

3

Mecanismos e Efeitos de Propagação em VHF e UHF

Consideremos inicialmente duas definições importantes para a caracterização canal de rádio-propagação. Uma dessas definições é a de mecanismos de propagação, que são responsáveis pela perda média de propagação no canal e que determinam o nível médio de sinal recebido, sendo considerados no cálculo de enlace ou cobertura; a outra definição é a dos efeitos de propagação, que são responsáveis por flutuações do sinal recebido (reforços e desvanecimentos) e considerados na estimativa de desempenho e cálculo da margem requerida pelo sistema.

A propagação se dá por diferentes mecanismos e efeitos dependentes da faixa de frequências utilizada e distâncias consideradas. Um resumo destas características pode ser visualizado na tabela 3.1 [3].

Dentre os mecanismos e efeitos citados na tabela 3.1, são de interesse neste trabalho aqueles relevantes nas faixas de UHF e VHF, que são as faixas utilizadas para a radiodifusão da TV Digital. Verificamos que os mecanismos são praticamente os mesmos e os efeitos da atmosfera e do terreno diferem apenas na presença dos dutos da faixa alta de UHF e o espalhamento troposférico em VHF.

Como a maioria das medidas obtidas em nosso banco de dados foi realizada na faixa de UHF e, pela similaridade da influência da atmosfera e do terreno nas duas faixas, vamos discutir neste trabalho os mecanismos na faixa de UHF.

Os mecanismos importantes para a nossa análise, portanto, são a propagação em visibilidade, a reflexão, a difração e a tropodifusão, enquanto que os efeitos a serem considerados são os de refração, multipercurso e obstruções locais pelo relevo e vegetação.

Frequências	Mecanismos de propagação	Efeitos da atmosfera e do terreno
ELF 30 - 300 Hz	Onda “guiada” entre a ionosfera e a superfície da Terra e refratada até grandes profundidades no solo e no mar	Atenuação em 100 Hz entre 0,003 e 0,03 dB/km sobre o solo e de 0,3 dB/km sobre a água do mar
VLF 3 - 30 kHz	Onda “guiada” entre a camada D da ionosfera e a superfície da Terra e refratada no solo e no mar	Baixas atenuações sobre o solo e no mar
LF 30 - 300 kHz	Onda “guiada” entre a camada D da ionosfera e a superfície da Terra até 100 kHz, onda ionosférica tornando-se distinta acima desta frequência.	Desvanecimento em distâncias curtas devido à interferência entre a onda ionosférica e a de superfície
MF 300 - 3000 kHz	Onda de superfície a curta distância e em frequências mais baixas e onda ionosférica a longa distância	Atenuação da onda de superfície reduz sua cobertura a 100 km; onda ionosférica forte à noite.
HF 3 - 30 MHz	Onda ionosférica acima da distância mínima; onda de superfície a distâncias curtas.	Comunicação muito dependente do comportamento da ionosfera; onda de superfície bastante atenuada.
VHF 30 - 300 MHz	Propagação em visibilidade; difração; tropodifusão (ondas espaciais).	Efeitos de refração; difração pelo relevo; espalhamento troposférico.
UHF 300 - 3000 MHz	Propagação em visibilidade; difração; reflexão e tropodifusão.	Efeitos de refração; multipercursos e dutos (faixa alta); difração e obstrução pelo relevo e vegetação.
SHF (3 - 30 GHz)	Propagação em visibilidade	Desvanecimento por multipercursos; atenuação por chuvas (acima de 10 GHz); obstrução pelo terreno.
EHF 30 - 300 GHz	Propagação em visibilidade	Desvanecimento por multipercursos; atenuação por chuvas; absorção por gases; obstrução por edificações.

Tabela 3.1 – Características de propagação por faixa de frequência

3.1. Mecanismos básicos

Serão descritos a seguir alguns mecanismos importantes para a compreensão da rádio-propagação, especialmente em radiodifusão de TV.

3.1.1. Propagação no espaço livre – visibilidade

O caso mais simples de propagação, no qual transmissor e receptor estão imersos em um espaço livre de obstruções em qualquer direção e o campo elétrico é calculado em um ponto qualquer de observação. O mecanismo de propagação determinante é o de propagação em visibilidade. Embora a propagação em espaço livre seja uma situação bastante particular, o seu entendimento e cálculo são úteis para que se desenvolvam expressões mais complexas e que possam melhor definir a propagação em diferentes ambientes e para diferentes sistemas. Também, sua

expressão pode servir como uma base de comparação com expressões mais complexas.

A perda (atenuação) de propagação é determinada pela relação entre a potência recebida e a potência transmitida. Inicialmente, será calculada a perda de propagação entre antenas isotrópicas (irradiação uniforme em todas as direções) e, posteriormente, será inserido o ganho das antenas.

A densidade de potência calculada a uma distancia d (em campo distante) do transmissor isotrópico é dada pela expressão (3.1), onde o ganho G_T é igual à unidade. A potência recebida é calculada da forma já mostrada no desenvolvimento da expressão 3.2). Aqui, no cálculo da área efetiva de recepção, o ganho G_R é também igual à unidade. Então:

$$s = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (3.1)$$

$$P_R = s \cdot A_e = \frac{E^2}{120\pi} \cdot \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad \therefore \quad P_R = \left(\frac{E\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_R}{120} \quad [\text{W}] \quad (3.2)$$

Como a perda básica de transmissão em espaço livre é definida como a razão entre as potências recebidas e transmitida para antenas isotrópicas, vem:

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.3)$$

Expressando em decibéis, temos a atenuação em espaço livre para antenas não isotrópicas que é dada por:

$$L_{fs} [\text{dB}] = 92,44 + 20 \log d [\text{km}] + 20 \log f [\text{GHz}] - G_T [\text{dBi}] - G_R [\text{dBi}] \quad (3.4)$$

Onde dBi é o ganho, em dB, em relação ao ganho da antena isotrópica (unitário).

3.1.2. Propagação sobre Terra Plana

Consideremos agora a presença da terra, tendo uma modelagem inicial plana e perfeitamente lisa. A figura (3.1) exemplifica como funciona esse mecanismo tendo um raio direto e um refletido.

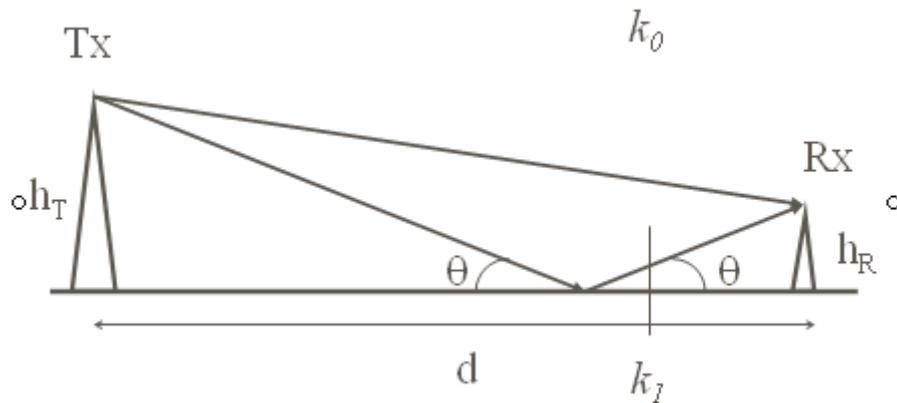


Figura 3.1 – Reflexão sobre Terra Plana

A potência recebida é dada pela aproximação de Norton [3]:

$$\frac{P_R}{P_T} \cong \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \left| 1 + R \cdot e^{j\Delta\phi} + (1 - R) F(w) \cdot e^{j\Delta\phi} \right|^2 \quad (3.5)$$

Nesta expressão é possível identificar uma onda direta, uma com reflexão e uma onda de superfície atenuada.

Na situação de campo distante ($d \gg 1$ e $d \gg h_R, h_T$) algumas aproximações podem ser feitas e a perda em dB tem a seguinte expressão:

$$L[\text{dB}] = 40 \log d[\text{m}] - 20 \log h_T[\text{m}] - 20 \log h_R[\text{m}] - G_T[\text{dBi}] - G_R[\text{dBi}] \quad (3.6)$$

Se a superfície refletora não é lisa, a onda refletida não possuirá direção única. O que ocorre é um espalhamento (difusão) da energia incidente, em várias direções, causado pela irregularidade (rugosidade) da superfície refletora. A Figura 3.2 ilustra o espalhamento de uma frente de onda plana (representada pelos raios incidentes paralelos) refletida em uma superfície rugosa.

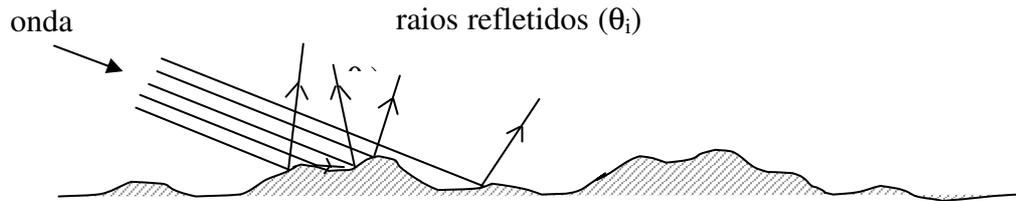


Figura 3.2 – Reflexão em superfície rugosa (espalhamento)

Observa-se na Figura 3.2 que, embora a lei de reflexão continue válida (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão), como a superfície é irregular, haverá inúmeros ângulos de incidência, distribuídos de maneira desordenada, dando origem a inúmeros ângulos de reflexão. Isso constitui o espalhamento da energia. O efeito prático da reflexão assim gerada (reflexão difusa) é que menos energia será acoplada ao receptor. Foi desenvolvido um critério prático para a avaliação da rugosidade de uma superfície. Seja a Figura 3.3 a seguir [4].

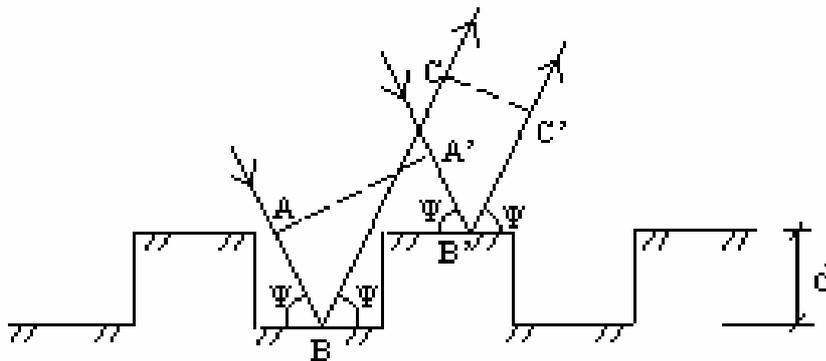


Figura 3.3 – Determinação da diferença de fase entre raios refletidos em superfície rugosa

Demonstra-se que a diferença de comprimento entre os dois percursos, $(AB + BC)$ e $(A'B' + B'C')$ é dada por:

$$\Delta l = \frac{d}{\sin \Psi} [1 - \cos(2\Psi)] = 2d \sin \Psi \quad (3.7)$$

A diferença de fase entre os percursos será, então:

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{4\pi d}{\lambda} \sin \Psi \quad (3.8)$$

Se $d \ll \lambda$, $\Delta\phi$ é pequeno e pode-se considerar a superfície como sendo lisa. O critério prático consiste em assumir que a superfície é rugosa quando $\Delta\phi \geq \pi/2$ que leva a:

$$d \geq \frac{\lambda}{8 \sin \Psi}, \text{ conhecido por Critério de Rayleigh} \quad (3.9)$$

Ou, se Ψ é suficientemente pequeno : $\sin \Psi \cong \Psi$, que leva o critério a ser expresso por $d \geq \frac{\lambda}{8\Psi}$ (3.10)

A rugosidade é, portanto, determinada pela diferença de fase entre raios que atingem diferentes pontos da superfície (com elevações distintas). Dessa forma, o espalhamento da energia está sendo analisado através da diferença de fase entre raios. Quanto menor a diferença (determinada pela relação entre o desnível d e o comprimento de onda λ), mais lisa é a superfície e menor será o espalhamento por ela causado. O que ocorre na prática é que, pela característica irregular do perfil das rugosidades, o desnível d é tratado como uma variável aleatória e o seu desvio padrão σ_h passa a ser a medida de quão acentuada é a rugosidade da superfície.

Substituindo d por σ_h na expressão (3.8), é definido o parâmetro C .

$$C = \frac{4\pi\sigma_h}{\lambda} \sin \Psi \quad (3.11)$$

$$\text{Para } \Psi \text{ pequeno : } C \cong \frac{4\pi\sigma_h}{\lambda} \Psi \quad (3.12)$$

Um critério usual é o seguinte :

$C < 0,1 \rightarrow$ superfície lisa;

$C > 10 \rightarrow$ superfície muito rugosa, de forma que o espalhamento é tão grande que pode-se desconsiderar a componente refletida, pois é desprezível a energia acoplada ao receptor através de reflexão.

Para valores de C entre 0,1 e 10, é definido o coeficiente de espalhamento: $C_e = e^{-C^2/2}$, obtido empiricamente. O coeficiente de reflexão especular é então corrigido pelo coeficiente de espalhamento, resultando no coeficiente de reflexão especular a ser usado :

$$|R'| = C_e |R| \quad (3.13)$$

3.1.3. Propagação por Difração

O fenômeno da difração pode ser entendido com base no princípio de Huygens, descoberto em 1678 pelo holandês Christiaan Huygens. O referido princípio considera que cada ponto de uma dada frente de onda age como se fosse uma fonte puntiforme de ondas. A nova frente de onda (num ponto posterior), é determinada pela superfície envoltória de todas estas ondículas esféricas emitidas por estas fontes puntiformes que se propagaram durante o intervalo pertinente.

Vamos analisar os casos de difração por um obstáculo e múltiplos obstáculos que são relevantes para o nosso trabalho [12].

3.1.3.1. Difração por um obstáculo isolado do tipo gume de faca

O método mais simples para o cálculo do efeito de um obstáculo no percurso do rádio elétrico (ótica de raios) entre o transmissor e o receptor é baseado na teoria da difração de Fresnel-Kirchoff e considera o obstáculo como um anteparo de espessura elementar e dimensão lateral infinita, posicionado perpendicularmente ao plano de propagação. A teoria, heurística, baseia-se na suposição de que o campo em qualquer ponto situado após o obstáculo pode ser calculado como a composição de campos elementares gerados por fontes virtuais situadas sobre a frente de onda incidente sobre o obstáculo, como ilustrado na figura 3.4.

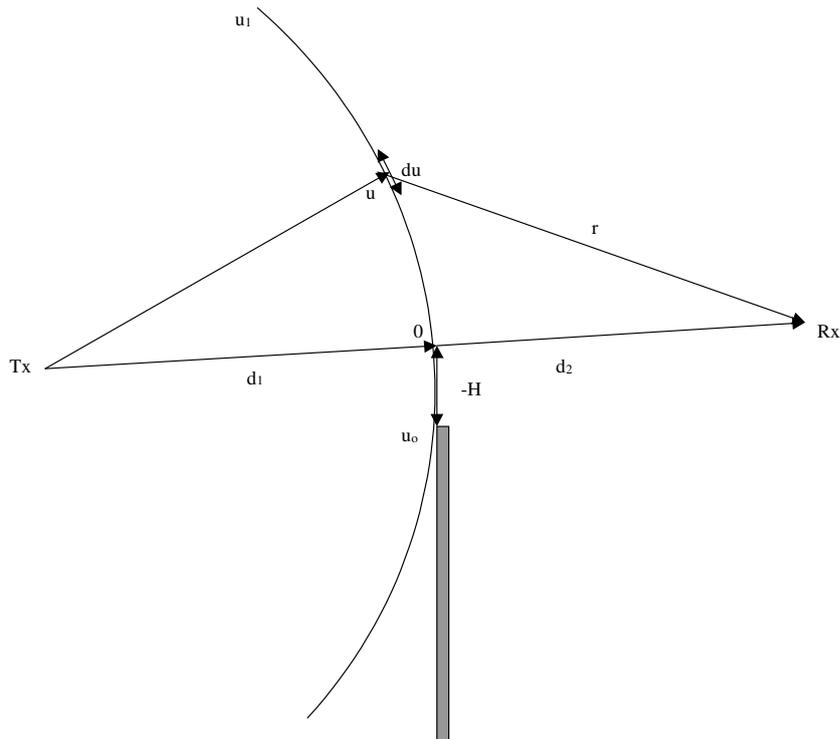


Figura 3.4 – Difração por obstáculo tipo gume de faca

Assume-se que cada elemento de linha du da frente de onda gera uma onda esférica, cuja amplitude decai com a distância de forma a ser determinada, ou seja,

$$dE = \frac{C}{f(r)} e^{-jk_0 r} du \quad (3.14)$$

O campo total no ponto de recepção é dado pela integral das contribuições dos elementos de linha.

$$E = C \int_{u_0}^{u_1} \frac{e^{-jk_0 r}}{f(r)} du \quad (3.15)$$

Empregando as seguintes aproximações para campo distante do anteparo:

$$\text{na amplitude} \quad r \cong d_2$$

$$\text{na fase} \quad r \cong d_2 + u^2 \frac{d_1 + d_2}{2d_1 d_2}$$

E usando as integrais de Fresnel

$$C(v) - jS(v) = \int_0^v \exp(-j\pi v^2 / 2) dv$$

onde

$$C(v) = \int_0^v \cos(-\pi v^2 / 2) dv \quad S(v) = \int_0^v \text{sen}(-\pi v^2 / 2) dv \quad (3.16)$$

Tem-se

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{-jk_0/d_2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(v_0) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S(v_0) \right] \right\} \quad \text{com } v \cong -\sqrt{2} \frac{H}{R} \quad (3.17)$$

Sendo H definido como a folga do obstáculo e R denominado raio da 1ª zona de Fresnel. Utilizando uma aproximação para as integrais de Fresnel, é possível mostrar que [3].

$$L_d[\text{dB}] = 6,9 + 20 \log \left[\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right] ; \quad v > -0,7 \quad (3.18)$$

A expressão final de atenuação, incluindo a atenuação de espaço livre é, então:

$$L[\text{dB}] \cong L_{fs} + L_d = L_{fs} + 6,9 + 20 \log \left[\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right] ; \quad v > -0,7 \quad (3.19)$$

Um exemplo de campo difratado por um obstáculo gume de faca é mostrado na Figura 3.5

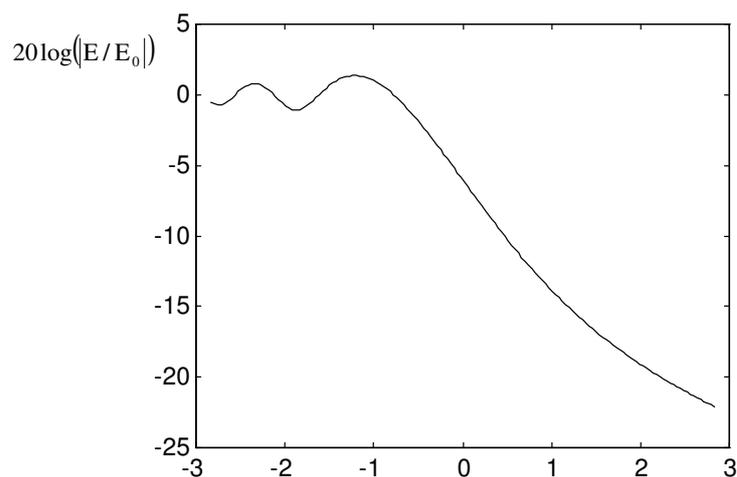


Figura 3.5 – Campo difratado por obstáculo gume de faca

3.1.3.2. Difração por um obstáculo isolado e arredondado

O método para o cálculo da perda por difração devida a um obstáculo isolado é baseado na teoria geométrica da difração, sendo o obstáculo modelado por um cilindro circular posicionado transversalmente à linha de visada direta entre as antenas. A forma do obstáculo é caracterizada pelo raio de curvatura (r_0) do topo. O topo do obstáculo é definido como a parte do contorno longitudinal compreendida entre os pontos (Q_1 e Q_2), determinados pelos horizontes das antenas, como ilustrado na Figura 3.6, que mostra ainda os demais parâmetros geométricos do método de cálculo.

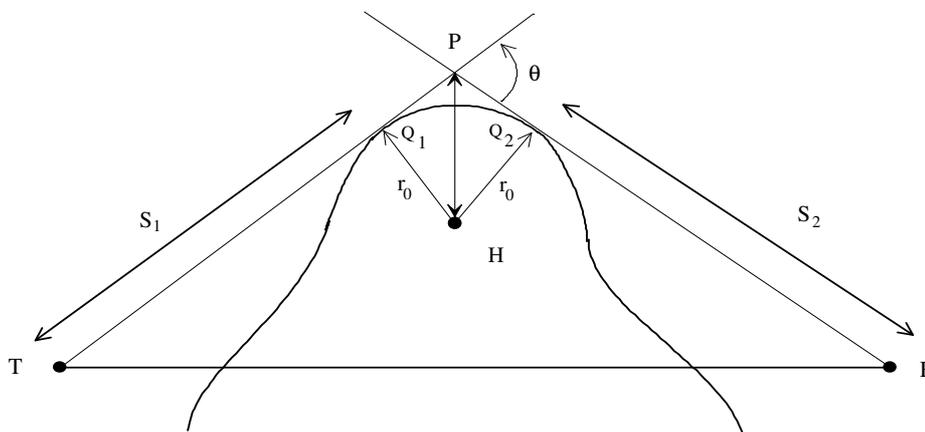


Figura 3.6 – Aproximação cilíndrica para um obstáculo isolado

A atenuação adicional pela difração em um obstáculo isolado é dada por

$$A_{ad}(dB) = J(V_0) + T(\theta) + Q(\xi) \quad (3.20)$$

O primeiro termo na expressão acima corresponde à atenuação adicional por um obstáculo de raio de curvatura nulo (ou obstáculo "gume de faca"). Os demais termos da expressão (1) são fatores de correção para levar em conta a curvatura do obstáculo [3]:

$$T(\theta) = 7,2\theta - 2\theta^2 + 3,6\theta^3 - 0,8\theta^4 \quad (3.21)$$

$$\rho = 0,826 \frac{\lambda^{2/3} r_0^{1/3}}{R_1} \quad (3.22)$$

$$Q(\chi) = \begin{cases} \chi T(\rho) / \rho & ; -\rho \leq \chi < 0 \\ 12,5\chi & ; 0 \leq \chi < 4 \\ 17,6\chi - 6 - 20 \log \chi & ; \chi > 4 \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\chi = \rho V_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cong \theta \left(\frac{\pi r_0}{\lambda} \right)^{1/3} \quad (3.24)$$

A aproximação "gume de faca" implica num cálculo otimista da perda por difração sendo portanto, em alguns casos, importante a determinação do raio de curvatura do obstáculo. Isto é feito através da determinação, pelo método dos mínimos quadrados, do raio do arco de círculo que aproxima os pontos do topo do obstáculo entre os horizontes das antenas (pontos Q1 e Q2 na figura 3.6). Tal procedimento exige que se conheça, com boa precisão, o perfil longitudinal do obstáculo.

3.1.3.3. Difração por obstáculos múltiplos

No caso de percursos difratados por obstáculos múltiplos, diversos métodos empíricos ou semi-empíricos são encontrados na literatura para o cálculo da perda por difração. Dentre eles, o único que considera o efeito da curvatura dos obstáculos é o método atualmente recomendado pelo ITU-R.

O primeiro passo para a aplicação do método do ITU-R consiste na identificação dos obstáculos e sua classificação em principais e secundários. O primeiro obstáculo principal é aquele que define o horizonte do transmissor, o segundo aquele que define o horizonte do primeiro e assim sucessivamente, até o receptor. Este processo, conhecido como método da "corda esticada", é ilustrado na figura 3.7, onde é mostrado de forma esquemática um enlace com três obstáculos principais. Definem-se como sub-enlaces as seções do percurso entre cada dois obstáculos principais consecutivos. Obstáculos contidos em sub-enlaces são classificados como obstáculos secundários. A atenuação total por difração múltipla é dada por:

$$A_{ad} \text{ (dB)} = \sum_{i=1}^N A_{adP_i} \text{ (dB)} + \sum_{j=1}^M A_{adS_j} \text{ (dB)} + C_N \quad (3.25)$$

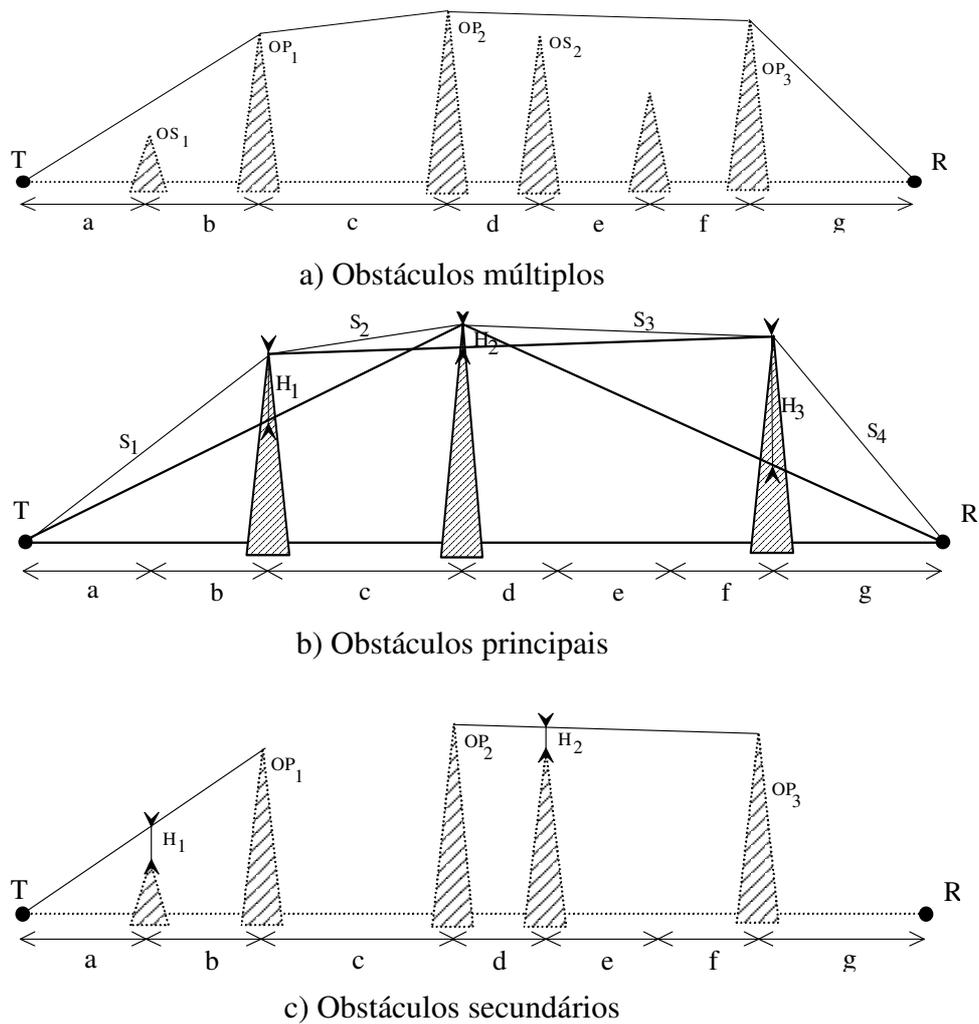


Figura 3.7 – Enlace com difração múltipla: classificação dos obstáculos

O primeiro somatório na expressão (3.27) corresponde à contribuição dos obstáculos principais. Cada termo está associado a um obstáculo principal, e é calculado como se este fosse um obstáculo isolado num enlace fictício, cujos extremos são os vértices, anterior e posterior ao obstáculo, da linha poligonal (corda esticada) que une o transmissor ao receptor passando por todos os obstáculos principais [3]:

$$A_{adP_i} = J(V_i) + T(\theta_i) + Q(\xi_i) \quad (3.26)$$

onde

$$v_i = \sqrt{2} \frac{H_i}{R_{li}} \cong \theta \sqrt{\frac{2S_i S_{i+1}}{\lambda(S_i S_{i+1})}} \quad (3.27a)$$

$$\rho_i = 0,826 \frac{\lambda^{2/3} r_{0i}^{1/3}}{R_{li}} \quad (3.27b)$$

$$\chi = \rho v_i \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cong \theta_i \left(\frac{\pi r_{0i}}{\lambda} \right)^{1/3} \quad (3.27c)$$

Os parâmetros H_i , R_{li} , θ_i , r_{0i} , S_i e S_{i+1} são, respectivamente, a folga, raio da 1ª zona de Fresnel, ângulo entre as tangentes ao topo, raio de curvatura e distâncias ao topo do i -ésimo obstáculo (ver figuras 3.7a e b). Na prática, os valores de S_i podem ser aproximados por suas projeções horizontais. Por exemplo, com referência ao exemplo da figura 3.7b, $S_1=a+b$, $S_2=c$, $S_3=d+e+f$ e $S_4=g$.

O segundo somatório corresponde à contribuição dos obstáculos secundários. Apenas um obstáculo secundário é considerado em cada sub-enlace, aquele que provoca maior atenuação, no caso do dimensionamento de enlaces, ou aquele que provoca menor atenuação, no caso do cálculo de interferências. Cada termo é calculado como se este fosse um obstáculo isolado "gume de faca" num enlace fictício, cujos extremos são os topos dos obstáculos principais adjacentes ao obstáculo secundário. No caso do primeiro sub-enlace, os extremos são o transmissor e o primeiro obstáculo principal, e no caso do último sub-enlace, o último obstáculo principal e o receptor.

$$A_{adS_j}(dB) = J(V_j) \quad (3.28)$$

Finalmente, o termo C_N é um fator de correção (reductor) empírico da atenuação total, dado por

$$C_N = \left[\frac{(S_2 S_3 \dots S_N)(S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{N+1})}{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)(S_3 + S_4) \dots (S_N + S_{N+1})} \right] \quad (3.29)$$

A literatura do ITU-R cita outras metodologias de difração que por não serem objeto do nosso estudo, não serão citadas neste trabalho.

3.1.4. Tropodifusão

Numa atmosfera homogênea ou estratificada, o campo recebido além do horizonte do transmissor é devido à difração. Numa atmosfera turbulenta, pode

ocorrer também o fenômeno de tropodifusão, no qual o sinal refletido ou refratado por irregularidades (bolhas) na troposfera atinge o receptor além do horizonte do transmissor. Este mecanismo produz sinais significativos na faixa de UHF, que tanto são utilizáveis em sistemas de comunicação como podem constituir-se em efeitos interferentes entre sistemas.

As irregularidades constituem-se de "bolhas" de índice de refração aproximadamente uniforme, localizadas e em movimento numa certa região da troposfera. Quando a antena transmissora ou a receptora são apontadas para esta região, é possível estabelecer comunicação. O processo é ilustrado na figura 3.8.

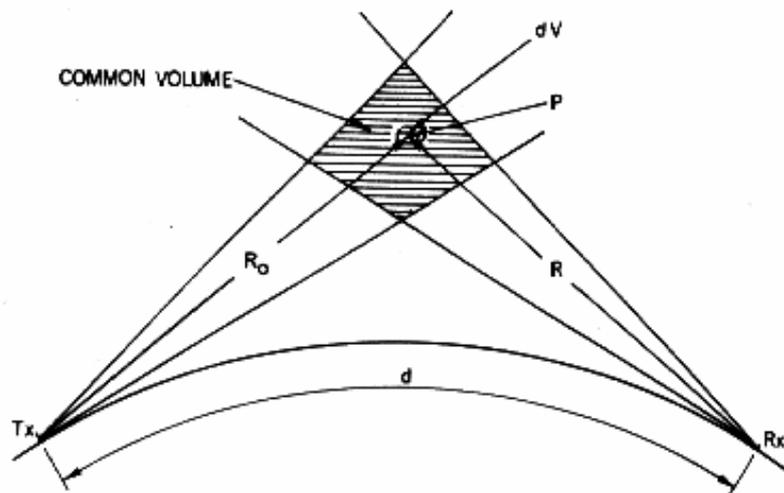


Figura 3.8 – Tropodifusão

A relação entre a potência transmitida e recebida num sistema em tropodifusão é obtida a partir da complexa teoria da propagação em meios turbulentos. O resultado final é da forma [3]

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{4A}{\lambda d} \cdot \left(\frac{2\pi l'}{\lambda} \right)^2 \quad (3.30)$$

onde $d(km)$ é a distância entre o transmissor e o receptor, $A(m^2)$ é a área de abertura das antenas (supostas iguais), $\lambda(m)$ o comprimento de onda e $l' (m)$ o tamanho de escala da turbulência.

Para as distâncias e faixas de frequência envolvidas neste trabalho o efeito da tropodifusão não se torna relevante, conseqüentemente não será levado em conta na construção do nosso modelo.

3.2. Efeitos da atmosfera e relevo

Os efeitos citados para a análise que faremos serão a Refração, os multipercursos e obstruções pelo relevo.

3.2.1. Refração

A refração é um efeito da modificação da direção de uma onda que, passando através de uma interface que separa dois meios, tem, em cada um deles, diferentes velocidades de propagação.

Em condições normais de céu claro (ausência de chuvas), o índice de refração da troposfera, que depende da pressão, temperatura e umidade relativa do ar, é ligeiramente superior à unidade ($\approx 1,0003$) e decresce lentamente com a altura. Na direção paralela à superfície da terra, o índice de refração sofre variações muito mais lentas do que com a altura podendo, em condições normais, ser considerado aproximadamente constante por algumas dezenas de quilômetros. Nestas frequências, variações não desprezíveis do índice de refração ocorrem em distâncias comparáveis com o comprimento de onda.

O decréscimo do índice de refração com a altura provoca um encurvamento da trajetória das ondas rádio na direção da superfície da terra. Condições anormais de temperatura e umidade relativa provocada por efeitos meteorológicos podem provocar variações abruptas ou decréscimos muito acentuados do índice de refração com a altura. A ocorrência de variações abruptas do índice de refração pode provocar reflexão parcial dos sinais de rádio. A ocorrência de reflexões parciais ou dutos tanto pode provocar regiões de sombra no receptor como multipercurso atmosférico (diversos raios interferentes atingindo o receptor), ou ainda provocar interferências em receptores de outros enlaces distantes.

A presença de irregularidades (variações espaciais de pequeno tamanho de escala) no índice de refração da troposfera provoca espalhamento e reflexões

múltiplas das ondas de rádio. Este efeito pode ser utilizado como mecanismo de propagação para sistemas de baixa e média capacidade e longo alcance em VHF e UHF (sistemas de tropodifusão) mais também é um mecanismo gerador de interferências.

O índice de refração modificado transforma o problema da terra esférica numa geometria modificada equivalente à terra plana. Este não é, entretanto, o único mapeamento possível, nem o mais conveniente para aplicações em engenharia.

O método clássico utilizado para levar em consideração os efeitos da refração atmosférica introduz o conceito de raio equivalente da terra. Através deste método, é possível traçar uma superfície sobre a qual a trajetória do raio é uma reta, mantendo-se as distâncias verticais entre a trajetória e a superfície da terra e as distâncias horizontais em relação às antenas.

O raio equivalente da terra a_e é normalmente representado na forma

$$a_e = ka \quad k = \frac{n(a)}{n(a) + a \frac{dn}{dz}} \cong \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dz}} \quad (3.31)$$

Deve supor que o raio da terra é maior do que seu valor real por um fator k de 4/3. Isto permite dobrar-se a refratividade das ondas de rádio para a terra.

Na atmosfera padrão, ou normal,

$$\frac{dn}{dz} = -40 \times 10^{-6} \text{ unid.}n/km \quad k = 4/3 \quad a_e = 8500 \text{ km}$$

$$\frac{dN}{dz} = -40 \text{ unid.}n/km \quad \text{e} \quad \frac{dM}{dz} = 117 \text{ unid.}n/km$$

Entretanto, em condições reais, variações significativas ocorrem na troposfera. Quando o gradiente do índice de refração é maior que -40 unidades N/km, o encurvamento dos raios é menor que na atmosfera padrão e a condição é dita sub-refrativa. Quando o gradiente do índice de refração é menor que -40 unidades N/km, o encurvamento dos raios é maior que na atmosfera padrão e a condição é dita super-refrativa.

3.2.2. Efeitos de Multipercurso

Em ambientes o sinal que chega ao receptor é fruto da composição de ondas eletromagnéticas que percorreram diversos percursos distintos entre transmissor e receptor, através de diferentes mecanismos de propagação. No que se refere à frequência, a faixa de frequências escolhida para sistemas de radiodifusão é favorável à propagação do sinal transmitido através de mecanismos de reflexão, difração, espalhamento e visada direta. Nas grandes áreas urbanas, edifícios representam obstáculos nos quais a onda propagante pode refletir-se ou difratar-se, conforme indica a figura 3.9 que, embora ilustre um sistema móvel, serve para o nosso exemplo de multipercursos. Como a unidade móvel está, em geral, imersa no ambiente, ela receberá raios através dos vários mecanismos de propagação gerados pelo ambiente. Os vários raios refletidos no ambiente urbano são os principais causadores do multipercurso.

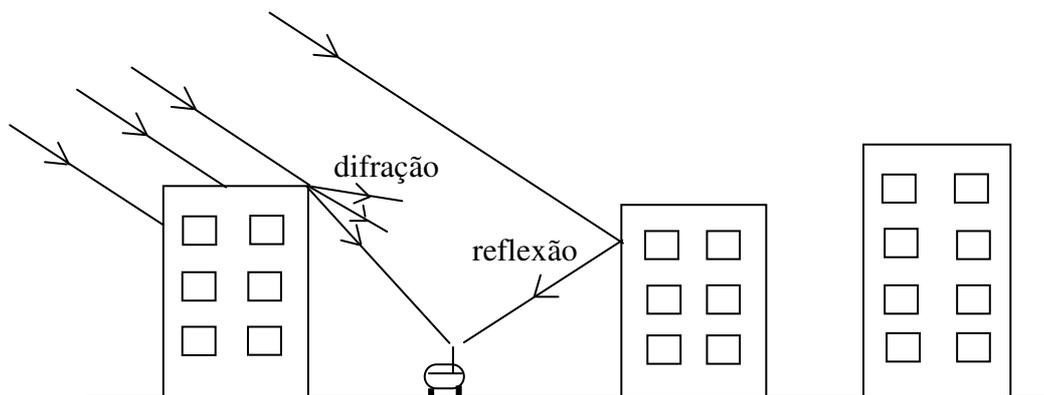


Figura 3.9 – Cenário de multipercurso por reflexão

No receptor, os campos associados aos diferentes percursos somam-se vetorialmente e produzem um campo resultante oscilante. A queda no nível do sinal recebido devido ao multipercurso é conhecida por desvanecimento em pequena escala.

Podemos resumir os efeitos do multipercurso em seus aspectos positivos e negativos [16]:

Positivos: A principal vantagem da propagação com multipercursos é que permite uma comunicação uniforme quando o transmissor e o receptor não estão

em visibilidade. Os multipercursos permitem o sinal chegar no seu destino ultrapassando os obstáculos (montanhas, prédios, túneis, estacionamentos subterrâneos, etc) mantendo assim relativamente estável a cobertura do sinal.

Negativos: Os multipercursos causam também muitas perturbações no sinal. Os três principais são retardo na propagação, interferências entre percursos diferentes vindos do transmissor, com criações de rápidas flutuações na recepção do sinal (Desvanecimento de Rayleigh); e modulação aleatória da frequência devido ao deslocamento Doppler nos diferentes percursos.

3.2.3. Obstruções pelo Relevo

O conhecimento da morfologia da região é de extrema importância no planejamento de cobertura da mesma. Os prédios e a vegetação influenciam grandemente o resultado da propagação.

O desvanecimento em larga escala, também conhecido por sombreamento, está mais relacionado a obstruções naturais (relevo e vegetação) e a construções, como casas e edifícios, que fazem com que o receptor fique em uma região de sombra eletromagnética (ou de nível de sinal bastante reduzido) quando há obstrução. Quando é obstruído, o sinal chega ao receptor basicamente através de difração e espalhamento, e a amplitude do sinal assim recebido segue uma função de densidade de probabilidade (fdp) Normal (ou log-normal, em dB), ou Gaussiana.

Em síntese, os principais efeitos que são relevantes, atuantes na faixa de UHF são a refração e multipercursos onde serão analisadas a sua aplicabilidade e interferências nos métodos de previsão destes efeitos. Os Dutos ocorrem mais na faixa alta de UHF que não serão explorados neste trabalho.