

3 Propagação

3.1. Introdução

A propagação se dá por diferentes mecanismos e efeitos dependentes da faixa de freqüências utilizada e da distância considerada. São de interesse desse trabalho aqueles de relevância nas faixas de UHF e VHF, que são as utilizadas para a radiodifusão da TV Digital.

Em UHF e VHF os mecanismos de propagação são bem parecidos e os efeitos da atmosfera e do terreno diferem apenas pela presença de dutos na faixa alta de UHF e o espalhamento troposférico em VHF. Nessas faixas as ondas eletromagnéticas se propagam por três mecanismos [13], reflexão (especular e difusa), difração e espalhamento.

Reflexão especular ocorre quando as ondas eletromagnéticas encontram uma superfície lisa e as dimensões lineares são grandes em comparação com o comprimento de onda da onda propagante. Esse tipo de reflexão acontece, por exemplo, na superfície da terra.

O mecanismo da difração é a capacidade das ondas eletromagnéticas contornarem obstáculos, quando esses obstruem a visada entre o transmissor. Esse fenômeno se dá porque as ondas se propagam como se cada ponto da frente de onda gerasse uma nova onda. Com isso ao se deparar com um obstáculo, as fontes pontuais da frente de onda acima do obstáculo continuam irradiando, fazendo com que a região de sombra atrás do obstáculo também seja iluminada.

O espalhamento se dá principalmente devido ao fenômeno da reflexão difusa, que ocorre quando a onda eletromagnética encontra uma superfície rugosa cuja rugosidade é comparável com o seu comprimento de onda. Pode também ocorrer devido à presença no meio de propagação de objetos com dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda do sinal ou devido a outras irregularidades do canal.

Devido aos obstáculos presentes no percurso entre transmissor e receptor, tais como vegetação, edificações ou a presença de lagos ou rios, se

torna difícil que a propagação se dê sem a ocorrência de múltiplas reflexões e espalhamentos incoerentes. Tal fato que faz com que a onda eletromagnética percorra diferentes caminhos de comprimentos também diversos. Quando essas ondas se combinam, pode ocorrer o fenômeno do desvanecimento por multipercursos, bem como um acréscimo no nível do sinal, dependendo da combinação de fases dos sinais oriundos dos percursos distintos. Além disso, o que se observa é a atenuação do nível do sinal à medida que a distância entre o transmissor e receptor aumenta.

Os modelos de propagação procuram prever o nível médio do sinal recebido a uma certa distância do transmissor, bem como a variabilidade em torno desse valor médio.

Numa transmissão em faixa estreita, onde o efeito da seletividade em frequência não é importante, a propagação por multipercursos causa variações rápidas e profundas na amplitude e fase do sinal. Nas transmissões de faixa larga usando-se de pulsos, o efeito é o de produzir uma série de réplicas retardadas do pulso transmitido, resultado do efeito seletivo do canal.

Os fenômenos de flutuação do sinal observados são descritos como desvanecimentos lentos e rápidos.

Desvanecimentos lentos ocorrem quando o receptor passa atrás de prédios, morros, árvores, ou seja, quando este se move em regiões de sombra de montanhas ou construções.

Desvanecimentos rápidos se referem a flutuações rápidas na amplitude do sinal e ocorrem em distâncias próximas a meio comprimento de onda. Essas variações em pequena escala ocorrem quando múltiplos raios atingem o receptor devido a reflexão, difração e espalhamento em construções, veículos e outros objetos presentes no ambiente.

Um dos mais importantes requisitos para um sistema de TV é que deve haver uma intensidade de sinal adequada nas áreas de cobertura. Portanto é muito importante ser possível prever o tamanho da área a ser coberta com qualidade de sinal aceitável para a implementação do serviço em uma determinada região. Sobre esse contexto, é imprescindível um entendimento da influência dos fatores de urbanização e do terreno.

3.2. Propagação no espaço Livre

É o caso mais simples, em que a propagação via rádio está sujeita a uma análise determinística com situações idealizadas em que o transmissor e o

receptor estão localizados em um espaço livre de obstáculos em qualquer direção. Esse apresenta um caso idealizado, mas pode ser útil para dar uma visão inicial dos mecanismos de propagação.

Por esse modelo, se uma antena transmissora está situada no espaço livre, sob a ausência de obstrução, tendo ganho G_T e irradiando uma potência P_T [W], a densidade de potência produzida a uma distância d , é expressa por:

$$S \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (3.1)$$

A potência recebida por uma antena receptora, com ganho G_R e área efetiva A , é, portanto:

$$A = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \quad (3.2)$$

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

A perda de espaço livre (L), que é definida entre a razão entre a potência transmitida e recebida, é dada por:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (3.4)$$

Essa perda geralmente é expressa em dB. Sendo assim, podemos reescrever a eq. (3.4) em dB da seguinte forma:

$$L[dB] = -10 \log G_T - 10 \log G_R + 20 \log f_{MHz} + 20 \log d_{Km} + 32,44 \quad (3.5)$$

Pode-se verificar através da eq. (3.5) que no modelo do espaço livre a potência cai com o inverso do quadrado da distância, ou seja, o nível de potência recebida cai 6 dB quando a distância é dobrada. Verifica-se também claramente a influência da frequência no nível do sinal recebido.

Sabe-se que na realidade o nível do sinal recebido cai com um fator maior do que 2 (geralmente entre 3,5 e 4) [14]. Isso ocorre ao se considerar os fatores de urbanização, vegetação, relevo e reflexões.

3.3. Propagação em Terra Plana

O modelo de terra plana considera a presença da terra com uma superfície refletora lisa e plana como mostrada na Figura 4. Essa configuração leva em consideração não somente o raio direto entre o transmissor e receptor, como também o raio refletido na superfície da terra. A atenuação nestes percursos individuais é dada pela equação de espaço livre, eq. (3.4), e o campo resultante irá depender da diferença no comprimento dos percursos e do coeficiente de reflexão da superfície.

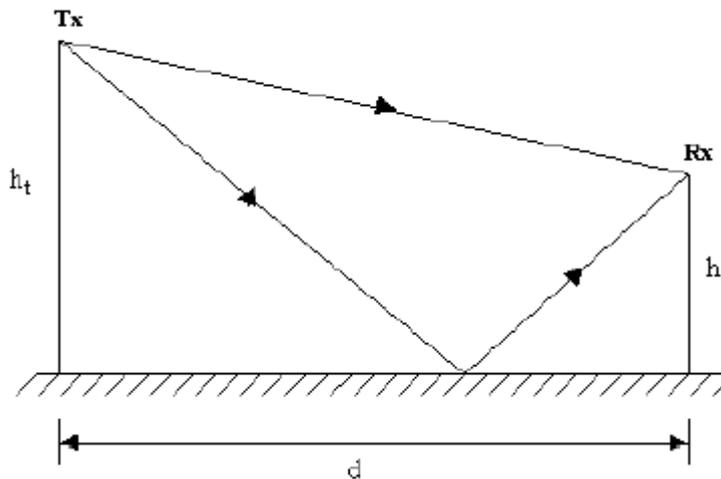


Figura 4: Propagação sobre terra Plana

Como, em geral, as alturas das antenas são pequenas em relação à distância entre elas é normal assumir, no que diz respeito à atenuação, que a diferença no comprimento de percurso é desprezível. Contudo, quando se refere à fase das ondas recebidas isso não pode ser feito.

Assumindo um coeficiente de reflexão para o solo de -1 e que a distância entre transmissor e receptor é bem maior que as alturas das respectivas antenas pode ser mostrado que as potências recebidas e transmitidas se relacionam pela seguinte expressão conhecida como equação de Terra-plana [14]:

$$\frac{P_R}{G_T} = P_T G_T \left[\frac{h_T h_R}{d^2} \right]^2 \quad (3.6)$$

A eq. (3.6) pode ser escrita em dB por:

$$L_p[dB] = 40 \log d - (10 \log G_T + 10 \log G_R + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad (3.7)$$

onde as unidades de h_t , h_r e d devem ser as mesmas.

Nota-se uma dependência com a quarta potência da distância, de modo que a potência recebida diminui de 12 dB quando se dobra a distância. Percebe-se também que a frequência não aparece na expressão, isto é uma consequência de ter assumido h_t e h_r muito maiores que d e que a superfície é perfeitamente refletora.

3.4. Propagação em obstrução

Como já mencionado, quando a propagação ocorre em ambientes com obstáculos, a onda eletromagnética sofre o fenômeno da difração. Porém, mesmo com essa capacidade de vencer tais obstáculos, o que é percebido como resultado destas obstruções é uma perda de parte da energia, denominada perda por difração.

Dependendo da formação ou do número de obstáculos, o comportamento da onda eletromagnética e, portanto da perda variam.

A Recomendação ITU-R 526-8 [15] apresenta os modelos que estudam o comportamento do sinal de VHF e UHF na presença de obstáculos.

3.4.1. Difração devido a obstáculo isolado do tipo “gume-de-faca”

Trata-se do método mais simples para o cálculo do efeito da perda por difração causada por um obstáculo no percurso da onda eletromagnética. O obstáculo é modelado por um semi-plano posicionado transversalmente ao percurso do enlace. Para aplicações em teoria eletromagnética, a intensidade do campo de uma onda difratada a um pico estreito, dito gume de faca, é descrito pela expressão abaixo [16]:

$$\frac{E}{E_0} = F e^{j\Delta\Phi} \quad (3.8)$$

Onde E_0 é campo de espaço livre sem difração de gume de faca presente, F é o coeficiente de difração e $\Delta\Phi$ é a diferença de fase em relação ao percurso da onda direta. A perda devida à difração é:

$$J(v) = 20 \log F \quad (3.9)$$

onde F é dado por:

$$F = \frac{S + 0,5}{\sqrt{2} \operatorname{sen}\left(\Delta\Phi + \frac{\pi}{4}\right)} \quad (3.10)$$

Na definição de F .

$$\Delta\Phi = \arctan g\left(\frac{S + 0,5}{C + 0,5}\right) - \frac{\pi}{4} \quad (3.11)$$

e C e S são as integrais de Fresnel, dadas por:

$$C = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi}{2} x^2\right) dx \quad (3.12)$$

$$S = \int_0^v \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} x^2\right) dx \quad (3.13)$$

Onde v é um parâmetro adimensional, definido como:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \cong \sqrt{2} \frac{h}{R_1} \quad (3.14)$$

Em que R_1 é denominado raio do primeiro elipsóide de Fresnel dado por:

$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1' d_2'}{d_1' + d_2'}} \quad \text{para } n = 1 \quad (3.15)$$

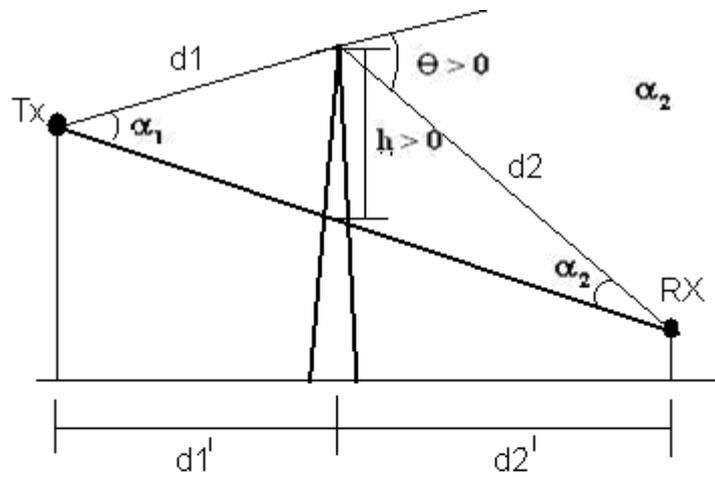
Como mostra a Figura 5, d_1 e d_2 são as distâncias das extremidades do percurso ao topo do obstáculo e h a altura do gume de faca.

Nesse caso extremamente idealizado, o parâmetro v pode ser expresso em função dos dados geométricos retirados da Figura 5.

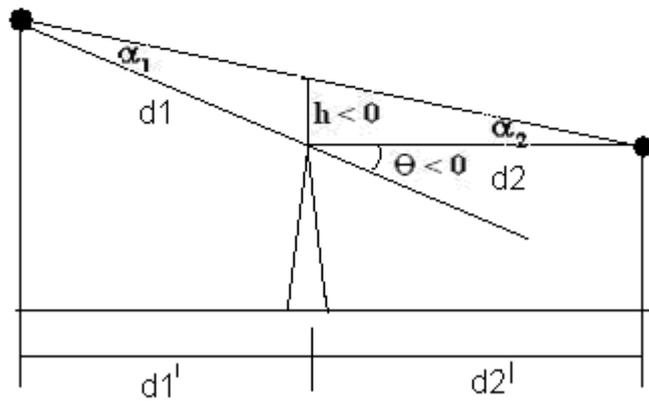
$$v = \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}} \quad (3.16)$$

Ou

$$v = \sqrt{\frac{2d\alpha_1\alpha_2}{\lambda}} \quad (3.17)$$



(a)



(b)

Figura 5: Difração por gume de faca

Duas situações possíveis onde se pode prever os efeitos da difração por gume de faca são quando a linha de visada não é obstruída e quando não há linha de visada devido à obstrução. A Figura 5 (b) ilustra o primeiro caso onde o obstáculo se encontra abaixo da linha de visada, portanto h assume valor negativo e v se torna positivo. Nessa condição $F \geq 0.5$.

A segunda condição é mostrada na Figura 5 (a) onde a onda é difratada por uma obstrução de gume de faca, portanto h é positivo e v se torna negativo. Desse modo tem-se $0 \leq F \leq 0.5$

A Figura 6 mostra a solução exata para o cálculo de $J(v)$ em dB.

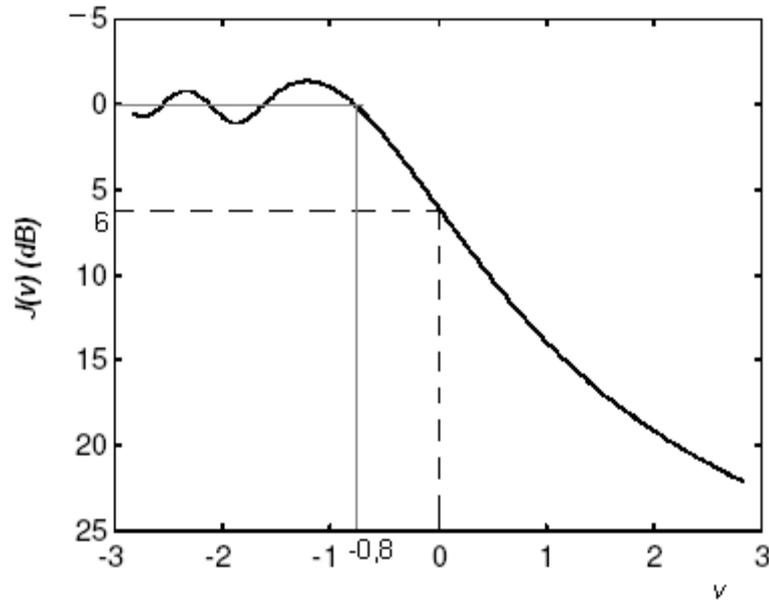


Figura 6: Perda por gume de faca

Para valores de v maiores do que $-0,78$, um valor aproximado pode ser obtido para a eq.(3.9) expressa por:

$$J(v) = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1\right) \quad (3.18)$$

Observe que, quando $h=0$ (obstáculo tangenciando a linha de visada) e pela eq. (3.14) $v=0$, logo o fator de perda por difração pela Figura 6 é $L=6$ dB. Pode-se observar também que a perda aumenta monotonicamente como o acréscimo de v (aumento de h) a partir de $v = -0.78$ (que corresponde a uma obstrução de 60% da primeira zona de Fresnel).

3.4.2. Difração devido a obstáculo isolado arredondado

Normalmente os obstáculos encontrados no percurso apresentam formatos irregulares, tornando sua representação por um "gume de faca" muito imprecisa. A fim de se caracterizá-los de forma mais realista, são utilizadas aproximações por outros tipos de formas geométricas.

O método apresentado em [15] é baseado na teoria geométrica da difração, sendo o obstáculo representado por um cilindro circular posicionado transversalmente a 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 Q1 e Q2, determinados pelos horizontes das antenas.

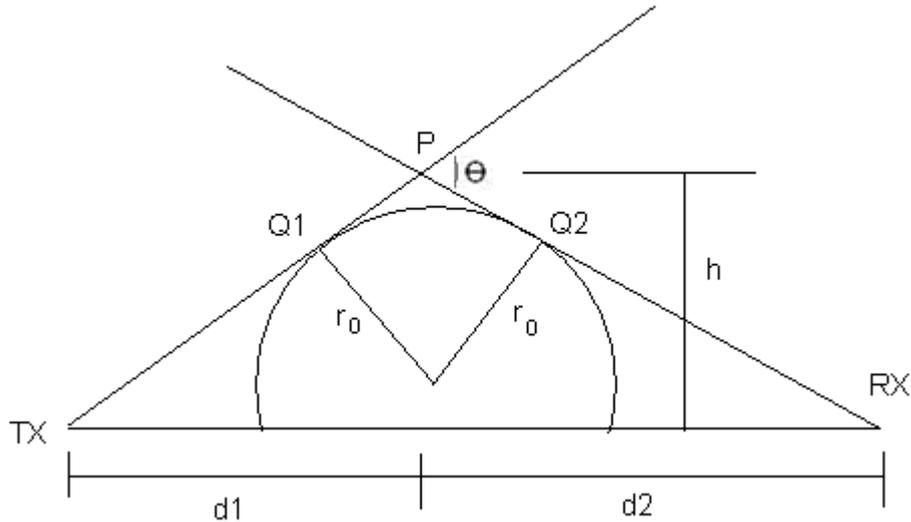


Figura 7: Representação de um obstáculo arredondado

A atenuação adicional dada por um obstáculo isolado é dada por:

$$A(dB) = J(v_0) + T(\theta) + Q(\xi) \quad (3.19)$$

$J(v_0)$ corresponde à atenuação por um obstáculo isolado do tipo “gume de faca”. Os demais termos levam em consideração o formato cilíndrico do obstáculo adicionando um fator de correção.

$$T(\theta) = 7,2.\theta - 2.\theta^2 + 3,6.\theta^3 - 0,8.\theta^4 \quad (3.20)$$

$$\rho = 0,826 \frac{\lambda^{\frac{2}{3}} r_0^{\frac{1}{3}}}{R_1} \quad (3.21)$$

$$Q(\chi) = \begin{cases} \chi \frac{T(\rho)}{\rho} & -\rho \leq \chi < 0 \\ 12,5.\chi & 0 \leq \chi < 4 \\ 17,6\chi - 6 - 20 \log \chi & \chi > 4 \end{cases} \quad (3.22)$$

Onde:

$$\chi = \rho \cdot v_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cong \theta \left(\frac{\pi \cdot r_0}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.22)$$

Esse método apresenta resultados mais precisos quando comparado com resultados usando-se aproximações por gume de faca. Porém, para ser aplicado, é necessário o conhecimento com boa precisão do perfil longitudinal do obstáculo.

3.4.3 Difração por Múltiplos Obstáculos

Quando a transmissão se dá na presença de múltiplos obstáculos, alguns métodos empíricos ou semi-empíricos podem ser utilizados para se calcular a perda por difração.

O método apresentado por Assis [17], conhecido como método Deygout-Assis demonstra uma solução simplificada para o problema de múltiplas difrações das ondas eletromagnéticas por obstáculos em terrenos irregulares.

A perda para o enlace é obtida diretamente da análise das distâncias e das alturas adequadamente selecionadas do perfil do relevo.

A técnica usada assume que cada obstáculo pode ser representado por um cilindro de raio igual ao da curvatura do topo do obstáculo. A solução é baseada no método proposto por Deygout [18] para obstruções do tipo gume-de-faca.

O primeiro passo para aplicação desse método consiste em identificar os obstáculos e classificá-los como principais e secundários.

Para identificar os obstáculos principais deve-se aplicar o chamado método da “corda esticada”. O primeiro obstáculo principal é aquele que define o horizonte do transmissor, o segundo aquele que define o horizonte do primeiro obstáculo principal e assim sucessivamente, até chegar ao receptor.

Os obstáculos secundários são aqueles contidos nos sub-enlaces, definidos como as seções do percurso entre cada dois obstáculos principais consecutivos.

A Figura 8 apresenta o método da “corda esticada” para um enlace com três obstáculos principais.

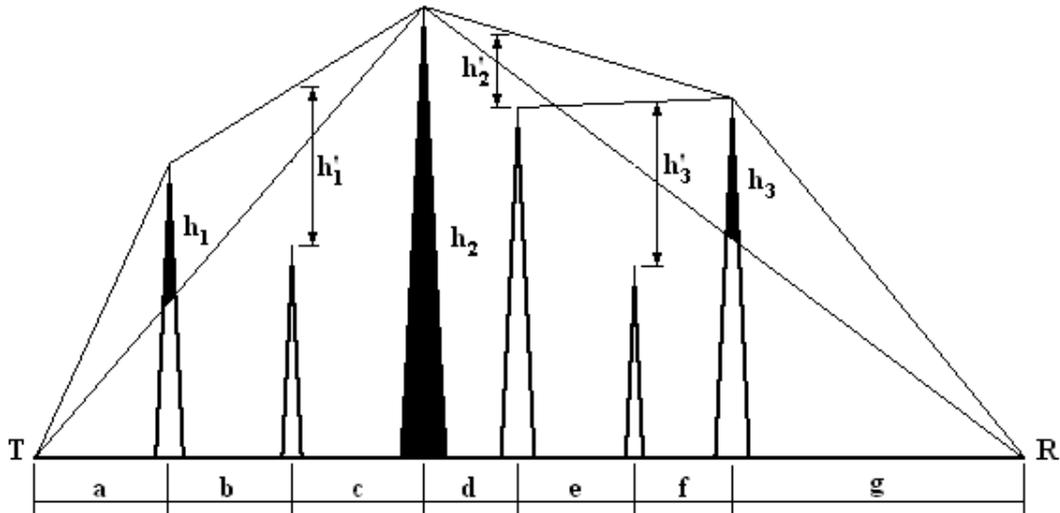


Figura 8: Método da corda esticada

A atenuação total por difração múltipla é dada por:

$$A_{total} (dB) = \sum_{i=1}^N A_{Pi} (dB) + \sum_{j=1}^M A_{Si} (dB) + 20 \log C_N \quad (3.23)$$

O primeiro somatório corresponde à contribuição dos obstáculos principais, onde cada termo está associado a um obstáculo principal e é calculado considerando-o como se fosse um obstáculo isolado num enlace fictício, cujos extremos são vértices, anterior e posterior ao obstáculo, da linha poligonal (corda esticada) que une o transmissor ao receptor passando por todos obstáculos principais.

O segundo termo do somatório corresponde à contribuição dos obstáculos secundários. Apenas um obstáculo secundário é considerado em cada sub-enlace, o que provoca maior atenuação.

$$\begin{aligned} A_{Pi} &= J(v_i) + T(\theta_i) + Q(\xi_i) \\ A_{Si} &= J(v_i) \end{aligned} \quad (3.24)$$

3.5. Efeito de Multipercurso

Principalmente em ambientes urbanos onde há a presença de muitas construções, que servem como “espalhadores” da energia eletromagnética, a ocorrência de fenômenos como difrações, reflexões é bem comum.

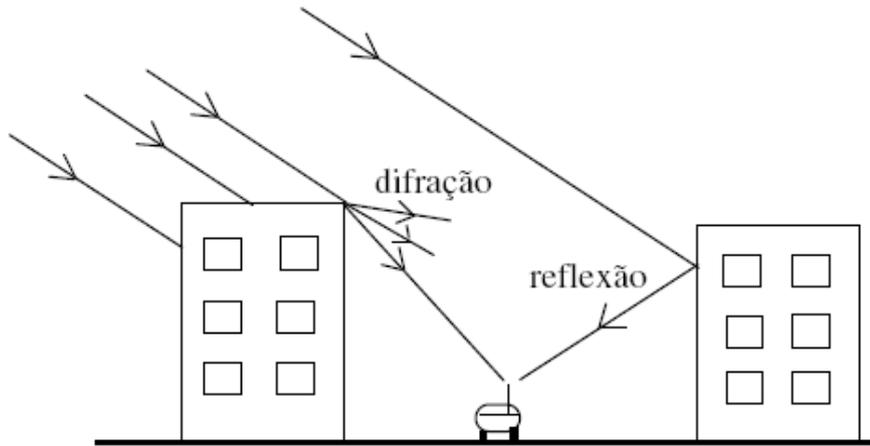


Figura 9: Fenômeno de Multipercurso

Como pode ser visto na Figura 9 a presença desses inúmeros espalhadores gera o fenômeno de multipercurso, que é a ocorrência de vários trajetos de raios entre o transmissor e o receptor. Com se deseja para o sistema de TV digital uma mobilidade, o fenômeno de multipercursos é até favorável por permitir a recepção mesmo sem a necessidade de visada. Em contra partida, os multipercursos causam também muita perturbação no sinal devido a interferências entre percursos diferentes vindo do transmissor, podendo ser percebida como uma rápida flutuação na recepção do sinal. Também podem gerar modulação aleatória da frequência devido ao deslocamento Doppler nos diferentes percursos.

3.6. Campo Elétrico

Quando se refere a estudos de eletromagnetismo para sistemas de TV, normalmente, apresenta-se na literatura resultados em magnitude de campo elétrico associado à onda eletromagnética em dB($\mu\text{V}/\text{m}$).

Por definição o campo elétrico é dado por:

$$E_{ef} [dB(V/m)] = 10 \log |E_{ef}|^2 = 20 \log |E_{ef}| \quad (3.25)$$

Sabendo-se que a potência transmitida por uma antena transmissora produz no ponto de recepção uma densidade de potência S_R em $[\text{W}/\text{m}^2]$. Considerando que a antena receptora tenha uma área efetiva de A_{ef} , sabe-se que a potência recebida por essa antena é dada por:

$$P_R = S_R \times A_{ef} \quad [\text{w}] \quad (3.26)$$

Onde A_{ef} é:

$$A_{ef} = G_R \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad [\text{m}^2] \quad (3.27)$$

Como a densidade de potência está relacionada com o campo elétrico por:

$$S_R = \frac{|E_{ef}|^2}{\eta_0} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.28)$$

Onde η_0 é a impedância intrínseca do meio

Substituindo as eq. (3.27) e (3.28) em (3.26) e separando o E_{ef} , temos que:

$$|E_{ef}|^2 = \frac{4\pi P_R \eta_0}{\lambda^2 G_R} \quad [\text{V/m}]^2 \quad (3.29)$$

Sendo assim,

$$\begin{aligned} E_{ef} [dB(V/m)] &= 10 \log |E_{ef}|^2 = 10 \log \left(\frac{4\pi P_R \eta_0}{\lambda^2 G_R} \right) \\ &= 10 \log \left(\frac{4\pi \eta_0}{\lambda^2} \right) + P_R (dBW) - G_R (dB) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Para se saber o valor do campo elétrico em dB($\mu\text{V/m}$) associada a uma potência em dBm é necessário então usa a equação abaixo.

$$E_{ef} [dB(\mu\text{V/m})] = 90 + 10 \log \left(\frac{4\pi \eta_0}{\lambda^2} \right) + P_R (dBm) - G_R (dB) \quad (3.31)$$

Esses valores de campo elétrico serão apresentados como resultados das medições de campo.