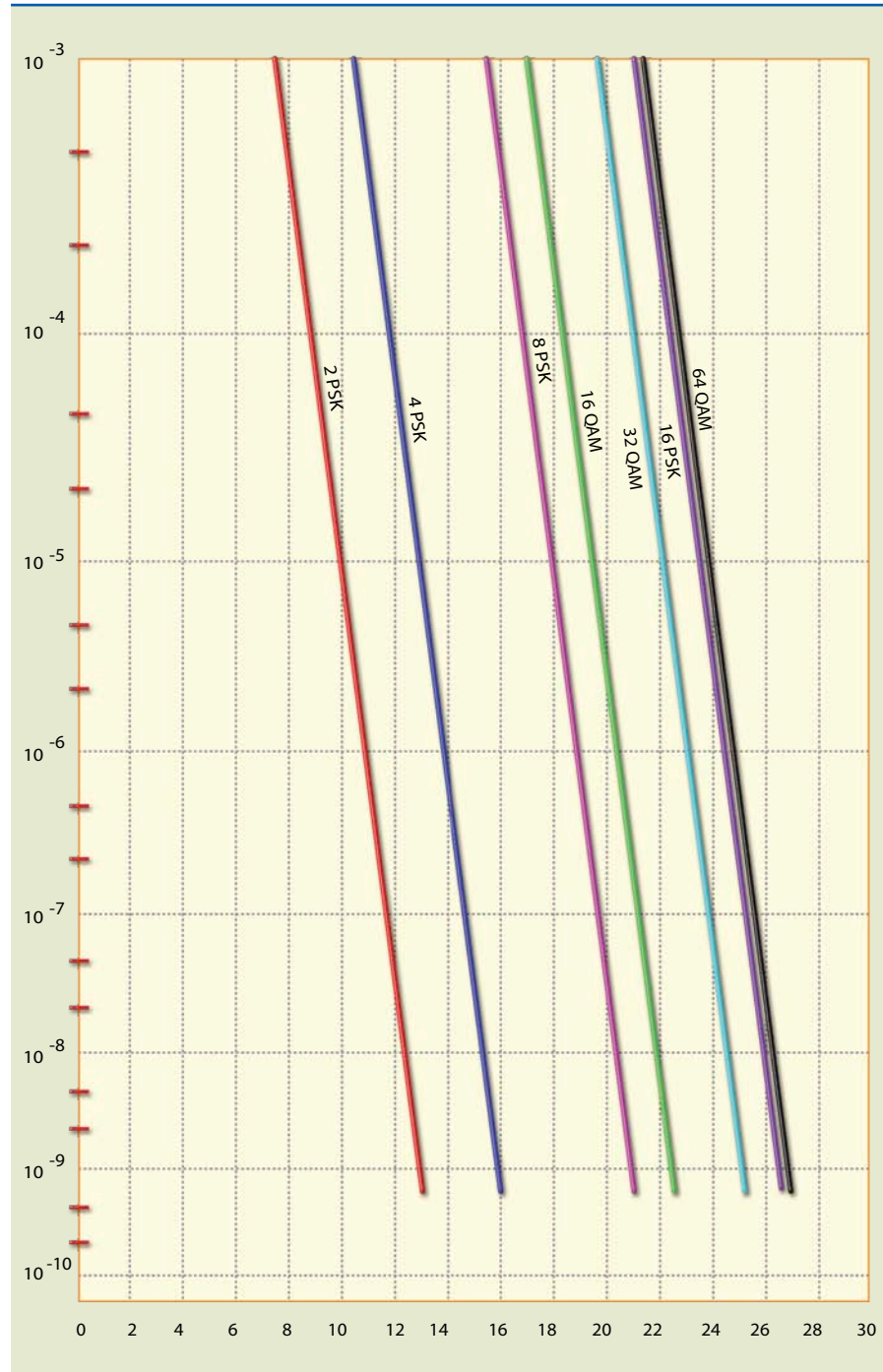


Figura 4.46
Desempenho de TEB
em função da relação
C/N para esquemas
típicos de modulação.



Capítulo 5

Radiopropagação



As ondas de rádio são formadas pela interação de um campo magnético e um campo elétrico, originando uma onda eletromagnética irradiada por uma antena. Essa onda é gerada por uma corrente de radiofrequência proveniente de um transmissor, em uma frequência de operação do sistema de comunicação.

A propagação das ondas de rádio pelo espaço livre, chamada radiopropagação, é a maneira como elas percorrem o caminho entre o transmissor e o receptor e se dá de tal modo que a direção de propagação do vetor campo elétrico é sempre perpendicular à do campo magnético.

Durante o percurso, as ondas de rádio podem sofrer reflexão, difração ou refração, dependendo de fatores como tipo de enlace, frequência de operação e distância percorrida. Os efeitos desses fenômenos resultam em perda de energia e de atenuação.

5.1 Espectro de frequências

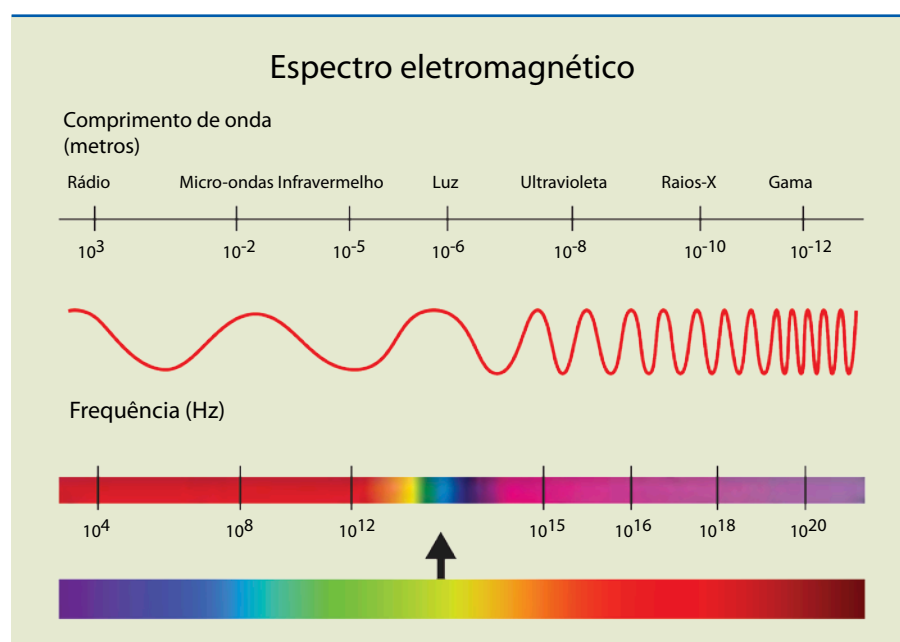
Cada sistema de comunicação opera dentro de uma faixa de frequências predefinida, a qual está incluída no espectro de frequências que engloba todas as faixas de irradiação eletromagnética, entre elas as faixas utilizadas em comunicações via rádio, as frequências de infravermelho, a faixa de luz visível, os raios ultravioleta, os raios X e a radiação gama. Essas divisões do espectro são apresentadas na figura 5.1.

A tabela 5.1 mostra a parte do espectro de frequências destinado às comunicações via rádio, dividida em faixas.

faixa de	até	serviço	observação
20 Hz	20 000 Hz	Sons audíveis	
20 kHz	30 kHz	Ultrassom	
530 kHz	1 600 kHz	Rádio AM	107 emissoras com 10 kHz de banda
34,48 MHz	34,82 MHz	Radiotáxi	
38 MHz	40,6 MHz	Telemedicação biomédica	
40,6 MHz	40,7 MHz	Telemedicação de características de materiais	
40,7 MHz	41,0 MHz	Telemedicação biomédica	
41,0 MHz	49,6 MHz	Diversos serviços	
49,6 MHz	49,9 MHz	Telefonia sem fio	
49,9 MHz	54 MHz	Diversos serviços	
54 MHz	60 MHz	Televisão VHF	Canal 2
60 MHz	66 MHz	Televisão VHF	Canal 3
66 MHz	70 MHz	Televisão VHF	Canal 4
70 MHz	72 MHz	Radioastronomia	
72 MHz	73 MHz	Telecomando	
73 MHz	75,4 MHz	Radionavegação para aeronáutica	
75,4 MHz	76 MHz	Telecomando	
76 MHz	82 MHz	Televisão VHF	Canal 5
82 MHz	88 MHz	Televisão VHF	Canal 6
88 MHz	108 MHz	Rádiodifusão rádio FM	99 canais em faixas de 200 kHz
88 MHz	108 MHz	Microfone sem fio de alcance restrito	
108 MHz	117,975 MHz	Radionavegação para aeronáutica	
117,975 MHz	121,5 MHz	Comunicação móvel para aeronáutica	

Tabela 5.1
Espectro de frequências e alguns dos serviços atribuídos

Figura 5.1
Espectro eletromagnético de frequências.



faixa de	até	serviço	observação
121,5 MHz	121,5 MHz	Comunicação de socorro	
121,5 MHz	136 MHz	Comunicação móvel para aeronáutica	
136 MHz	138 MHz	Satélites Meteorológicos Internacionais	
138 MHz	143,6 MHz	Comunicações fixas e móveis	
143,6 MHz	143,65 MHz	Pesquisas espaciais	
143,65 MHz	144 MHz	Radioamador	
144 MHz	146 MHz	Radioamador por satélite	
146 MHz	148 MHz	Radioamador	
148 MHz	149,17 MHz	Reservado ao Serviço Especial de Supervisão e Controle (Sesc)	
149,17 MHz	174 MHz	Diversos serviços	
174 MHz	180 MHz	Televisão VHF	Canal 7
180 MHz	186 MHz	Televisão VHF	Canal 8
186 MHz	192 MHz	Televisão VHF	Canal 9
192 MHz	198 MHz	Televisão VHF	Canal 10
198 MHz	204 MHz	Televisão VHF	Canal 11
204 MHz	210 MHz	Televisão VHF	Canal 12
210 MHz	216 MHz	Televisão VHF	Canal 13
216 MHz	470 MHz	Diversos Serviços	
470 MHz	476 MHz	Televisão UHF	Canal 14
476 MHz	482 MHz	Televisão UHF	Canal 15
482 MHz	806 MHz	Televisão UHF	Canais 16 a 69
806 MHz	824 MHz	Diversos serviços	
824 MHz	834,4 MHz	Telefonia celular banda "A"	
834,4 MHz	845 MHz	Telefonia celular banda "B"	

faixa de	até	serviço	observação
845 MHz	869 MHz	Diversos serviços	
869 MHz	880 MHz	Telefonia celular banda "A"	
880 MHz	880,6 MHz	Outros serviços	
880,6 MHz	890 MHz	Telefonia celular banda "B"	
890 MHz	891,5 MHz	Telefonia celular banda "A"	
891,5 MHz	894 MHz	Telefonia celular banda "B"	
894 MHz	896 MHz	Telefonia celular aeronáutico	
896 MHz	3 000 MHz	Outros serviços	
3 GHz	3,1 GHz	Radionavegação e radiolocalização	
3,7 GHz	4,2 GHz	Descida de sinal de satélite banda "C"	
5,925 GHz	6,425 GHz	Subida de sinal de satélite banda "C"	
6,425 GHz	7,125 GHz	Sistema digital	
10,7 GHz	11,7 GHz	Rádio digital	
10,7 GHz	12,2 GHz	Descida de sinal de satélite banda "Ku"	
13,75 GHz	14,8 GHz	Subida de sinal de satélite banda "Ku"	
14,5 GHz	15,35 GHz	Rádio digital	

As faixas de frequências em que se concentram os principais serviços de telecomunicações são:

a) **VHF** (*very high frequency* ou **frequência muito alta**) – Faixa entre 30 MHz e 300 MHz, na qual estão os serviços de radiodifusão comercial FM e os canais 2 a 13 de TV.

b) **UHF** (*ultra high frequency* ou **frequência ultra-alta**) – Faixa entre 300 MHz e 3 GHz, com destaque para os canais de TV transmitidos por UHF e de telefonia celular.

c) **SHF** (*super high frequency* ou **frequência superalta**) – Faixa entre 3 GHz e 30 GHz, destinada às transmissões via satélite nas bandas “C” (TV aberta, telefonia e dados) e “Ku” (TV por assinatura), além de frequências para rádio digital.



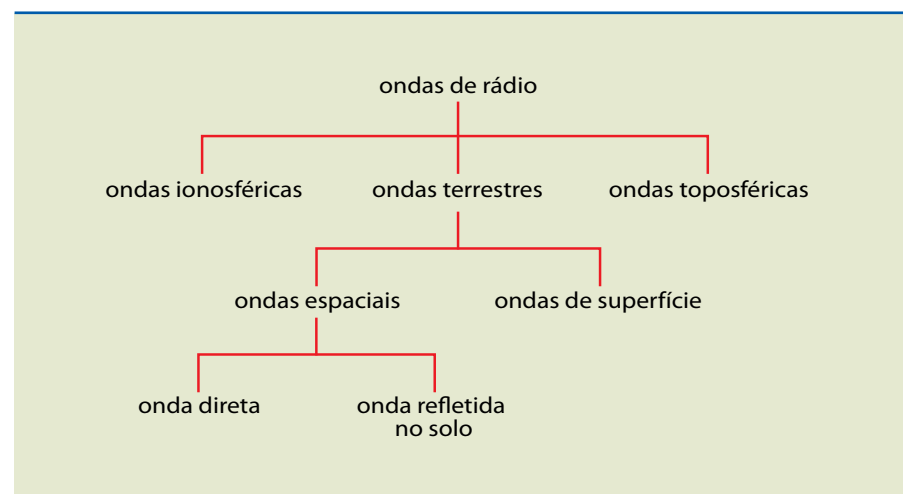
5.2 Modos de propagação

As ondas de rádio podem se propagar no espaço de diferentes modos, dependendo de sua faixa de frequências de operação (figura 5.2). Basicamente, há três modos:

- Propagação por onda terrestre** – As ondas de rádio se propagam próximo à superfície da Terra, possibilitando comunicações além do horizonte, para transmissões nas faixas de LF e MF.
- Propagação por onda celeste** – Conhecida também como propagação ionosférica. As ondas de rádio sofrem refrações na ionosfera e retornam à Terra, favorecendo as comunicações a longa distância. As transmissões em HF (ondas curtas) propagam-se desse modo.
- Propagação por visibilidade** – As antenas transmissora e receptora estão visíveis entre si, com alta diretividade, ou seja, o feixe se propaga praticamente em linha reta. Os obstáculos entre as antenas de transmissão e recepção podem interromper a comunicação. As transmissões de rádio nas faixas de VHF e UHF (FM, TV VHF e TV UHF) propagam-se por visibilidade (ou linha de visada).

Figura 5.2

Modos de propagação das ondas.



5.3 Características da atmosfera e superfície terrestres

Para ampliar o entendimento da radiopropagação, é necessário conhecer a composição das camadas da atmosfera terrestre e os fatores que a afetam, além das características de relevo e condutividade da região na qual se deseja implantar um enlace.

A atmosfera terrestre é dividida em cinco camadas, de acordo com a altitude, densidade, concentração de gases e ionização: troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera e exosfera. Aqui nos interessa as quatro primeiras (figura 5.3).

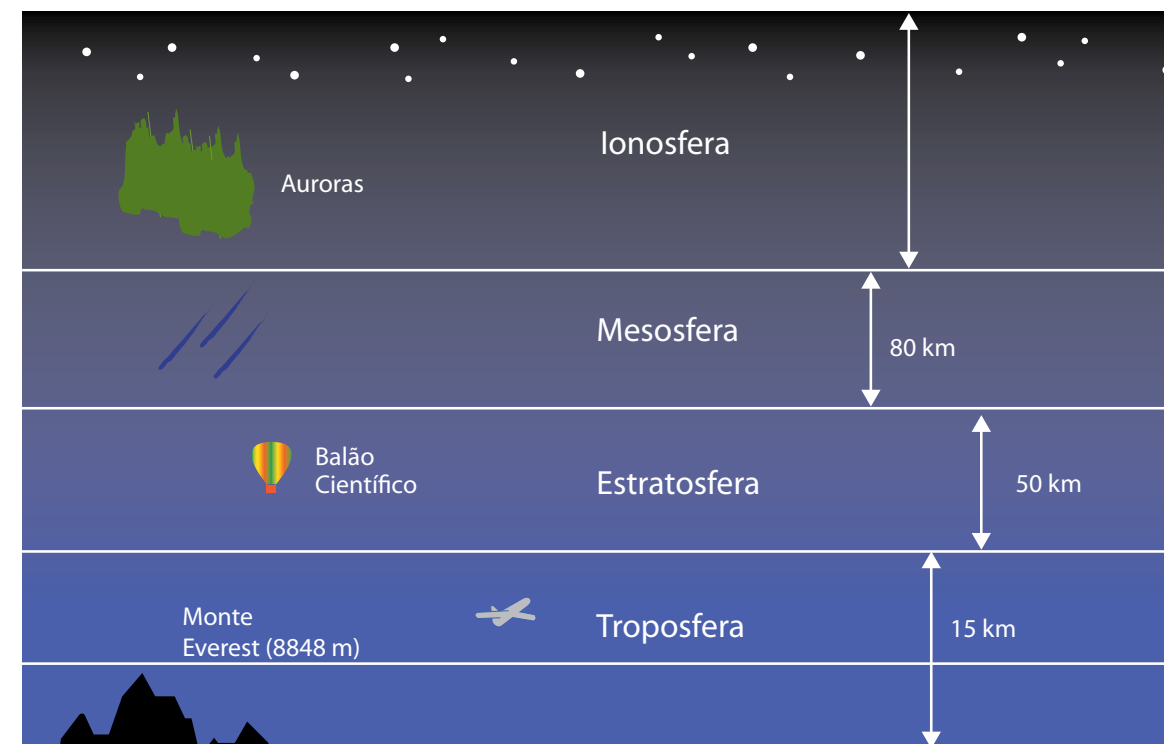


Figura 5.3

Quatro camadas da atmosfera terrestre.

A **troposfera** é a camada mais baixa, estendendo-se do solo até cerca de 15 km de altitude. Com alta concentração de gases, nela ocorrem praticamente todos os fenômenos climáticos (chuva, neve etc.) do planeta. Por causa desses fenômenos, a propagação de ondas se dá por meio de atenuações. Na troposfera observam-se turbulências decorrentes do aquecimento desigual da superfície, o que influencia a eficiência em sistemas de comunicação que utilizam essa camada. Um bom exemplo são as inversões térmicas, que criam dutos troposféricos, prejudicando a propagação a longas distâncias.

A **estratosfera** é uma região isotérmica, ou seja, apresenta temperatura praticamente constante; portanto, não está sujeita a inversões térmicas e, por consequência, não há refrações significativas. Na propagação das ondas de rádio, é considerada uma camada inerte.

A **ionosfera** é uma região de constituição não homogênea e de grande ionização, devido à baixa concentração de gases e da intensa radiação. O grau de ionização varia no decorrer do dia, sendo menos intenso no período noturno, por causa da ausência de radiação solar, o que permite maior recombinação de partículas. A ionosfera é dividida em três camadas – D, E e F –, de acordo com a altitude em relação à superfície terrestre.

A **camada D** ocupa uma faixa entre 50 e 90 km de altitude em relação à superfície terrestre e apresenta fraca densidade de ionização. Ela se forma durante algumas horas do dia e inexistente à noite, pois depende da posição do Sol. A refração das ondas acontece apenas nas faixas de VLF e HF.



A **camada E** está situada entre 100 km e 140 km de altitude, com maior ionização, porém de volume irregular. Chamada de esporádica E, pode se formar a qualquer instante, com duração e dimensão imprevisíveis. Aparece também no período noturno, alterando o percurso das ondas transmitidas, que seriam refratadas a uma altura inferior. Nessa camada são feitas comunicações em HF a longas distâncias (até 2 000 km) durante o dia e em MF durante a noite, atingindo no máximo 200 km.

A **camada F** é dividida em duas subcamadas: F1, de 180 km a 240 km, que existe somente durante o dia, e F2, de 240 km a 400 km, que é a principal camada para reflexões a longa distância.

A ionosfera apresenta variações de comportamento a intervalos de tempo determinados:

- **Variações ao longo do dia** – Ocorrem porque a ionização varia de acordo com a posição do Sol, aumentando progressivamente pela manhã até alcançar grau máximo no início da tarde e diminuir substancialmente à noite, devido à ausência de atividade solar.
- **Variações sazonais** – Provocam alterações nas frequências máximas de operação, em função das estações do ano. Essa é uma das razões pelas quais ocorre o câmbio de frequências pelas emissoras de ondas curtas pelo menos duas vezes por ano, próximo aos equinócios da primavera e do outono.
- **Variações causadas pelo ciclo solar** – A atividade solar obedece a um ciclo que se renova cada 11 anos, aproximadamente, chamado ciclo solar. Esse ciclo pode ser observado pela atividade solar, mais precisamente pela atividade das manchas solares (regiões de temperaturas relativamente baixas localizadas na superfície do Sol). Quando o número de manchas solares é elevado, a ionosfera apresenta maior densidade de elétrons; conseqüentemente, a propagação melhora para as frequências mais altas.
- **Variações em função da latitude** – Um exemplo é a região dos polos terrestres, que têm baixa ionização por causa da pouca incidência de radiação solar.

5.4 A superfície terrestre

Sabemos que a Terra tem formato próximo ao de uma esfera, com ligeiro achatamento nos polos, e que três quartos de sua superfície são ocupados por água e um quarto por terra. Tanto o solo como a água são capazes de conduzir as ondas de rádio.

Cada tipo de solo, o mar, os rios e os lagos possuem diferentes características de condutividade das ondas. Enquanto as florestas absorvem as ondas de maneira considerável, a água do mar, devido à salinidade, favorece a radiopropagação de superfície.

A tabela 5.2 apresenta alguns valores típicos de condutividade, cuja unidade de medida é o siemens (S), de acordo com o tipo de superfície.

Tipo de superfície	Condutividade, em mS/m
Água salgada	5 000
Água doce	1
Solo úmido	20
Solo médio	10
Solo seco ou arenoso	1

Tabela 5.2
Condutividade da superfície terrestre.

O tipo de solo e sua condutividade são fatores fundamentais em propagação por onda terrestre. Quanto menor a frequência, maior será a profundidade de penetração da onda no solo e, quanto mais condutivo o solo, maior alcance terá a comunicação.

5.5 Tipos de ondas transmitidas

Basicamente, há dois tipos de ondas eletromagnéticas transmitidas: onda terrestre e onda celeste (figura 5.4).

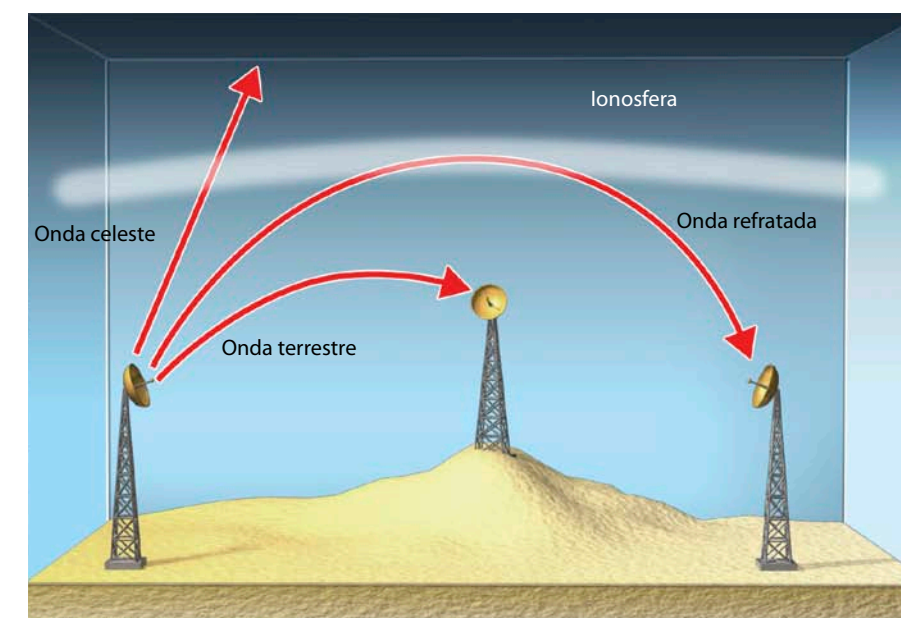


Figura 5.4
Tipos de transmissão de ondas de rádio.

5.5.1 Onda terrestre

A onda terrestre ou superficial é uma onda cujo modo de propagação depende das características de condutividade do solo e do relevo de uma região. Dependendo da condutividade dos meios que encontra em seu percurso, uma



porção da energia da onda superficial é absorvida pelo solo. O grau de absorção varia de maneira inversamente proporcional à condutividade da superfície: quanto maior a condutividade, menor a absorção e maior o ângulo de inclinação (o ângulo entre a superfície e o plano de transmissão), resultando em maior alcance da onda superficial. Por exemplo, transmissões sobre água salgada têm alcance consideravelmente maior que transmissões sobre o solo.

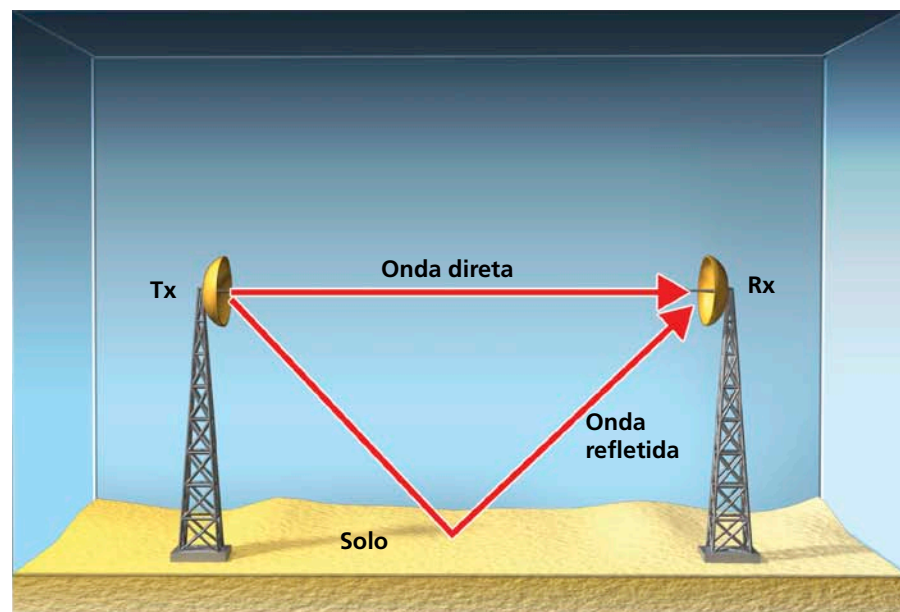
A propagação por onda terrestre pode apresentar dois tipos de ondas: onda direta e onda refletida (figura 5.5).

A onda direta se propaga quase em linha reta entre o transmissor e o receptor. Na verdade, é ligeiramente inclinada em direção à superfície, devido à refração na troposfera, com distância de transmissão indo além do horizonte visual. É também chamada de **onda troposférica**.

A onda refletida é a porção da onda terrestre que se reflete na superfície. A intensidade com que ela é refletida depende do coeficiente de reflexão da superfície contra a qual se choca e do ângulo de incidência. Embora esse ângulo e o ângulo de reflexão sejam iguais, há defasagem de 180° na fase das ondas incidente e refletida. Esse tipo de onda é considerado indesejável em certos casos, podendo provocar o cancelamento completo da onda na antena receptora, caso esta receba simultaneamente as ondas direta e refletida com a mesma amplitude. Contudo, em geral o cancelamento é parcial, pois, além de a defasagem não ser exatamente de 180° , pelo fato de a onda refletida demorar mais tempo para chegar à antena receptora, a onda refletida pode apresentar menor intensidade causada pela absorção parcial da onda irradiada.

Figura 5.5

Propagação por ondas direta e refletida.



5.5.2 Onda celeste

A onda celeste se propaga na atmosfera por meio de refrações na ionosfera, retornando à superfície terrestre. Ao retornar, ela pode ser refletida na ionosfera, repetindo o processo e possibilitando transmissões a longas distâncias.

A ionosfera influi de maneira decisiva na propagação por onda celeste, pois pode agir como condutor, absorvendo parte da energia da onda transmitida, ou como espelho rádio, refratando a onda celeste na superfície. A capacidade da ionosfera de retornar uma onda de rádio depende de fatores como densidade de íons, ângulo de irradiação e frequência de transmissão. Em algumas situações, a onda nem mesmo é refratada, atravessando a ionosfera.

A distância entre a antena transmissora e o ponto de retorno à superfície depende do ângulo de irradiação, que é limitado pela frequência (quanto maior a frequência, mais difícil é a refração), apesar de resultar em maior alcance. Cada camada da ionosfera pode refratar ondas de rádio até uma frequência máxima, a MUF (*maximum usable frequency* – máxima frequência útil).

Dessa análise, pode-se concluir que existe uma frequência ótima, a OWF (*optimum work frequency* – frequência ótima de trabalho), que representa certo percentual da MUF. Além do estado da ionosfera, fatores como comprimento do circuito, ciclo solar e sazonalidade são usados para estabelecer a MUF para cada hora e camada da ionosfera ou para fazer uma previsão de seu valor com base em observações efetuadas ao longo do tempo.

O ângulo de irradiação é outro fator importante. Acima de determinada frequência, as ondas transmitidas não são refratadas, pois seguem pelo espaço. Contudo, se o ângulo de irradiação for reduzido, parte das ondas de alta frequência retorna à superfície. O ângulo limite a partir do qual não ocorre reflexão da onda na ionosfera é chamado de ângulo crítico para determinada frequência.

Vamos analisar a seguinte situação: uma onda incidindo sobre uma superfície que separa dois meios, os quais têm, portanto, índices de refração diferentes, n_1 e n_2 (figura 5.6).

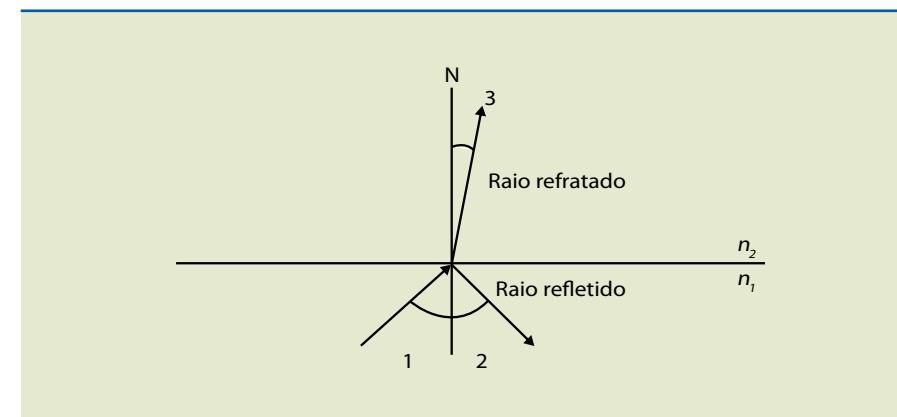


Figura 5.6

Onda incidindo sobre uma superfície que separa dois meios.



Na refração, temos:

$$n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (5.1)$$

em que:

$$n = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no meio}}$$

Na reflexão, temos:

$$\theta_1 = \theta_2$$

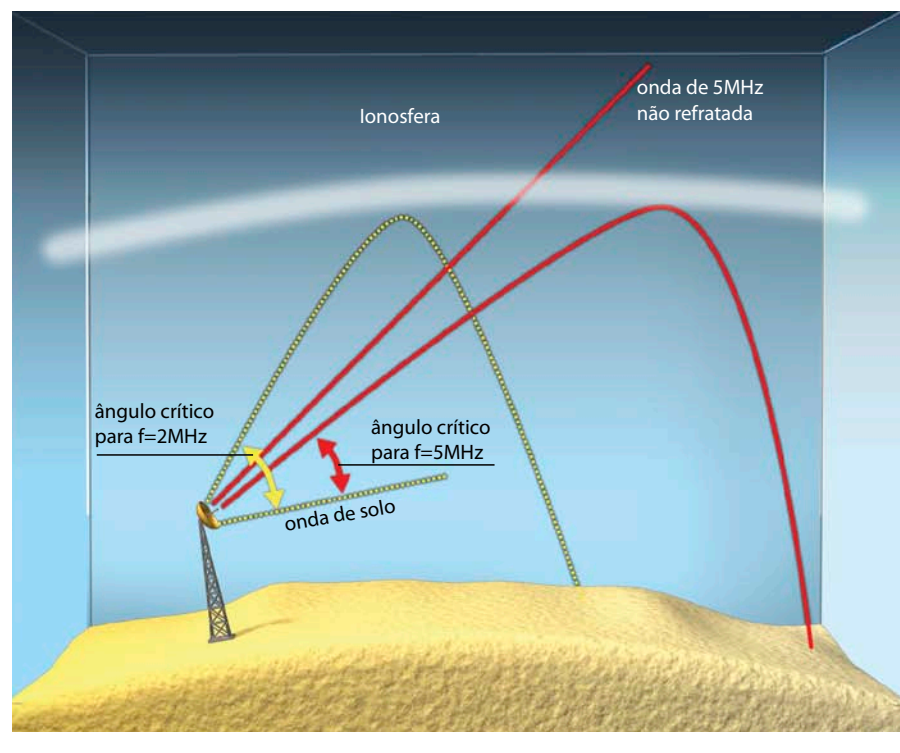
O ângulo de irradiação é determinado em função da frequência utilizada e da distância entre transmissor e receptor, de maneira aproximada (figura 5.7).

O caminho percorrido pela onda de rádio desde o transmissor até o retorno à superfície é denominado **salto**. Dependendo da distância até o receptor, a onda pode efetuar mais de um salto (a onda reflete na Terra e volta à ionosfera, onde é refratada, e assim por diante). Durante o percurso, ocorrem dois fenômenos:

- **Distância de salto** – Distância entre o transmissor e o retorno à superfície, ou distância entre os saltos efetuados.
- **Zona de silêncio** – Região na superfície terrestre que se estende desde o limite do alcance da onda superficial até o ponto de retorno. Nenhuma onda transmitida é recebida nessa zona.

Figura 5.7

Antena emitindo sinais com diferentes ângulos de irradiação.



As camadas que formam a ionosfera sofrem consideráveis variações em altitude, densidade e espessura, devido à variação na atividade solar. Durante os períodos de máxima atividade solar, a camada F é mais densa e se forma nas altitudes maiores, influenciando decisivamente a distância de salto e o alcance das ondas de rádio transmitidas. À noite, com a ausência de atividade solar, os sinais que seriam normalmente refratados pelas camadas D e E são refratados pela camada F, resultando em maior distância de salto.

O sinal transmitido não chega ao receptor com a mesma potência. A propagação das ondas de rádio impõe perdas ao sinal, existindo diversas causas para a degradação do sinal. As principais serão tratadas na próxima seção.

5.5.3 Fatores de degradação de sinais em radiopropagação

Desvanecimento refere-se a flutuações ou variações na intensidade de um sinal durante sua recepção. Esse fenômeno pode acontecer em todos os modos de propagação via rádio. Na propagação por onda terrestre, as duas frentes de onda – a direta e a oriunda de multipercurso – chegam defasadas ao receptor, causando, por vezes, o cancelamento do sinal. Em áreas onde prevalece a propagação por onda celeste, o desvanecimento pode decorrer de duas frentes de onda celeste que tenham percorrido percursos diferentes, chegando, portanto, defasadas ao receptor.

As variações na absorção e no comprimento do caminho da onda na ionosfera também podem provocar desvanecimento. Uma variação repentina na ionosfera causa a completa absorção de toda a irradiação da onda celeste. O desvanecimento se manifesta, ainda, quando o receptor se localiza perto da fronteira da zona de silêncio ou quando a frequência de operação está próxima ao valor da MUF. Nesses casos, pode ocorrer queda da intensidade do sinal recebido a níveis praticamente nulos.

Para tentar amenizar os efeitos do desvanecimento, aplica-se a técnica de diversidade, que consiste em utilizar mais de um receptor em regiões com desvanecimento profundo, combinando-os ou selecionando-os mutuamente para obter a melhor recepção possível. Esses receptores devem ter pouca correlação entre si em termos de qualidade de recepção, ou seja, não podem sofrer deterioração de qualidade ao mesmo tempo. Para implementar a técnica de diversidade, muitos são os recursos possíveis:

- Diversidade de espaço** – Recepção por diferentes antenas (em diferentes posições).
- Diversidade de frequência** – Diferentes frequências de RF, sempre com as mesmas informações de banda básica.

Diversas fontes de **ruído** afetam a recepção da onda de rádio. Elas podem ser naturais, quando o ruído é originado na natureza, ou artificiais, quando o ruído é gerado pelo ser humano.

No primeiro caso enquadram-se o ruído atmosférico, geralmente a maior causa de ruído na faixa de alta frequência, sendo maior nas regiões equatoriais, dimi-



nuindo com a latitude crescente, e o ruído cósmico, oriundo do espaço sideral, afetando mais as altas frequências.

Entre os ruídos provocados pelo ser humano encontram-se a ignição de motores de combustão, linhas de transmissão, lâmpadas fluorescentes, máquinas em geral e cabos elétricos. Como os ruídos artificiais atuam, em geral, verticalmente polarizados, a utilização de uma antena polarizada horizontalmente auxiliará na redução dos efeitos do ruído.

A camada D da ionosfera atenua as ondas que a atravessam. A capacidade de atenuação varia de acordo com o ciclo solar, sazonalmente e ao longo do dia, sendo maior no verão e ao meio-dia, conforme o grau de ionização da camada D.

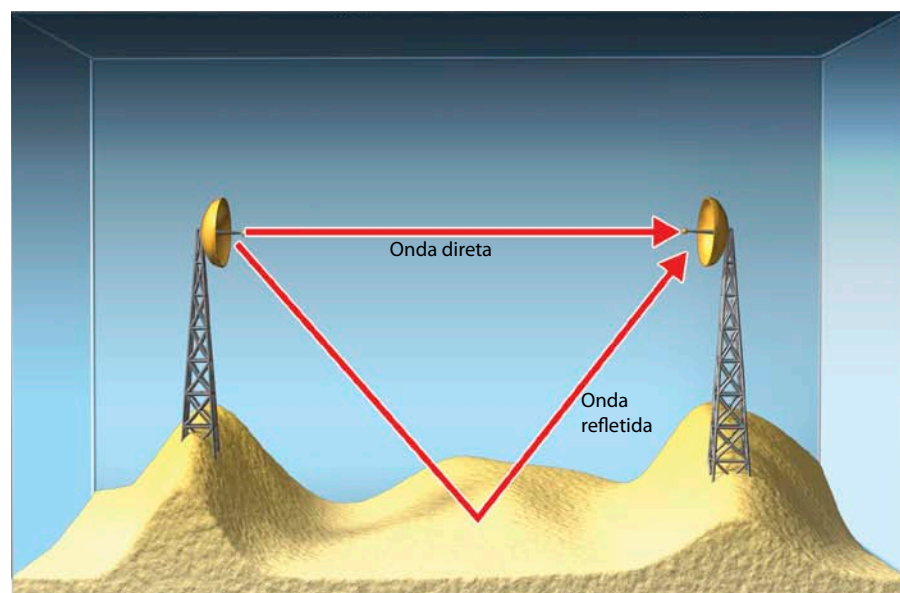
As **condições climáticas** influenciam a propagação, determinando principalmente as distâncias dos percursos e atenuações. A chuva, por exemplo, provoca atenuação por absorção de energia, atuando como um dielétrico que dissipa a potência absorvida na forma de aquecimento ou espalhamento. Seu efeito é mais significativo para as frequências acima da faixa de VHF. O nevoeiro causa efeito parecido, sendo mais crítico em altas frequências, acima de 2 GHz.

5.6 Enlace em visibilidade

Um importante conceito de propagação é o de visibilidade. Para frequências acima de 300 MHz, o feixe de ondas passa a se propagar quase em linha reta. Essa situação requer que o posicionamento entre as antenas de transmissão e recepção seja frontal, ou seja, uma antena apontando diretamente para a outra. É o caso típico de propagação por onda terrestre, com o feixe direto e o refletido no solo ou por obstáculos no percurso (figura 5.8).

Figura 5.8

Visada direta entre duas antenas.



No projeto de enlaces em visibilidade, devemos levar em consideração dois efeitos que podem interferir em uma onda eletromagnética: difração e refração.

A **difração** permite que parte das ondas atinja antenas receptoras fora da linha de visada, quando o enlace é obstruído por obstáculos. O projeto é feito de tal maneira que permita a utilização de um obstáculo a fim de provocar desvio na direção de propagação da onda de rádio (figura 5.9).

A presença de obstáculos próximos à linha de visada entre as antenas acarreta diminuição da energia recebida, fazendo com que parte da onda seja bloqueada e parte contorne o obstáculo.

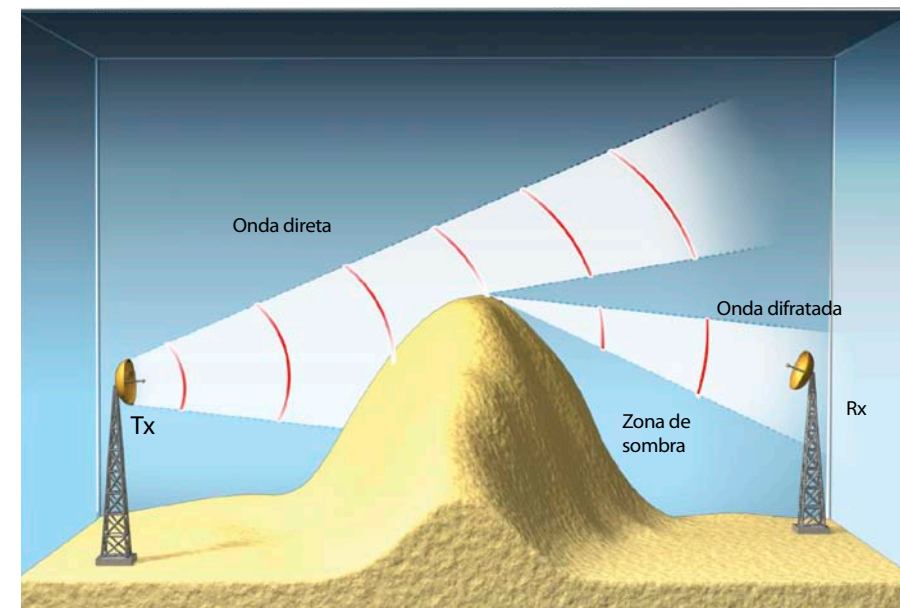


Figura 5.9

Difração de ondas de rádio com obstáculo.

A Terra pode se tornar um obstáculo a ser contornado, devido a sua curvatura. Esse fator deve ser levado em consideração principalmente nos enlaces por propagação de onda terrestre, de frequência bem mais baixa que a de micro-ondas. O efeito de difração causado pela curvatura da Terra é menos acentuado para altas frequências, sendo utilizado para enlaces de micro-ondas com visibilidade além do horizonte.

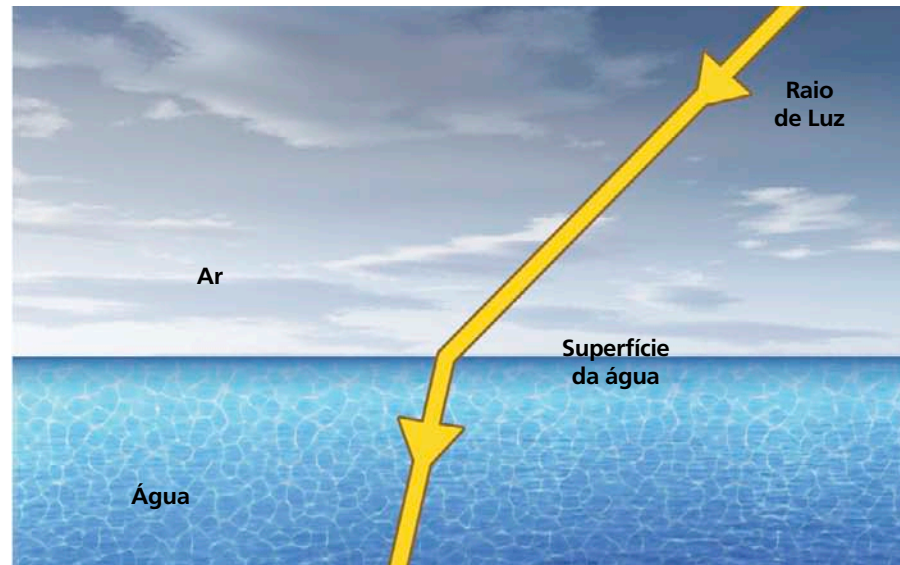
A **refração** é uma variação da direção de propagação de um feixe quando este atravessa a superfície de separação entre dois meios e tem sua velocidade de propagação alterada. É o caso, por exemplo, de um feixe de luz incidindo sobre a água. A relação entre a velocidade de propagação da onda em determinado meio e a velocidade de propagação no vácuo determina seu índice de refração (figura 5.10).

Em enlaces de micro-ondas, a trajetória da onda sofre encurvamento em relação ao solo. Esse encurvamento é causado pela passagem por diferentes camadas da atmosfera com índices de refração e densidade diferentes (figura 5.11).

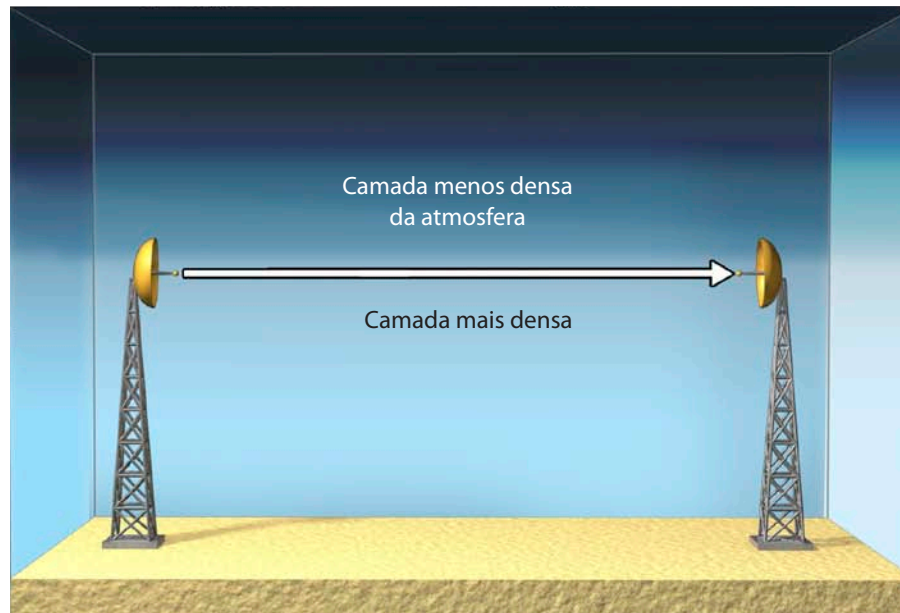


Figura 5.10

Refração da luz na água.

**Figura 5.11**

Encurvamento do feixe.

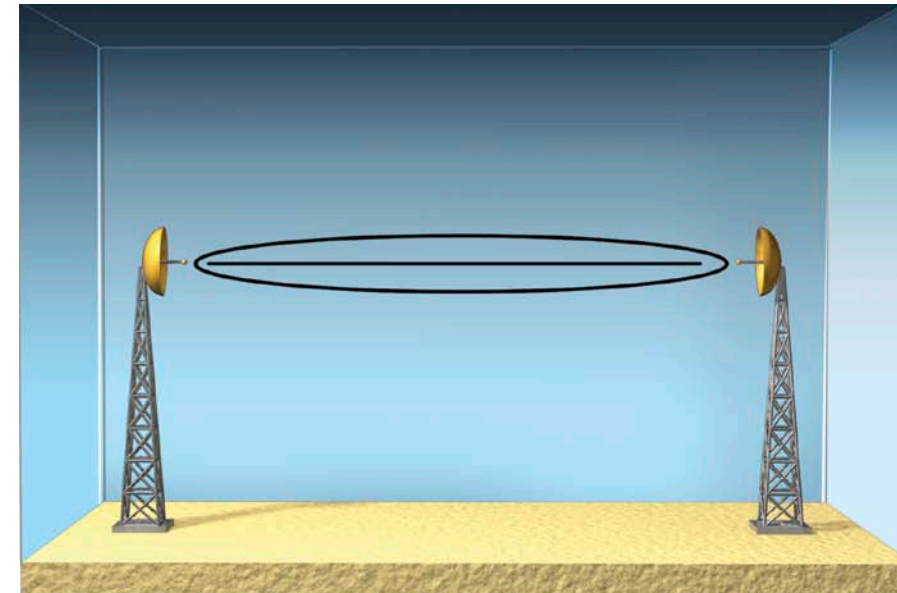


5.6.1 Zonas de Fresnel

A energia irradiada pela antena transmissora que se propaga pelo espaço livre é formada por um conjunto de ondas eletromagnéticas. Desse total de energia, apenas uma parcela chega à antena receptora. A perda durante o trajeto se deve ao fato de a energia ser irradiada dentro de um feixe que, por mais estreito que seja, não direciona toda a energia para a antena receptora, existindo irradiação em outras direções. Apesar de seguirem percursos diferentes, depois de sofrerem múltiplas refrações na atmosfera, vários sinais que partiram da antena transmissora também chegam à antena receptora. Assim, podemos considerar que esse conjunto de ondas forma uma elipse ligando as antenas de transmissão e de recepção, chamada **elipse de Fresnel** (figura 5.12).

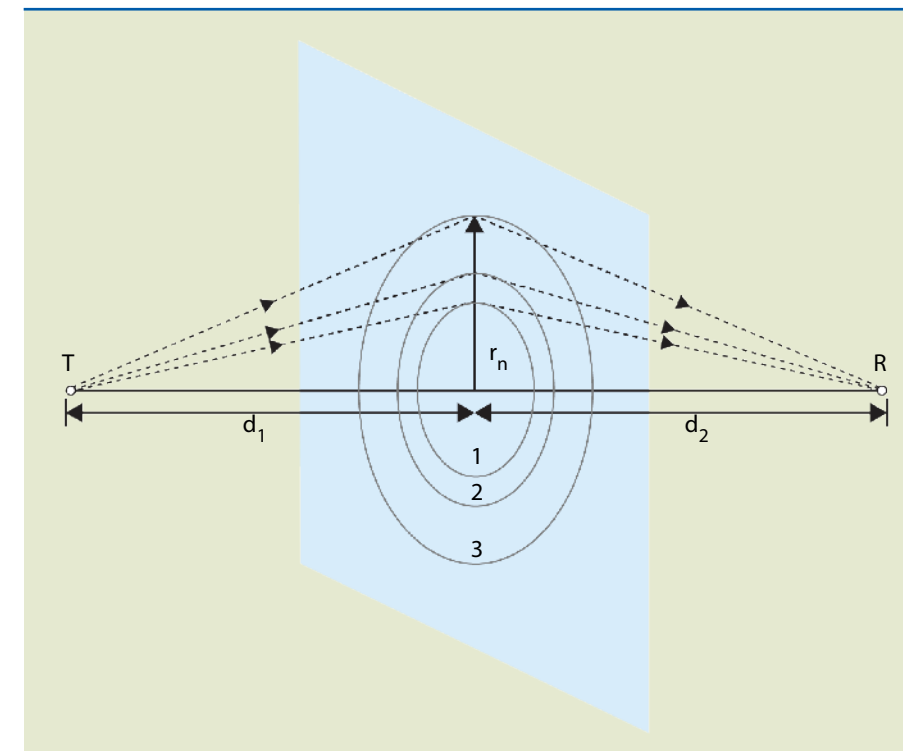
Figura 5.12

Elipse de Fresnel.



Essa elipse deve ser vista tridimensionalmente. Ela é formada por áreas de luz e sombra, na forma de anéis, denominadas **zonas de Fresnel**. Utilizando esses conceitos, podemos verificar a viabilidade de um enlace de comunicação entre dois pontos, com possíveis obstáculos capazes de causar degradação ou perda do sinal.

A figura 5.13 mostra o percurso entre as antenas transmissora e receptora com obstáculo.

**Figura 5.13**

Percurso entre as antenas de transmissão e recepção com obstáculo.



Os raios r_1 a r_n das zonas de Fresnel podem ser calculados pela expressão:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (5.2)$$

em que:

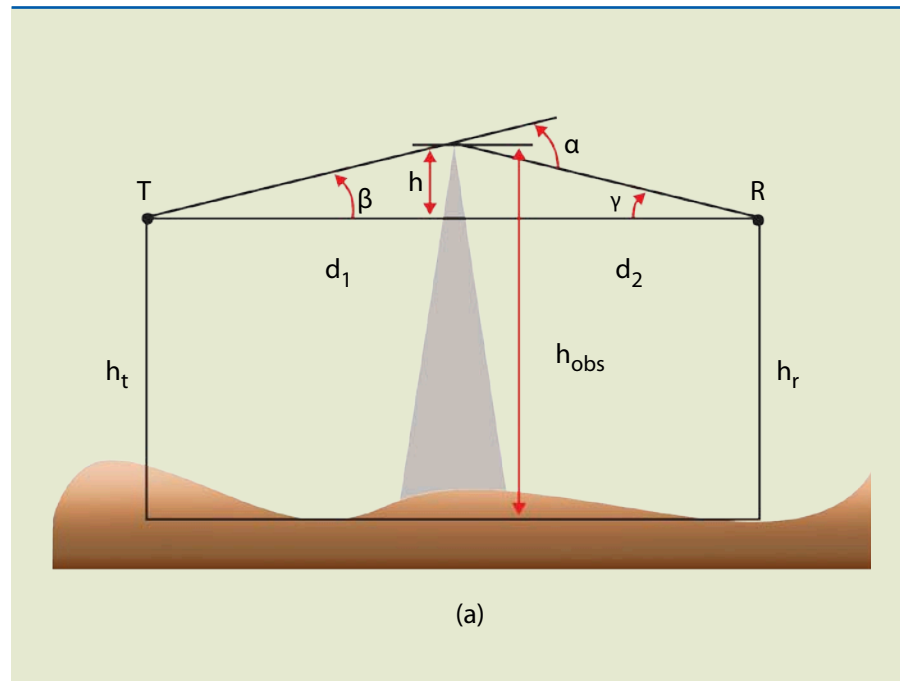
- n é um inteiro positivo (1, 2, 3 etc.);
- d_1 é a distância da antena transmissora ao obstáculo;
- d_2 , a distância do obstáculo à antena receptora.

A expressão é válida para d_1 e d_2 maiores que r_n .

A figura 5.14 apresenta um exemplo de *link* de rádio enlace em visibilidade com obstáculo, de altura h .

Figura 5.14

Rádio enlace em visibilidade com obstáculo.



Condições de projeto: $h_{obs} \ll d_1$ e d_2 e $h_{obs} \gg \lambda$,

Condição inicial de viabilidade do enlace: $h \leq 0,6 \cdot r$.

O excesso de percurso, que é a diferença entre a distância em visada direta e o caminho percorrido pela onda refratada devido ao obstáculo, é definido por:

$$E_p = \frac{h^2}{2} \cdot \frac{(d_1 \cdot d_2)}{d_1 + d_2} \quad (5.3)$$

Pelo cálculo de E_p , é possível encontrar o número de zonas obstruídas:

$$n = \frac{2 \cdot E_p}{\lambda} \quad (5.4)$$

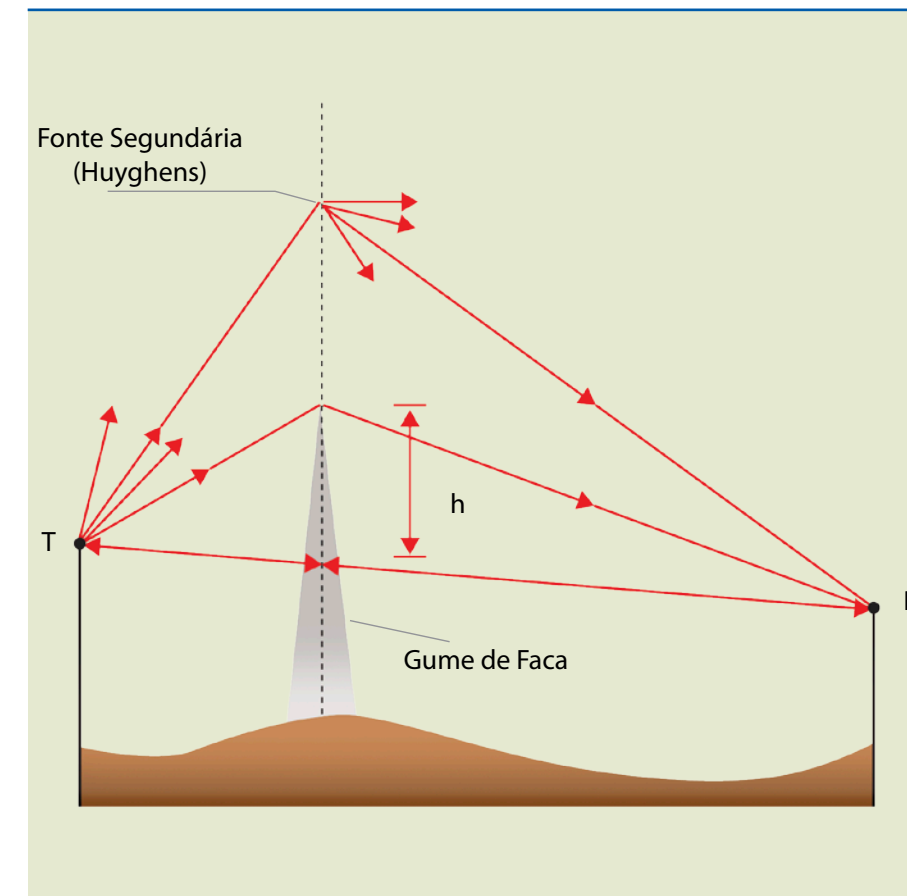
Existe um modelo, denominado **gume de faca**, que é utilizado para determinar a atenuação provocada por difração em obstáculos naturais, como montanhas. A figura 5.15 mostra um exemplo de aplicação desse modelo.

A curva ganho de difração, em função do parâmetro de Fresnel (v), é dada na figura 5.16, com base na relação:

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda (d_1 + d_2)}} \quad (5.5)$$

Figura 5.15

Aplicação do modelo gume de faca.

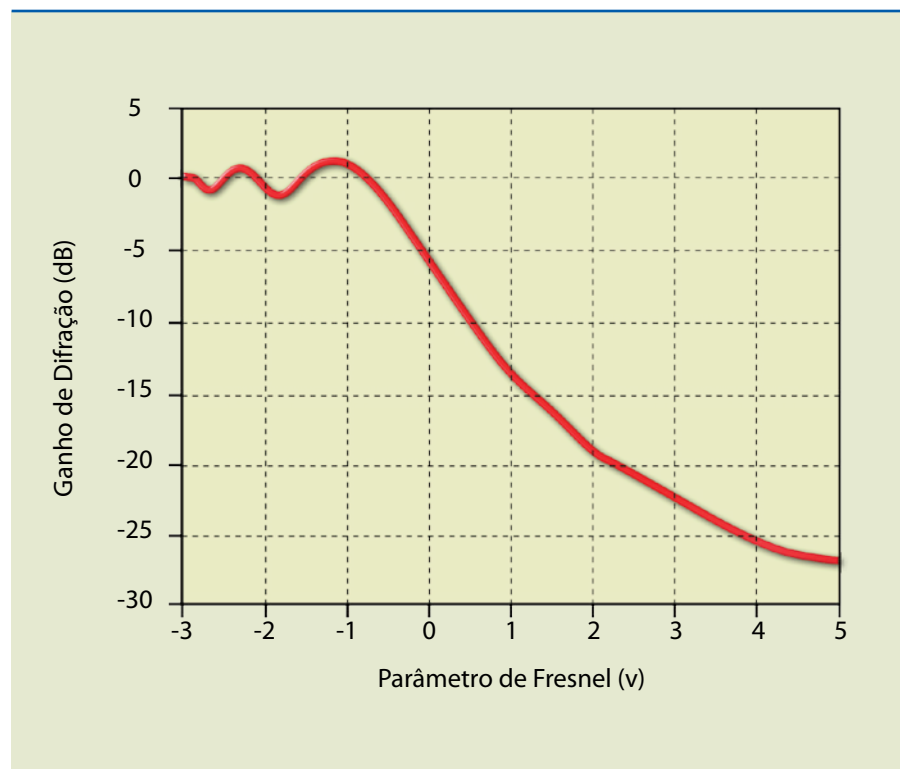


A expressão que origina o gráfico é:

$$-F(v) = (12,953 + 20 \cdot \log v) \text{ dB} \quad (5.6)$$



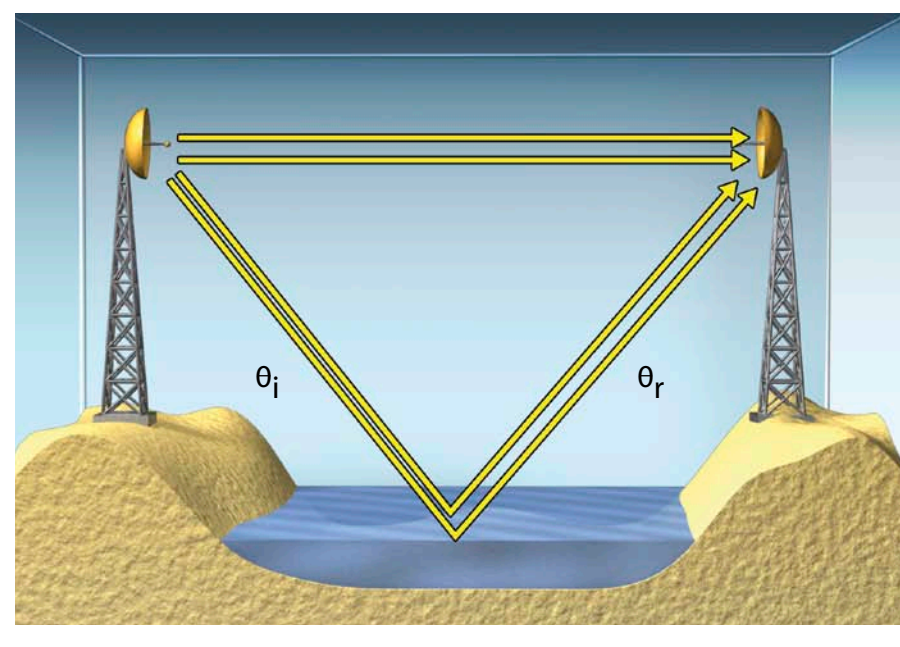
Figura 5.16
Gráfico do ganho de difração.



5.6.2 Reflexão do feixe de micro-ondas

Regiões de planície ou com lagos e mares podem refletir o feixe de micro-ondas, atuando como espelho (figura 5.17); a intensidade da onda refletida depende do ângulo de incidência sobre o espelho e de quão plana é a superfície ($\theta_i = \theta_r$).

Figura 5.17
Reflexão em lago.



Em solos irregulares também pode ocorrer reflexão, por difusão, em várias direções (figura 5.18).

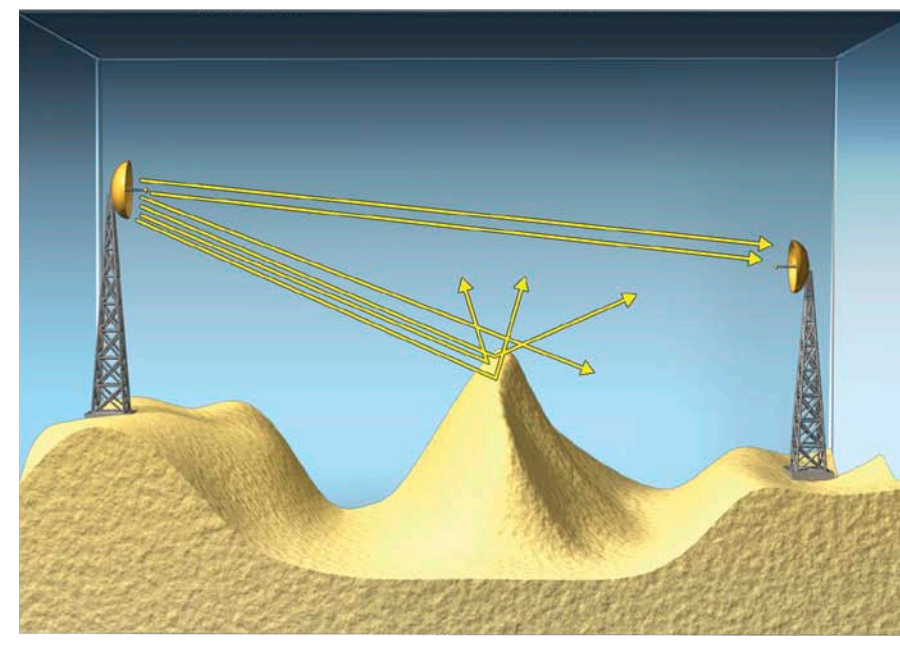


Figura 5.18
Reflexão em solos irregulares.

A relação entre a amplitude das ondas refletidas e a das ondas incidentes é avaliada por meio de um parâmetro chamado **coeficiente de reflexão** (tabela 5.3). O valor depende do tipo de terreno e varia desde 0 (efeito nulo da reflexão) até 1 (condição de reflexão total).

Condição	Coeficiente de reflexão
Mar calmo	~1
Terreno levemente irregular	0,8 a 1
Terreno levemente irregular com vegetação rasteira	0,3 a 0,5
Terreno irregular	0,1 a 0,4
Terreno irregular com árvores	0,05 a 0,2

Tabela 5.3
Coeficientes de reflexão.

Quando uma onda é refletida em um meio, ocorre uma inversão de fase em relação à onda incidente, pelo fato de o campo elétrico horizontal e o campo magnético vertical se anularem na superfície refletora; é necessário, então, que os campos refletidos tenham fase inversa aos incidentes (figura 5.19).

