Para uma frequência de 7 GHz, por exemplo, a atenuação na rota dada anteriormente (d=60 Km) seria de aproximadamente 145 dB, ou seja, superior a 10^{14} . Por tal motivo, rotas em microondas tem lances curtos, por volta de 50 Km, em média.

Atenuação na linha de transmissão (A_c)



Atenuação na linha de transmissão (A_c)

Cabo coaxial

	RG 58	RGC 58	RG 213	RGC 213
Frequência (MHz)	Atenuação (dB/100m)	Atenuação (dB/100m)	Atenuação (dB/100m)	Atenuação (dB/100m)
10	4,48	2,90		
50	10,90	7,00	4,60	3,20
100	15,60	10,37	6,90	4,50
200	24,00	14,40	10,20	6,70
400	34,00	20,80	15,20	9,90
600	42,00	25,72		
800	50,00	30,52	23,00	15,00
1000	56,00	34,90	27,30	16,90

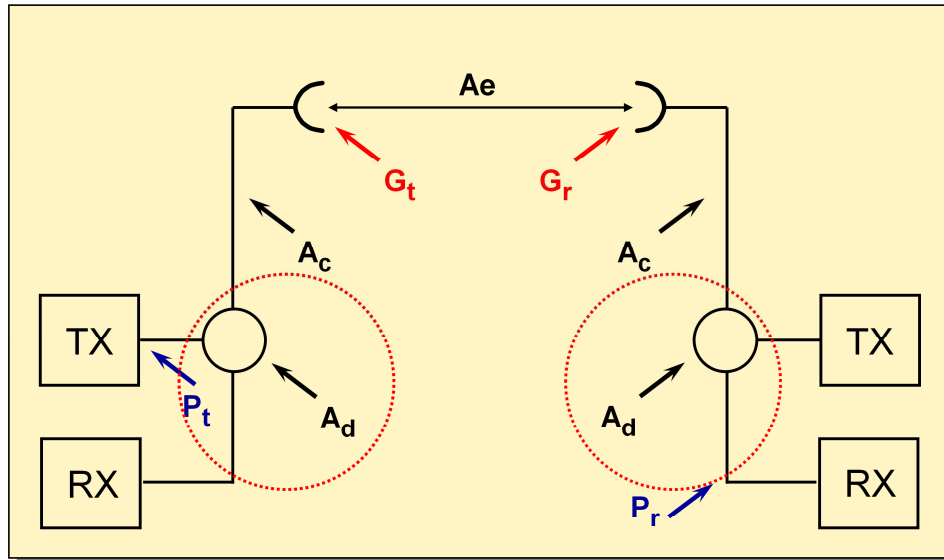
Fabricante : Cabletech

Impedância nominal : 50 Ω

Para o cálculo do valor de A_c , ponderável na faixa de VHF, é preciso conhecer o comprimento total dos cabos utilizados na instalação, bem como a atenuação, em dB/metro, do tipo de cabo utilizado. Tal dado é fornecido pelo fabricante, conforme exemplo mostrado acima.

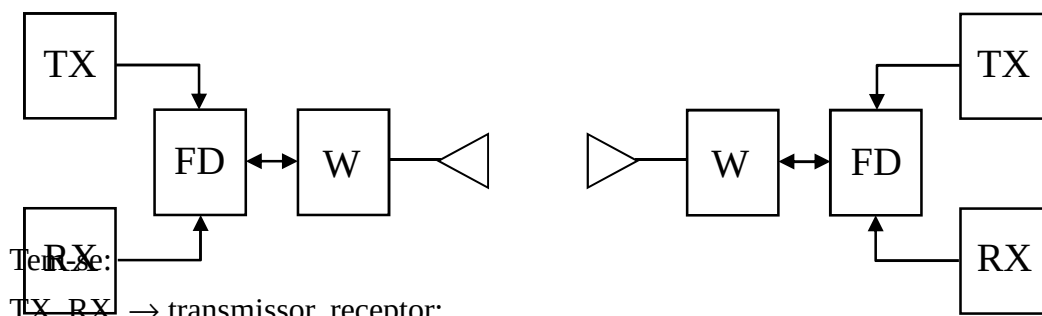
Para determinar-se o comprimento total dos cabos utilizados em uma instalação, deve-se acrescentar à linha de transmissão ao longo da torre a derivação, ou seja, a seção de cabo utilizada para interligar o equipamento ao início da subida na torre. Tal derivação, em instalações normais, chega a ter 10 metros de comprimento por estação.

Atenuação em filtros, conectores, etc. (A_d)



É determinada conhecendo-se, a partir das especificações do fabricante do equipamento, os diversos dispositivos em série com a linha de transmissão, e suas respectivas perdas.

Seja uma rota em VHF, implementada de acordo com a configuração abaixo:



TX, RX → transmissor, receptor;

FD → filtro duplexer – serve para permitir a utilização da mesma antena para transmissão e recepção, simultaneamente, quando o serviço é “duplex” (transmissão simultânea nos dois sentidos, em portadoras diferentes)

W → wattímetro coaxial, utilizado no caso para monitorar constantemente a potência transmitida.

Supor que sejam disponíveis os seguintes dados do fabricante:

→ atenuação do filtro diplexer, por unidade: 1,3 dB/filtro

→ atenuação do wattímetro, por unidade: 0,5 dB/wattímetro

Solução:

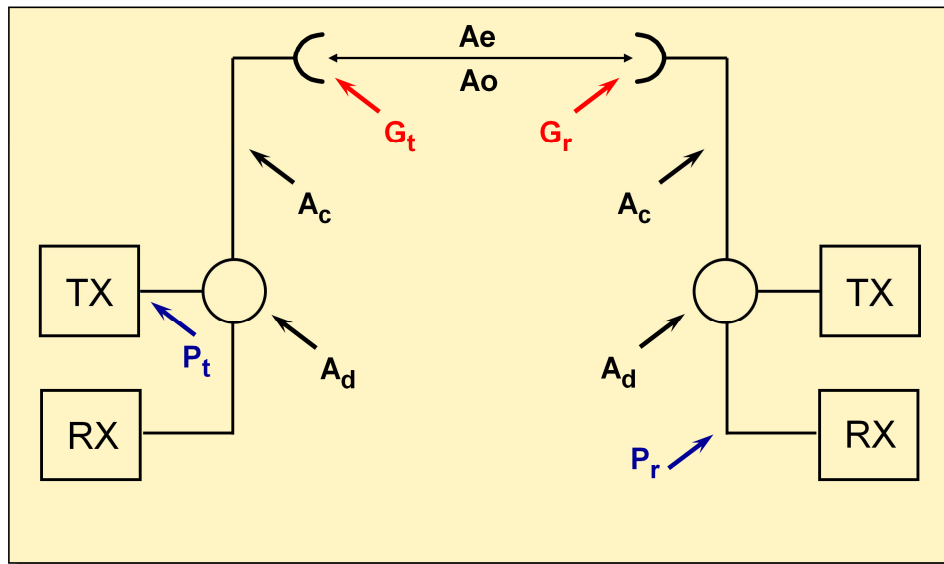
De um transmissor para seu respectivo receptor, o sinal passa por dois filtros e dois wattímetros. Desprezando a perda nos conectores, por ser esta muito pequena, tem-se então:

$$A_d = (2 \cdot 1,3 \text{ dB/filtro}) + (2 \cdot 0,5 \text{ dB/Wattímetro})$$

Se lembrarmos que 3 dB representam a perda da metade da potência, verifica-se que a atenuação A_d não pode ser desprezada.

Em cada caso, A_d deve ser estudada, e para tal precisamos dos dados fornecidos pelo fabricante do equipamento. Alguns projetistas também consideram em A_d a perda por conectores, estimada na prática como sendo de 0,25 dB/conector. Assim, a perda total em uma instalação normal é de 4 conectores. Logo, a perda será de 1 dB.

Equacionamento do enlace na ausência de desvanecimento



Veremos agora a sistemática de cálculo de uma rota em VHF, após a qual será dado um projeto completo. Tal sistemática também é útil para que se entenda o comportamento de uma rota em VHF, serviço fixo, já em operação.

De modo geral os diversos parâmetros vistos em uma rota em VHF podem ser calculados como veremos a seguir.

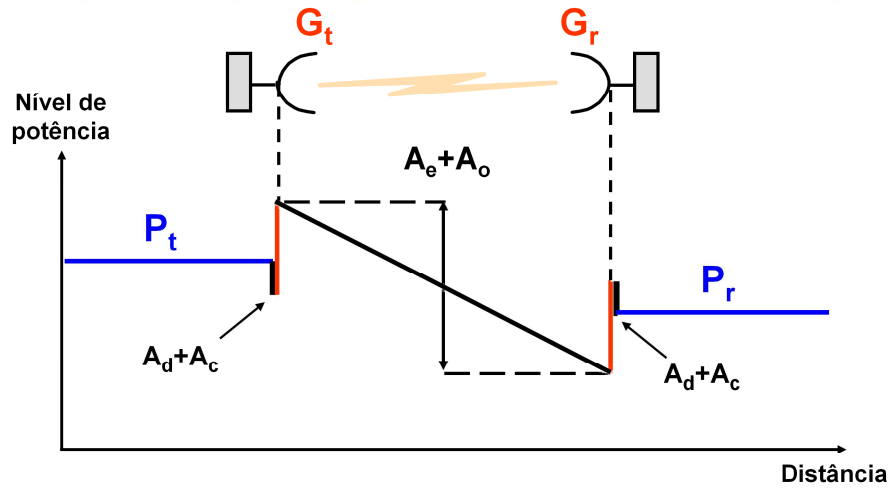
Potência do sinal na entrada do receptor

$$P_r = P_t + G_t + G_r - A_d - A_c - A_e - A_o$$

Onde:

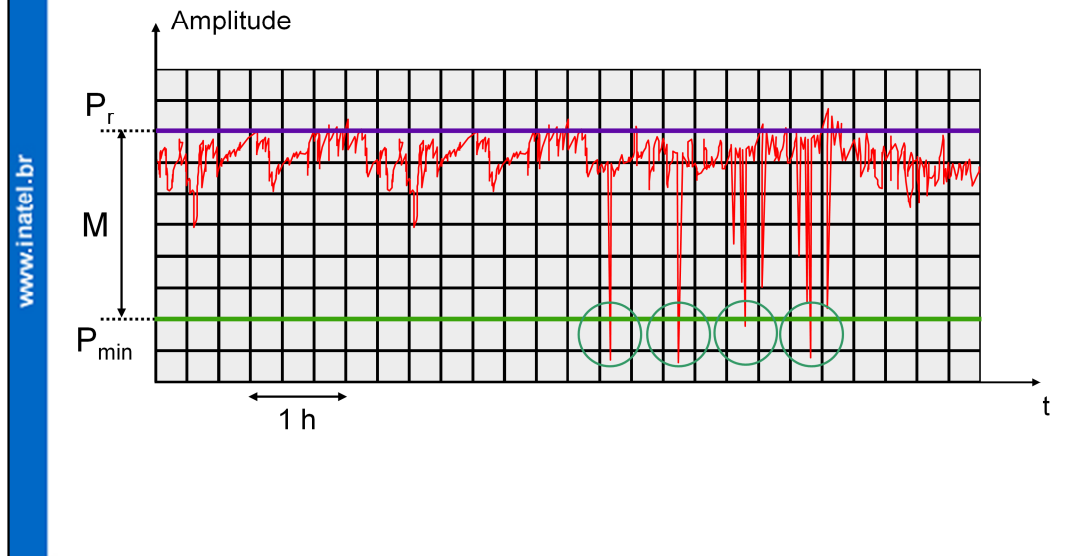
P_t	Potência disponível na saída do transmissor em dBm ou dBw
G_t	Ganho da antena de transmissão
G_r	Ganho da antena de recepção
A_d	Atenuação nos derivadores em dB
A_c	Atenuação nos alimentadores em dB
A_e	Atenuação no espaço livre em dB
A_o	Atenuação devido aos obstáculos em dB
P_r	Potência na entrada do receptor em dBm ou dBw

Representação da potência na entrada do receptor



$$P_r = P_t + G_t + G_r - A_d - A_c - A_e - A_o$$

Equacionamento do enlace considerando o desvanecimento



$P_{\min}$ ou P_L é a potência mínima a considerar na recepção, sendo geralmente levada em conta como a potência desenvolvida na entrada do receptor pela tensão que exprime sua sensibilidade, e que é parâmetro do receptor empregado.

Seja por exemplo calcular a $P_{\min}$, em dBw, para um receptor cuja sensibilidade é de “0,35 μV para 20 dB de silenciamento, em 50 Ω ”.

A tensão mínima a considerar é 0,35 μV . Em 50 Ω , vem:

$$\text{Em dBw: } P_{\text{MIN}} = \frac{E^2}{R} = \frac{(0,35 \times 10^{-6})^2}{50} = 2,45 \times 10^{-15} \text{ W}$$

$$P_{\text{MIN}} = 10 \log(2,45 \times 10^{-15})$$

A “Margem de Desvanecimento” é uma margem de segurança que é dada ao nível recebido, de modo a assegurar que o fading não impeça a comunicação ou a dificulte por longos períodos de tempo. Na realidade, é a distância, em dB, entre a potência mediana recebida e a potência mínima.

$$P_{\text{MIN}} = -146,1 \text{ dBw}$$

Equacionamento do enlace considerando o desvanecimento

Através do gráfico anterior podemos ver que:

$$M = P_r - P_L$$

como:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - A_d - A_c - A_e - A_o$$



$$M = P_t + G_t + G_r - A_d - A_c - A_e - A_o - P_L$$

A equação mostrada acima representa a margem de desvanecimento. Vimos que o gráfico mostra a variação, em função do tempo, da potência recebida. As flutuações representadas constituem o “fading”.

Como pode ser visto, a determinação exata do valor ideal de M exige o conhecimento do “fading” na rota, o que exige longas medidas na mesma. Existem modelos matemáticos disponíveis para avaliar tal valor, evitando tais medidas contudo valores práticos muito utilizados vão de 10 a 30 dB, sendo último valor citado muito confiável para rotas consideradas normais.

Equacionamento do enlace considerando o desvanecimento

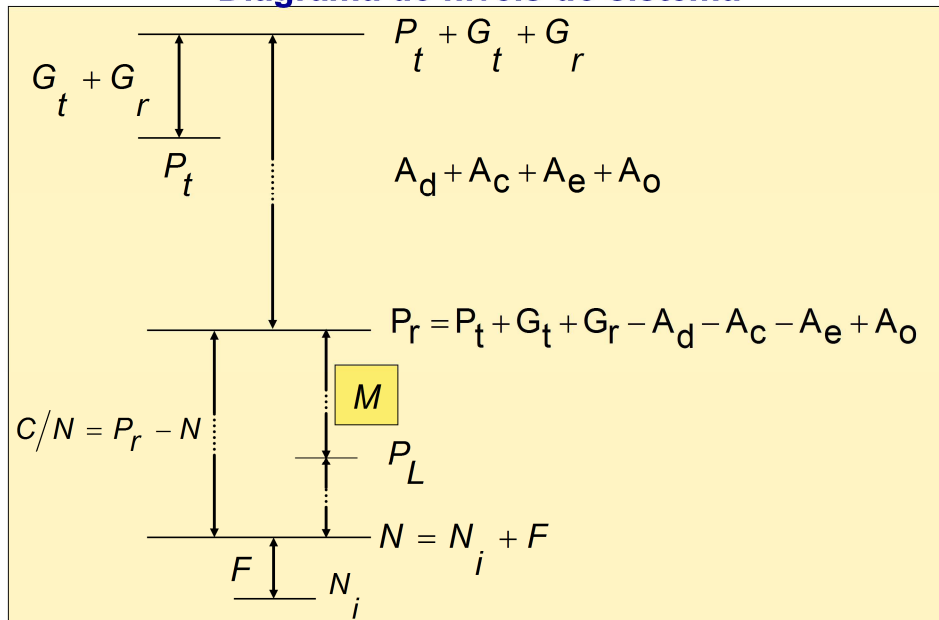
Podemos então determinar o valor do sistema (V_s):

$$V_s = P_t - P_L - A_d$$

Calculando a margem através do valor do sistema, que normalmente é fornecido pelo fabricante do equipamento, tem-se:

$$M = V_s + G_t + G_r - A_c - A_e - A_o$$

Diagrama de níveis do sistema



Agenda

- **Comunicações nas faixas de VHF e UHF**
 - ✓ Características
 - ✓ Aplicações
- **Considerações sobre a topologia da rota**
 - ✓ Efeitos da refração atmosférica
 - ✓ Conceito de raio terrestre equivalente
 - ✓ Fator K (“índice de refração atmosférica”)
- **Subsídios para projeto**
 - ✓ Influência dos obstáculos
 - ✓ Outras atenuações
 - ✓ Equacionamento do enlace
 - ✓ Margem de fading
- **Estudo de caso**

Cálculo de uma rota em VHF

Tipo de serviço: telefonia rural

Rota: Itajubá-MG / Maria da Fé-MG

F_1 (frequência de “ida”): 165,59 MHz

F_1' (frequência de “volta”): 170,19 MHz

Transceptor:

$P_{TX} = 1$ Watt

Sensibilidade de silenciamento de 20 dB: $\leq 0,5 \mu V$ (em 50Ω)

Torres: 10 metros de altura (instalar as antenas no topo)

Cabo disponível: Cabletech RG 213

Derivação de Cabos: 5 metros em Itajubá e 12 metros em Maria da Fé



Determinar o ganho mínimo das antenas para que o enlace opere com pelo menos 30 dB de margem de desvanecimento.

Cálculo de uma Rota em VHF

Seja estabelecer um circuito de telefonia rural entre dois pontos, situados respectivamente nas cidades de Itajubá – MG e Maria da Fé – MG. Os dados disponíveis, além da localização das estações, são os seguintes:

a) Frequências de Operação

Tais frequências constituem um dos inúmeros “pares de frequências” aprovados pela ANATEL para operação “duplex” neste tipo de serviço. Em nosso exemplo telefonia rural. São Elas:

- f_1 (frequência de “ida”) = 165,59 MHz
- f_1' (frequência de “volta”) = 170,19 MHz

Admite-se aqui que tais frequências foram escolhidas levando-se em conta os sistemas próximos já instalados, para que a interferência mútua seja mínima.

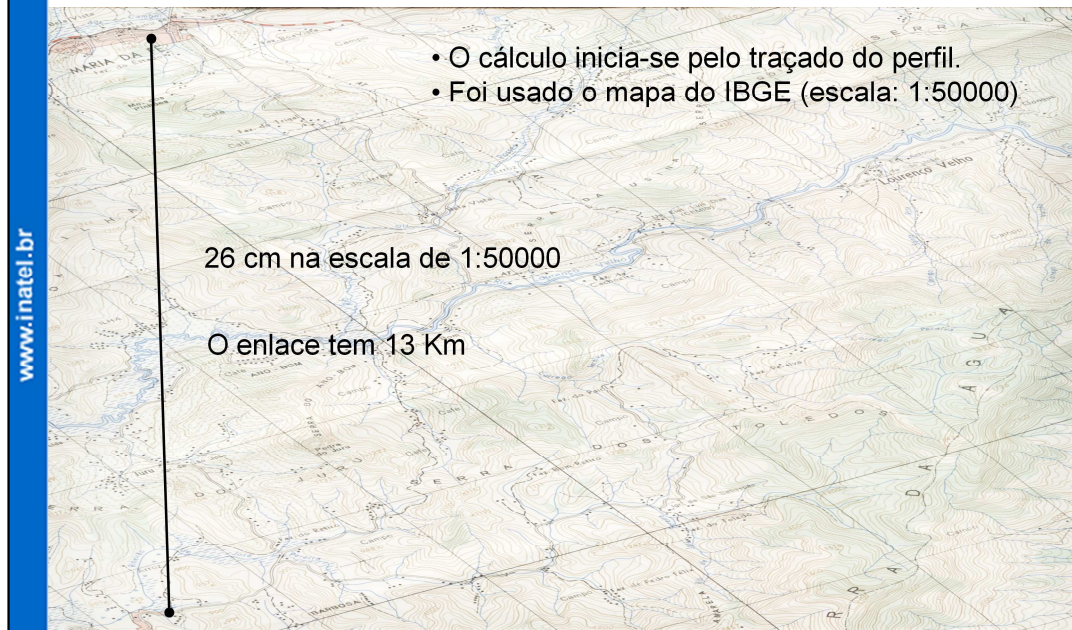
b) Transceptor

- Potência de transmissão = 1 Watt
- Sensibilidade para silenciamento de 20 dB: $\leq 0,5 \mu V$ (em 50Ω)

c) Torres, etc

- Altura de cada torre: 10 metros (antena no topo da torre)
- Derivação de cabos: 5 metros em Itajubá e 12 metros em Maria da Fé
- Cabo utilizado: Cabletech RG 213 / 50 Ω
- Os filtros diplexer já estão considerados na especificação do transmissor e receptor.

Levantamento do perfil da rota (1º passo)

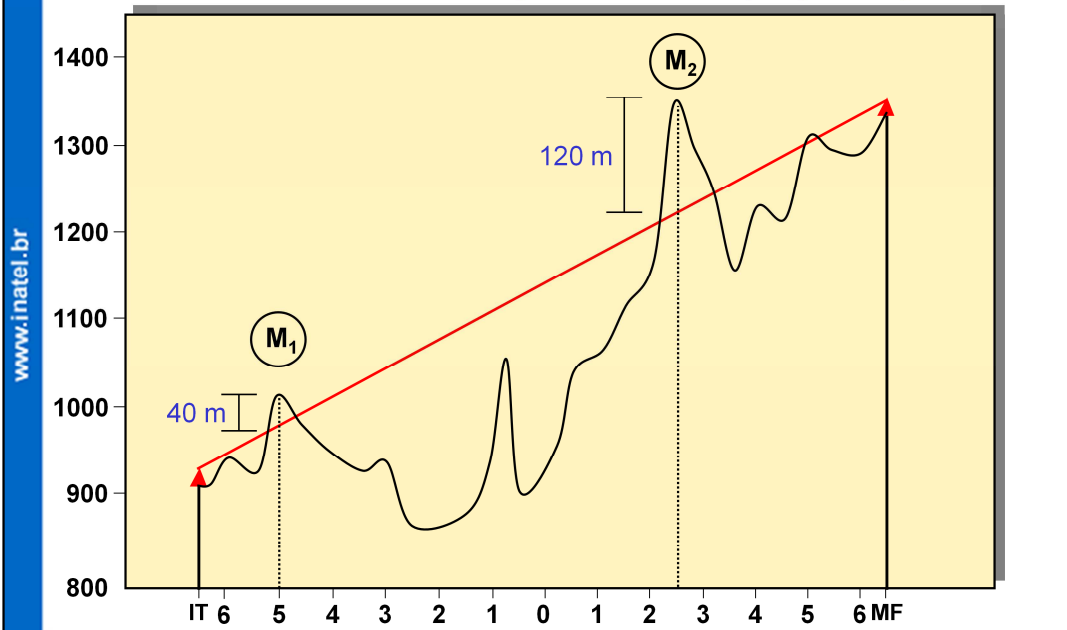


O cálculo inicia-se pelo traçado do perfil. O mapa do IBGE (escala 1:50000), com as duas estações plotadas, é mostrado a seguir.

Unindo-se as duas estações por uma reta, constata-se que a distância entre elas é de 26 cm (no slide o perfil não está em escala), ou seja, 13 Km. A uma distância pequena como esta pode-se desprezar a curvatura da Terra, sendo o perfil traçado em um papel milimetrado, por exemplo.

Para o traçado, dividiu-se a reta em seções de 1 cm, equivalendo cada uma delas a 500 metros. As diversas altitudes foram sendo transpostas para o papel milimetrado, evidentemente observando-se e marcando-se os pontos mais altos (picos) existentes entre os pontos. Outro procedimento seria marcar apenas as maiores elevações, medindo-se com a régua a sua distância a uma das estações, e utilizando a escala do mapa para a sua colocação no perfil.

Levantamento do perfil da rota (1º passo)



O perfil já traçado está mostrado no slide acima. Com o perfil já traçado, pode-se fazer a determinação do obstáculo principal. Com as torres marcadas, e a linha de visada principal. Com as torres marcadas, e a linha de visada principal traçada, calcula-se H/R para M1 e M2.

Determinação do obstáculo principal (1º passo)

Obstáculo M_1

$$R = 547 \sqrt{\frac{15 \cdot 115}{17019 \cdot 13}} = 48,3 \text{ metros}$$

H = 40 metros

$$\frac{H}{R} = 0,828$$

Obstáculo M_2

$$R = 547 \sqrt{\frac{4 \cdot 9}{17019 \cdot 13}} = 69,77 \text{ metros}$$

H = 120 metros

$$\frac{H}{R} = 1,72$$

Por apresentar H/R maior, M_2 é o obstáculo principal

Determinação do Obstáculo Principal

M_1 :

$$R = 547 \sqrt{\frac{15 \cdot 115}{17019 \cdot 13}} = 48,3 \text{ metros}$$

H = 40 metros

Logo,

$$\frac{H}{R} = 0,828$$

M_2 :

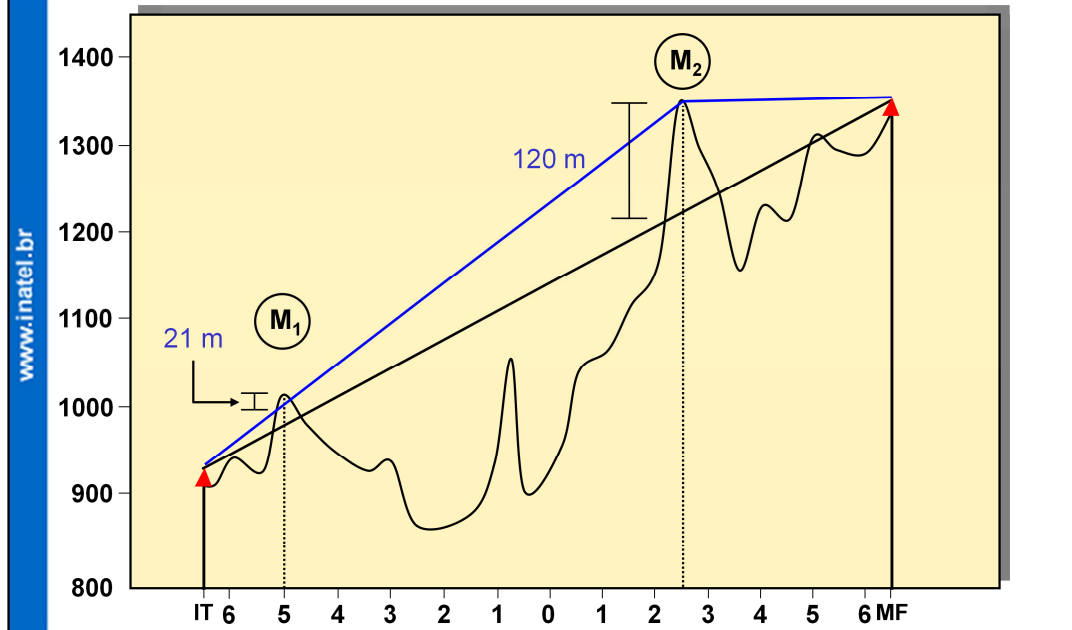
$$R = 547 \sqrt{\frac{4 \cdot 9}{17019 \cdot 13}} = 69,77 \text{ metros}$$

Logo,

H = 120 metros

$$\frac{H}{R} = 1,72$$

Estabelecimento da rota secundária (1º passo)



Portanto, M_2 é o obstáculo principal. Adotando-se procedimento já previsto para obstáculo múltiplos, vem:

Cálculo da atenuação provocada pelo obstáculo principal:

$$\frac{H}{R} = -172$$

(H/R na rota principal, em obstrução)

Através da curva vista anteriormente (obstáculo tipo gume de faca) vemos que a atenuação causada pelo obstáculo M_2 :

Cálculo da atenuação provocada por M_1 (obstáculo secundário, em obstrução).

$$A_0(M_1) = 206 \text{ dB}$$

Da rota secundária, marcada no perfil, vem:

$$H = -21 \text{ metros}$$

Atenuação causada pelos obstáculos (A_o) - (1º passo)

Atenuação causada
pelo obstáculo principal
(M_2)

$$R = 547 \sqrt{\frac{4 \cdot 9}{170,19 \cdot 13}} = 69,77 \text{ metros}$$

$$H = -120 \text{ metros}$$

$$\frac{H}{R} = -1,72$$

$$A_{o(M_2)} = 20,6 \text{ dB}$$

Atenuação causada
pelo obstáculo (M_1) -
rota secundária-

$$R = 547 \sqrt{\frac{1,5 \cdot 7,5}{170,19 \cdot 9}} = 46,88 \text{ metros}$$

$$H = -21 \text{ metros}$$

$$\frac{H}{R} \cong -0,5$$

$$A_{o(M_1)} = 11,8 \text{ dB}$$

$$R = 547 \sqrt{\frac{1,5 \cdot 7,5}{170,19 \cdot 9}} = 46,88 \text{ metros}$$

$$\frac{H}{R} = \frac{-21}{46,88} = 0,447 \cong -0,5$$

Da curva de atenuação causada por obstáculos, vem:

$$A_{o(M_1)} = 11,8 \text{ dB}$$

Próximo à estação de Itajubá existe um pequeno obstáculo, em folga. No entanto, vale a pena examina-lo, pela proximidade a uma das antenas.

$$H = 10 \text{ metros}$$

$$R = 547 \sqrt{\frac{0,5 \cdot 8,5}{170,19 \cdot 9}} = 28,81 \text{ metros}$$

$$\frac{H}{R} = \frac{10}{28,81} = 0,35$$

Atenuação causada pelos obstáculos (A_o) - (1º passo)

Atenuação causada
pelo obstáculo próximo
à Itajubá (M_2)

Atenuação total causada
por obstáculos

$$R = 547 \sqrt{\frac{0,5 \cdot 8,5}{170,19 \cdot 9}} = 28,81 \text{ metros}$$

$$H = 10 \text{ metros}$$

$$\frac{H}{R} \cong 0,35$$

$$A_{o(M_N)} = 2 \text{ dB}$$

$$A_o = 20,6 + 11,8 + 2 = 34,4 \text{ dB}$$

www.inatel.br

$$A_{o(M_N)} = 2 \text{ dB}$$

Por inspeção ao perfil, nota-se que nenhum outro obstáculo atenua os sinal. Mesmo a elevação mais próxima da antena de Maria da Fé, se considerada na rota secundária, tem bem mais do que 60% da 1ª Zona de Fresnel em desobstrução.

Portanto, a atenuação total por obstáculos será de:

$$A_o = 20,6 + 11,8 + 2 = 34,4 \text{ dB}$$

Atenuação em espaço livre (A_e) - (2º passo)

Lembrando que:

$$d = 13 \text{ Km}$$

$$F = 170,19 \text{ MHz (considerando a maior frequência)}$$

$$A_e(\text{dB}) = 32,44 + 20 \log d(\text{Km}) + 20 \log f(\text{MHz})$$

$$A_e(\text{dB}) = 32,44 + 20 \log 13 + 20 \log 170,19$$

$$A_e = 99,39(\text{dB})$$

Para o cálculo da atenuação em Espaço Livre adotou-se a maior frequência, pelo fato da mesma configurar o pior caso. Vale ressaltar novamente que a equação utilizada para A_e , está referenciada à antena isotrópica.

Atenuação na linha de transmissão (A_c) - (3º passo)

No projeto foi especificado:

Torres: 10 metros de altura (instalar as antenas no topo)

Cabo disponível: Cabletech RG 213

Derivação de cabos: 5 metros em Itajubá e 12 metros em Maria da Fé

$$l_c = 10 + 10 + 5 + 12$$

$$l_c = 37 \text{ (metros)}$$

Considerando que para o cabo RG 213 na maior frequência do enlace ($F = 170,19 \text{ MHz}$), a atenuação será de aproximadamente 9 dB/100 m, tem-se:

$$A_c \cong 3,5 \text{ dB}$$

Para calcularmos o comprimento total dos cabos que serão utilizados na instalação temos de considerar a altura das duas torres e as derivações em cada estação.

Usando a tabela fornecida pelo fabricante do cabo, calculamos a perda total aproximada causada pela linha de transmissão.

Atenuação nos filtros, conectores, etc. (A_d) - (4º passo)

Os filtros já foram considerados nas especificações. Logo, A_d será apenas a atenuação causada pelos conectores, que numa instalação normal são quatro. Logo,

$$A_d = 4 \text{ conectores} \cdot 0,25 \text{ dB / conector}$$

$$A_d = 1 \text{ dB}$$

Os filtros já foram considerados nas especificações. Logo, A_d será apenas a atenuação causada pelos conectores, que numa instalação normal são quatro.

Atenuação total da rota (A_T) - (5º passo)

Finalmente, pode-se constatar que a atenuação total da rota será de:

$$A_T = A_o + A_e + A_c + A_d$$

$$A_T = 34,4 + 99,39 + 3,5 + 1$$

$$A_T = 138,29 \text{ dB}$$

O cálculo da atenuação total do enlace é a parte mais trabalhosa do projeto. Agora podemos calcular o ganho mínimo das antenas, tendo apenas que converter para escala logarítmica a potência de transmissão (P_{TX}) e a potência mínima de recepção (P_L).

$P_t(\text{dBW})$ e $M(\text{dB})$

O transmissor trabalhará com $P_{TX} = 1(\text{W})$, logo:

$$P_t(\text{dBW}) = 10 \log \left(\frac{1(\text{W})}{1(\text{W})} \right)$$

$$P_t = 0 \text{ dBW}$$

A margem de desvanecimento foi especificada no projeto:

$$M = 30 \text{ (dB)}$$

Conforme dado do projeto, o transmissor possui potência de saída de 1 (W), ou seja, 0 (dBW).

A margem de desvanecimento (M) foi especificada no projeto em 30 (dB).

P_L (dBW)

Conforme dado do fabricante do equipamento:

Sensibilidade de silenciamento de 20 dB: $\leq 0,5 \mu\text{V}$ (em 50Ω)

$$P_{\text{MIN}} = P_L = \frac{E^2}{R} = \frac{(0,5 \times 10^{-6})^2}{50} =$$
$$P_L = 5 \times 10^{-15} \text{ (W)}$$



$$P_L = 10 \log (5 \times 10^{-15})$$
$$P_L = -143 \text{ (dBW)}$$

Cálculo do ganho mínimo das antenas (G_t e G_r) - (6º passo)

Substituindo P_r na equação de M, vem:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - A_d - A_c - A_e - A_o$$



$$M = P_r - P_L$$

$$M = P_t + G_t + G_r - A_d - A_c - A_e - A_o - P_L$$

$$M = P_t + G_t + G_r - A_T - P_L$$

$$G_t + G_r = M - P_t + A_T + P_L$$

$$G_t + G_r = 30 - 0 + 138,29 + (-143)$$

$$G_t + G_r = 25,29 \text{ (dBi)}$$

Cálculo do ganho mínimo das antenas (G_t e G_r) - (6º passo)

Normalmente, são utilizadas antenas iguais nas duas estações, logo o ganho mínimo solicitado seria de:

$$G_t + G_r = 25,29 \text{ (dBi)} \quad \therefore \quad G_{MIN} = \frac{25,29}{2} = 12,645 \text{ (dBi)}$$

Com antenas comuns, como Yagis profissionais, é possível viabilizar o enlace. Para a escolha da antena que será utilizada, deve-se consultar o manual de fabricantes de antenas para determinação do tipo exato, que evidentemente deverá ter ganho igual ou maior que o ganho mínimo calculado.

O exemplo dado mostra como a faixa de VHF é favorável para a implementação de radioenlaces. A rota é bastante obstruída ($A_o = 34,4 \text{ dB}$), e com potência de transmissão de 1(W) foi possível (e com antenas comuns) considerar o circuito executável na prática, com margem de desvanecimento igual ou superior a 30 dB (potência mediana no mínimo maior que 1000 vezes a potência mínima considerada).