

2 Fundamentos de Propagação

2.1. Propagação em Espaço Livre

As ondas de rádio em propagação são afetadas pela presença da terra e da atmosfera. Para enlaces de microondas ponto a ponto a camada da atmosfera relevante é a troposfera, que se situa entre a superfície da terra e uma altitude de aproximadamente 20 km.

Para o planejamento do enlace rádio, é útil definir uma perda de transmissão de referência correspondente ao caso em que a propagação da onda é considerada como não afetada pela presença da terra ou da atmosfera. Esta perda é denominada de perda em espaço livre sendo dada por ¹

$$FSL = 92,4 + 20 \log d(\text{Km}) + 20 \log f (\text{GHz}) \text{ dB} \quad (1)$$

onde d é a distância entre transmissor e receptor e f a frequência de operação.

Quando são utilizadas antenas não isotrópicas, deve-se levar em conta o ganho das antenas, e a perda de espaço livre torna-se:

$$FSL_G = 92,4 + 20 \log d(\text{Km}) + 20 \log f (\text{GHz}) + Gr (\text{dBi}) + Gt (\text{dBi}) \quad (2)$$

onde Gr e Gt são, respectivamente, o ganho da antena receptora e o ganho da antena transmissora em dBi.

Em condições normais de propagação, para antenas suficientemente elevadas em relação à superfície da terra, a única atenuação que o sinal sofre no caminho entre o transmissor e o receptor é a perda no espaço livre. Neste caso, o nível do sinal recebido é chamado de nível nominal de recepção.

2.2. Balanço de Potência

A fim de determinar o desempenho do enlace é necessário obter a percentagem de tempo, em relação ao período total de observação, durante o qual o sinal recebido ficará abaixo do limiar de recepção do rádio. Para isto é necessário determinar a diferença entre o nível nominal de recepção e o nível limiar de recepção. Essa diferença é chamada de margem de desvanecimento.

É imperativo ser capaz de prever o nível de recepção esperado em um enlace rádio por duas razões principais: garantir uma margem de desvanecimento adequada durante a fase de projeto e possibilitar a escolha correta das antenas durante a fase de comissionamento.

O nível de recepção esperado é obtido através do balanço de potência. Chamamos de balanço de potência a soma de todos os ganhos e perdas que ocorrem no sinal desde a sua saída do transmissor de origem até a sua chegada no receptor de destino.

2.2.1. Limiar do Receptor

O limiar do receptor é o mínimo sinal requerido para que o demodulador trabalhe com uma taxa de erro máxima especificada.¹ Dois limiares são normalmente definidos, um a taxa de erro (*bit error rate* - BER) de 10^{-6} e outro para 10^{-3} .

O limiar do receptor é dependente da mínima relação sinal ruído (S/N) requerida na entrada do receptor, da figura de ruído do receptor e do ruído térmico de fundo (R_T).

$$R_T = KTB \quad (3)$$

onde K é a constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura em Kelvin, geralmente assumida como 288K, e B é a largura de banda do receptor.

A potência de ruído no receptor (P_n) é caracterizada por um fator de ruído, definido como

$$f_a = P_n / KTB \quad (4)$$

A relação portadora ruído térmico é definida como a razão entre a potência recebida e o nível de ruído térmico na recepção, ou seja:

$$RPRT = Pr/KTBfa \quad (5)$$

$$RPRT(\text{dB}) = Pr(\text{dBm}) - 10 \log B(\text{MHz}) - F(\text{dB}) + 114 \quad (6)$$

Ao limiar de recepção Pr_{limiar} associa-se uma relação portadora ruído térmico crítica dada por:

$$RPRTc(\text{dB}) = Pr_{\text{limiar}}/KTBfa \quad (7)$$

$$RPRTc(\text{dB}) = Pr_{\text{limiar}}(\text{dBm}) - 10 \log B(\text{MHz}) - F(\text{dB}) + 114 \quad (8)$$

Os fabricantes de rádios de microondas especificam os valores de limiar de recepção dos equipamentos rádio em relação a largura de banda do sistema.

2.2.2. Nível de Recepção Nominal

Em condições normais, ou seja, sem desvanecimento, o balanço de potência do enlace é dado por:

$$P_{RX} = P_{TX} - L_{TX} - FL_{TX} + G_{TX} - FSL + G_{RX} - L_{RX} - FL_{RX} \quad (9)$$

onde P_{RX} é o nível de recepção sem desvanecimento, em dBm (nível nominal de recepção), P_{TX} é a potência de saída do transmissor em dBm, $FL_{TX,RX}$ é a perda no cabo de alimentação em dB, $G_{TX,RX}$ são os ganho das antenas em dBi, FSL é a perda em espaço livre em dB e $L_{RX,TX}$ são as perda nas derivações em dB.

2.2.3. Margem de Desvanecimento

A diferença entre o nível de recepção nominal e o limiar do receptor é uma margem de segurança contra o desvanecimento. Por essa razão é chamada de margem de desvanecimento.¹ Cada lance rádio, intervalo entre duas repetidoras, pode ser projetado com diferentes margens de desvanecimento nos sistemas

digitais, ao contrário dos sistemas analógicos que são projetados para uma margem de desvanecimento específica, geralmente 40 dB. A margem de desvanecimento, para ser efetiva, deverá ser condizente com o conjunto de objetivos de disponibilidade e de qualidade definidas para o sistema rádio.

2.3.Refratividade e Raio Equivalente

2.3.1.Refratividade

O índice de refração n é definido como a razão entre a velocidade de uma onda eletromagnética se propagando no vácuo pela velocidade de propagação dessa onda em um meio finito (ou material), expresso por:^{1,2,4,5}

$$n = c/v \quad (10)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e v a velocidade da onda no meio material.

Como o índice de refração da atmosfera é muito próximo da unidade (da ordem de 1,0003), defini-se o parâmetro refratividade, dado por

$$N = (n-1) \times 10^6 \quad (11)$$

O valor de N para enlaces abaixo de 100 GHz é dado por^{1,2,4,5}:

$$N = 77,6 P/T + 3,732 \times 10^5 e/T^2 \quad (12)$$

onde P é a pressão em milibares, T a temperatura absoluta em Kelvin e “ e ” a pressão parcial do vapor d’água em milibares.

O valor de N varia com a altitude pois a pressão, temperatura e umidade também variam com a altitude. A pressão e a umidade normalmente decrescem exponencialmente com a altitude enquanto que a temperatura normalmente decresce linearmente com a altitude a uma taxa de -6° por km.

Em condições normais da atmosfera, N decresce com a altitude. Em uma atmosfera padrão (típica), este decréscimo segue aproximadamente uma lei exponencial^{1,2,4,5}.

$$N(h) = N_0 \exp(-h/h_0) \quad (13)$$

onde N_0 é o valor de N na superfície, h a altura sobre a superfície e h_0 o fator de escala da altura.

De acordo com o ITU-R, a atmosfera padrão é definida por $N_0 = 315$ N-unidades e $h_0 = 7,35$ Km.

Próximo a superfície (alturas abaixo de 1 Km), a lei exponencial de variação de N com a altura, ou seja, o gradiente de refratividade, pode ser aproximada por uma variação linear. Nesta região defini-se o gradiente de refratividade como:

$$G = dN/dh \quad (14)$$

Em uma atmosfera padrão e próximo à superfície, a variação de N é constante a uma taxa de • 40 unidades de N por Km.

A expressão de N em função de P , T e “ e ” possui dois termos que costumam ser denominados termo “seco” e termo “úmido”. Este contém a contribuição do vapor d’água.

$$\text{Termo seco: } D = 77,6 P/T$$

$$\text{Termo úmido: } W = 3,73 \times 10^5 e/T^2$$

O termo seco é aproximadamente constante e da ordem de 235 numa atmosfera padrão, enquanto que o termo úmido é o principal responsável pelas variações de N e, conseqüentemente, do gradiente de refratividade.

As expressões dadas acima refletem o comportamento normal da troposfera. Entretanto, sobre certas condições, podem ocorrer mudanças no comportamento normal da umidade e da temperatura, resultando em variações anômalas na refratividade. Inversões do gradiente de refratividade durante certos períodos de tempo levam a condições anômalas de propagação, como dutos e fechos de multipercursos atmosférico, associados à chegada de múltiplos sinais defasados ao receptor.

2.3.2. Raio Equivalente da Terra

Devido à refração as ondas de rádio não se propagam em linha reta. A trajetória das ondas é dependente do gradiente de refatividade em cada ponto ao longo do caminho percorrido pela onda (raio).

Se for considerado um valor médio do gradiente de refatividade ao longo do caminho, pode-se assumir que o raio segue uma trajetória curva. Considera-se então o raio se propagando em um arco cujo raio é "r". Esse raio é inversamente proporcional ao valor médio do gradiente do índice de refração do caminho percorrido. É possível fazer-se a seguinte aproximação:^{1,5}

$$1/r = dn/dh \quad (15)$$

A superfície da terra pode ser aproximada por um arco com um raio médio de 6,371 Km. Dessa forma, a liberação do feixe de ondas emitido pelo rádio e que se propaga sobre a superfície da terra é dependente da distância relativa entre duas curvas.

Uma análise da liberação do feixe é facilitada se uma das curvas é mapeada como uma linha reta e a outra corrigida com uma curvatura extra como compensação. Na prática, o raio emitido pelo transmissor na direção do receptor é mapeado em uma linha reta relativa a um raio efetivo da terra, ajustado pelo gradiente de refatividade.

O raio efetivo da terra (a_e) é o raio real (a) multiplicado por um fator "K" que é dependente do gradiente de refatividade.

$$a_e = K \cdot a \quad (16)$$

O fator K relaciona-se com gradiente do índice de refração por:

$$K = 1 / (1 + a \, dn/dh) = 1 / (1 + a \, dN/dh \cdot 10^{-6}) \quad (17)$$

onde a é o raio real da terra (63371 Km). Substituindo este valor em (17) tem-se

$$K = 157 / (157 + dN/dh) = 157 / (157 + G) \quad (18)$$

A tabela abaixo mostra a relação entre K e G para algumas situações peculiares. O valor K=1 corresponderia a uma situação de real propagação em espaço livre, com os raios propagando-se de fato em linha reta. O valor K=4/3 corresponde à condição padrão da atmosfera. O valor infinito de K representa a propagação sobre terra plana enquanto que valores negativos de K estão associados a um encurvamento dos raios na direção da superfície da terra.

Fator K	Gradiente de Refratividade G
K = 1	G = 0
K = 4/3	G = - 40
K = ∞	G = -157
K < 1	G > 0

Tabela 1: Valores importantes do fator K e do gradiente da refração

2.4. Propagação em Visibilidade

A condição de visibilidade elétrica entre as antenas de um enlace rádio depende do valor do fator K da terra. Os enlaces devem ser dimensionados para desobstrução não apenas em condições normais de propagação mas também em condições de fator K reduzido. A condição de visibilidade elétrica difere da de visibilidade geométrica e está associada aos chamados elipsóides de Fresnel. Estes elipsóides correspondem ao lugar geométrico dos pontos cuja soma das distâncias às antenas é um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda. Considera-se um enlace desobstruído quando não há obstáculos no interior do primeiro elipsóide, correspondente a pontos cuja soma das distâncias ao transmissor e receptor é inferior a meio comprimento de onda.

As zonas de Fresnel são anéis circulares delimitados por dois círculos concêntricos adjacentes que corresponde às seções retas dos elipsóides no plano perpendicular ao plano do enlace. O raio da primeira zona de Fresnel é dado por³:

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda(d_1 \times d_2)}{d_1 + d_2}} \quad (19)$$

onde d_1 é a distância em metros do transmissor até o obstáculo, d_2 a distância em metros do obstáculo até o receptor e λ o comprimento de onda do sinal em metros.

Uma regra comumente utilizada como critério de visibilidade era ter 100% da primeira zona de Fresnel liberada para o valor mediano de K (valor típico $K_{med} = 4/3$) e 60% de liberação para o valor de K excedido durante 99,9% do tempo, denominado K mínimo (valor típico $K_{min} = 2/3$).¹

Como o fator K da terra varia aleatoriamente, podem ocorrer situações extremas em menos de 60% do raio do primeiro elipsóide de Fresnel seja obstruído por algum obstáculo do terreno, aumentando a atenuação do percurso e provocando desvanecimento lento (perdas por difração).

O valor de K mínimo como $2/3$ foi baseado em medidas realizadas na França em um enlace com 30 Km de comprimento.¹ Esse valor tem sido usado no mundo todo em diferentes enlaces rádios, independentemente do comprimento dos enlaces. Entretanto, é sabido que o valor de K mínimo aumenta com o comprimento do enlace devido ao efeito médio dos gradientes de refratividade em cada ponto do enlace. O ITU-R propões uma curva que mostra uma estimativa conservadora do valor de K mínimo em função do comprimento do enlace. A figura abaixo mostra o comportamento típico de K mínimo em um clima temperado.

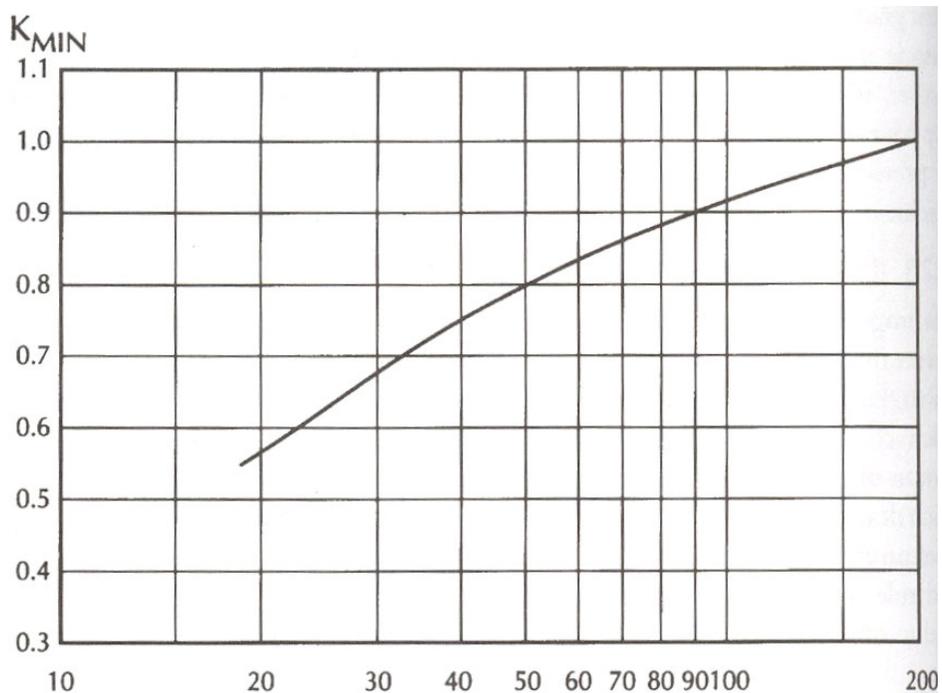


Figura 1: K mínimo versus comprimento do enlace rádio

O uso do valor tradicional de K mínimo ($2/3$), ao invés do seu valor de acordo com o comprimento do enlace, leva a uma diferença significativa na altura das antenas, implicando em maiores custos.

Como os raios das zonas de Fresnel são inversamente proporcionais a raiz quadrada da frequência, a condição de visibilidade para o enlace não é independente da frequência do sinal irradiado. Portanto, como artifício para facilitar a liberação do enlace, utilizam-se zonas de Fresnel normalizadas, tornando-as independentes da frequência.

Com o aumento da frequência, o raio da zona de Fresnel diminui e a liberação do enlace fica mais fácil de ser obtida.

Entretanto, esse fato também aumenta o risco de obstrução por desvanecimento, já que a elevação do raio equivalente da terra, que equivale a termos um estufamento da superfície da terra é independente da frequência.

Assim, um determinado estufamento da superfície da terra provocará a obstrução do enlace mais facilmente em frequências altas do que em frequências baixas.

Essa é a razão porque a banda de 2 GHz foi escolhida para ser utilizada no enlace rádio de maior comprimento existente no mundo. São 300 km sobre o Mar Vermelho.

Os projetistas de enlaces rádios são bastante conservativos quanto aos critérios de liberação utilizados devido ao medo de ocorrerem interrupções provocadas por desvanecimento por difração (desvanecimento lento). A perda por difração é um evento de desvanecimento lento, portanto se a margem de desvanecimento for excedida durante esse evento, o enlace pode ficar interrompido por minutos ou até por horas.

É importante lembrar que o desvanecimento por difração é causado por baixos valores de K ($K < 1$ e $G > 0$), situação de sub-refração, enquanto que o desvanecimento por multipercurso é causado por altos valores de K ($K > 1$ e $G < -40$), situação de super-refração.

Como a probabilidade de desvanecimento por difração é muito maior que o desvanecimento por multipercurso, é mais sensato posicionar a antena na altura especificada pelo primeiro critério de liberação de enlace ($K = 4/3$, com 100% de liberação da primeira zona de Fresnel) e então garantir que em condições de K

mínimo a perda por difração não irá exceder a margem de desvanecimento do enlace.¹

Um outro critério é utilizar para enlaces longos o valor de K mínimo, pois ao percorrer um espaço maior as ondas de rádio passam por vários meios distintos em que os índices de refração podem ser diferentes e, neste caso, a aplicação de K mínimo se aproxima mais da realidade, ao contrário do K médio.⁷

Ao aplicarmos um valor de K mínimo ($K < 1$) na correção do raio da terra, teremos um estufamento maior da superfície da terra (raio diminuído) em enlaces longos.

Para enlaces curtos o K determinante será o K médio ($K = 4/3$).

2.5. Efeito das Variações da Refratividade

O gradiente de refatividade ($dN/dh = G$) varia aleatoriamente no tempo, podendo assumir valores positivos e negativos.¹ A figura abaixo mostra uma distribuição cumulativa de probabilidades de G .

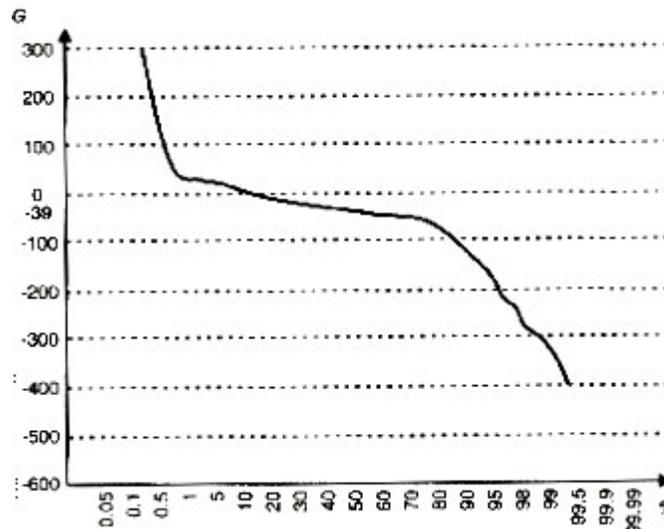


Figura 2: Distribuição de probabilidades do gradiente de refatividade G

Pela observação da Figura 2 percebe-se que os valores extremos negativos e positivos estão presentes por pequenas percentagens de tempo. O valor mediano (50% do tempo) neste caso é -40 N-unidades /Km e corresponde a um $K_{med} = 4/3$. Esta situação situação é considerada como a refração padrão.

Quando $G > 0$, temos a situação de sub-refração, em que a curvatura real dos raios é contrária à da superfície da terra. Nesta situação podem ocorrer

obstruções do raio por obstáculos do relevo entre transmissor e receptor ou pela própria curvatura da terra, ocasionando que causa perda adicional por difração.

Quando $G < -100$ N – unidades/Km tem-se a condição chamada de super-refração, que normalmente resulta em desvanecimento por multipercurso.

Quando $G < -157$, o encurvamento dos raios é superior à curvatura da terra (raio equivalente negativo) e os raios ficam canalizados junto à superfície, correspondendo a formação dos chamados dutos troposféricos. Isto provoca multipercurso severo, grande espalhamento do feixe e até a condições de desfocalização total, ou seja, o sinal não chega a antena receptora.

A figura 2 abaixo mostra o encurvamento nos raios associado a diferentes gradientes de refratividade.¹

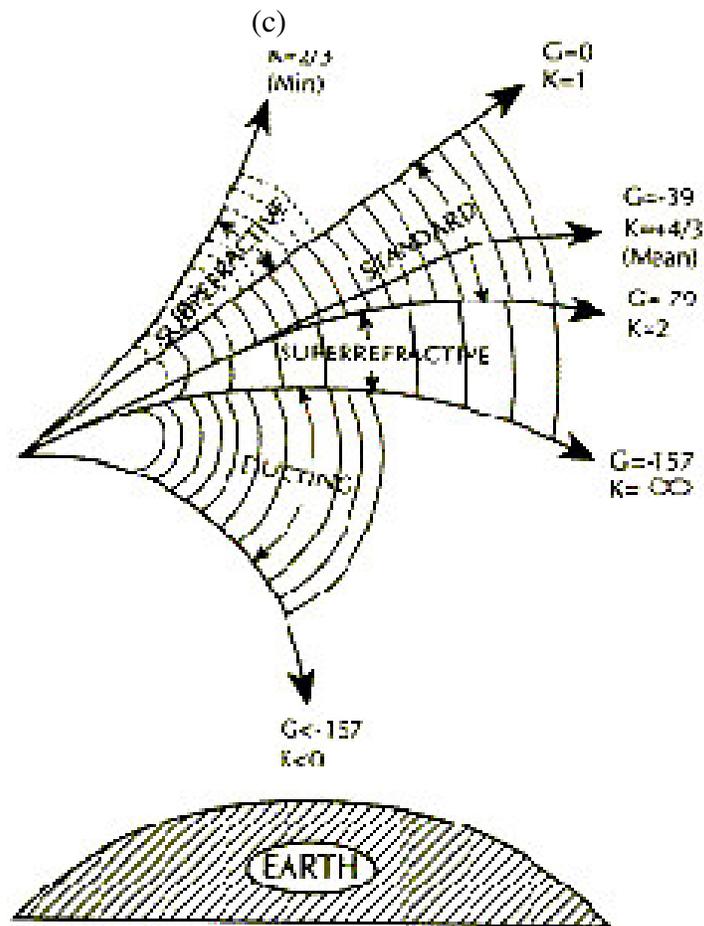


Figura 3: Encurvamento dos raios causado pela refração

2.6. Condições Anômalas da Atmosfera

Nesta seção serão discutidas as razões físicas pelas quais as camadas da atmosfera apresentam gradientes de refratividade anormais.

Lembrando que N é função da pressão (P), temperatura (T) e umidade relativa (e), verifica-se que P é normalmente estável enquanto T e “ e ” podem sofrer significativas alterações no seu comportamento normal, provocando as mudanças mais severas no comportamento do gradiente de refratividade.^{1,5}

Nas figuras abaixo são comparados gradientes de pressão, temperatura e umidade associados à situação normal (Figura 4) de propagação com gradientes dos mesmos parâmetros que causam gradientes de refratividade positivos (Figura 5) e negativos (Figura 6).

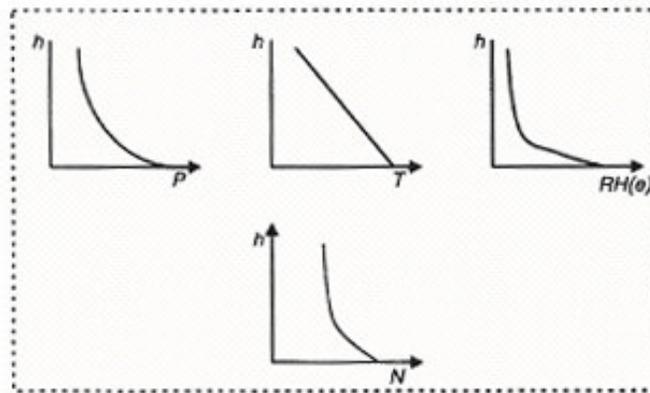


Figura 4: Gradientes normais

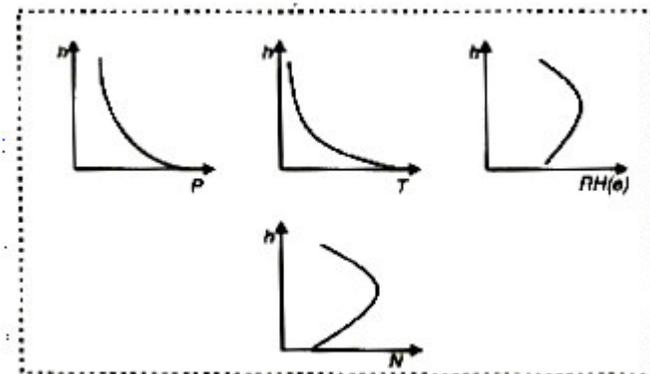


Figura 5: Gradientes anômalos com gradiente de refratividade positivo (sub-refração)

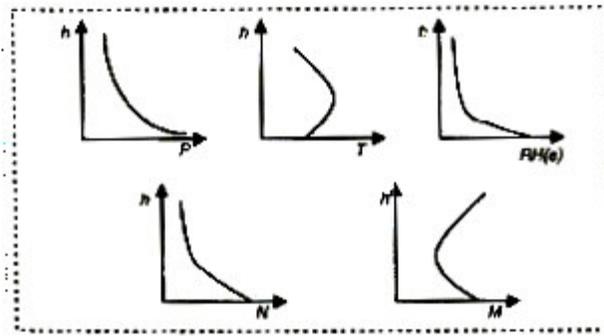
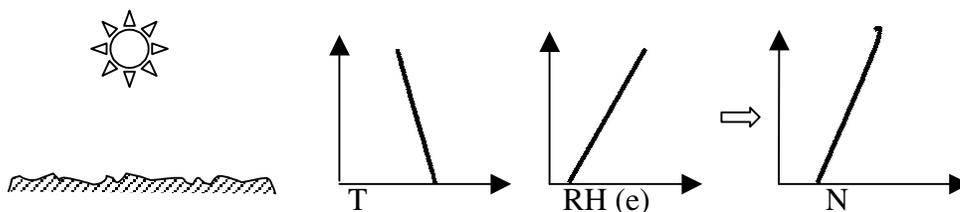


Figura 6: Gradientes anômalos com gradiente de refratividade negativo (super-refração)

Os gradientes positivos provocam situações de sub-refração e normalmente ocorrem quando temos queda acentuada da temperatura e aumento da umidade com a altitude. Os fenômenos meteorológicos responsáveis pela sub-refração são discutidos a seguir.

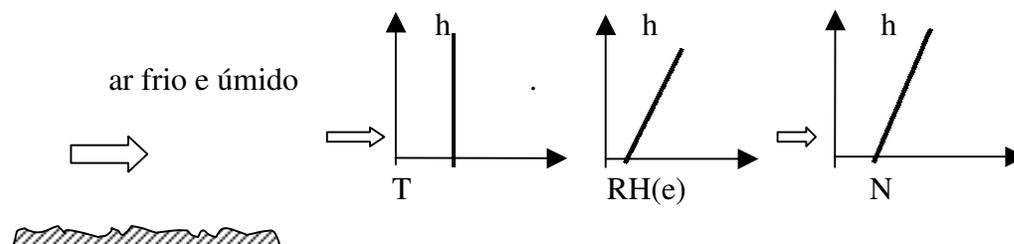
1. Condução

O aquecimento do ar pelo solo durante o período mais quente e ensolarado do dia tende a provocar um aumento da umidade relativa com a altura acompanhado de um decréscimo vertical de temperatura. Estes fenômenos propiciam condições sub-refrativas da atmosfera próxima ao solo.



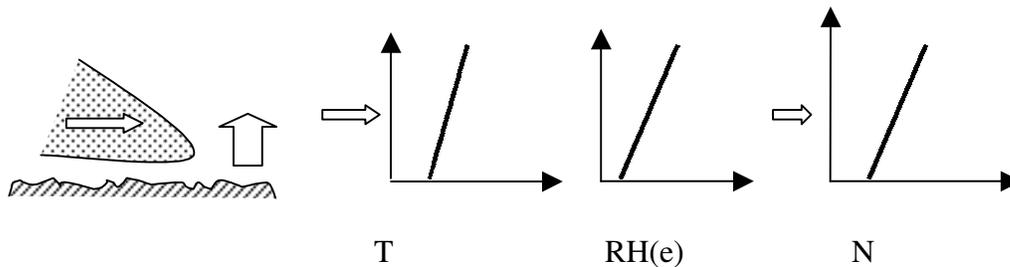
2. Advecção

O deslocamento de massas de ar úmido e frio sobre superfícies secas e mais quentes tende a causar aumento vertical da umidade relativa acompanhado de pouca variação de temperatura. Tais fenômenos propiciam condições sub-refrativas.



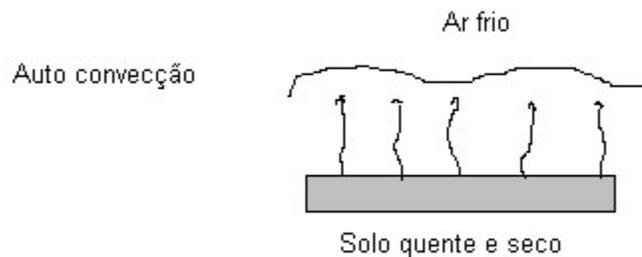
3. Frente fria e seca

O deslocamento de massas de ar frio e seco sobre regiões continentais, provocando a ascensão de ar quente e úmido, tende a causar aumento vertical de temperatura e de umidade relativa do ar, sendo esta uma causa de condições sub-refrativas.



4. Auto Convecção

Fenômeno que ocorre devido a calor sobre uma superfície muito quente, Esse processo causa um degraú no gradiente negativo da temperatura na camada de ar quente e seco sobre a superfície da terra limitada por uma massa de ar frio.



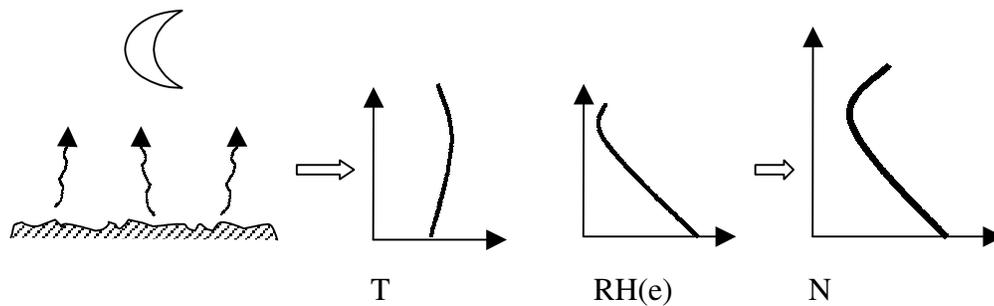
Já os gradientes negativos provocam situações de super-refração que normalmente ocorrem quando temos aumento da temperatura e queda acentuada da umidade com a altitude. Os fenômenos meteorológicos que causam super-refração são apresentados abaixo:

1. Radiação

Durante o dia o solo absorve calor da radiação solar e após o entardecer dissipa este calor para a camada de ar acima.

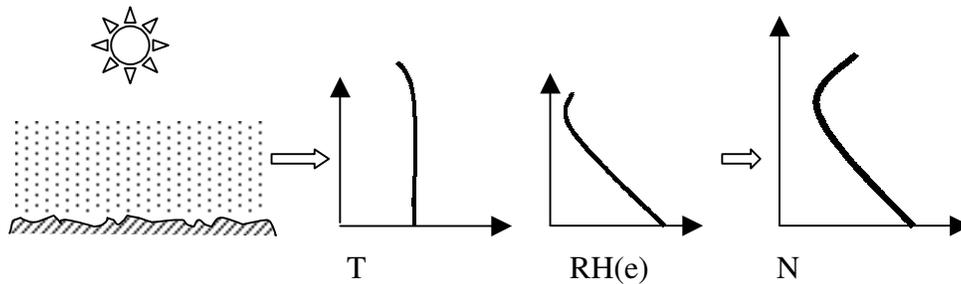
Durante noites sem ou com ventos muito fracos esta transferência de calor tende a causar taxa positiva de temperatura acompanhada de decréscimo acentuado de umidade relativa do ar com a altura em camadas mais próximas do solo. A conjunção destes dois fenômenos provoca condições super-refrativas

sendo uma das principais causas de formação de dutos troposféricos à noite em regiões continentais



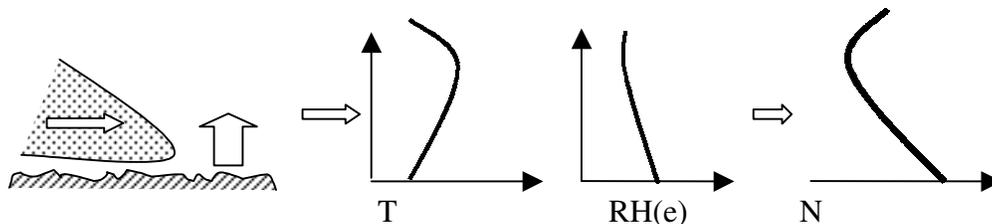
2. Evaporação

A evaporação de água em superfície úmida e quente após chuva tende a causar um decréscimo acentuado de umidade relativa do ar com a altura acompanhada de pouca variação de temperatura na camada mais próxima do solo. Tais comportamentos propiciam condições de super-refração e formação de dutos.



3. Frente Fria

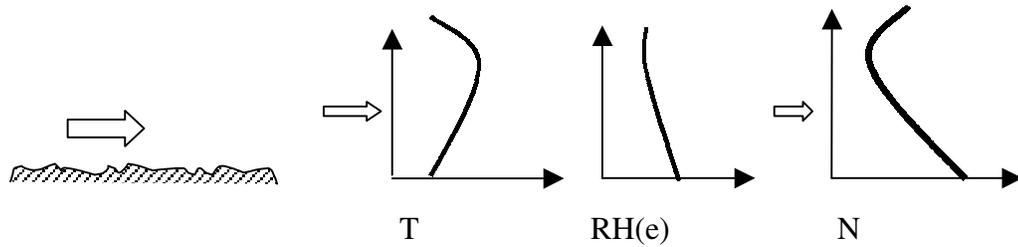
O deslocamento de massas de ar frio sobre regiões continentais, provocando a ascensão de ar quente e seco, tende a causar aumento vertical de temperatura acompanhado de decréscimo vertical de umidade relativa do ar, sendo esta uma causa de condições super-refrativas e dutos.



4. Advecção

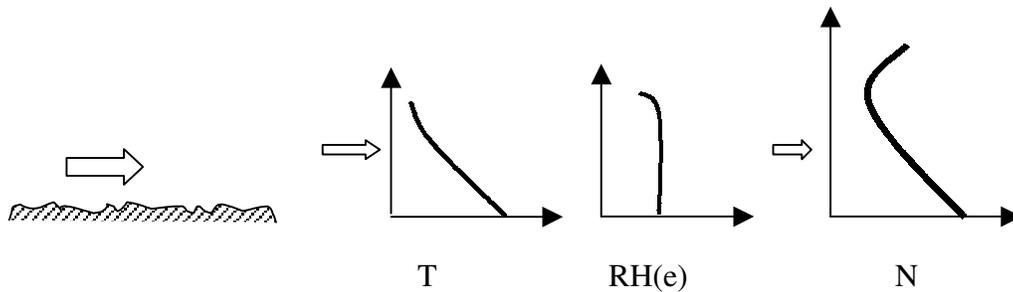
O deslocamento de massas de ar seco e quente sobre superfícies úmidas e mais frias como, por exemplo, massa de ar continental sobre o oceano em estações

quentes, também tende a causar aumento vertical de temperatura acompanhado de decréscimo vertical de umidade relativa, propiciando condições super-refrativas e dutos.



5. Quase Advecção

O deslocamento de massas de ar seco e frio sobre superfícies úmidas e mais quentes como, por exemplo, massa de ar continental sobre oceano em estações frias, tende a causar decréscimo vertical de temperatura acompanhado de pouca variação de umidade relativa. Estes fenômenos propiciam condições super-refrativas e dutos.



2.7. Desvanecimento em enlaces de micro-ondas

Estas variações que ocorrem na estrutura da troposfera ao longo do tempo em relação à sua condição mediana provocam, como visto, diversos fenômenos, como a formação de camadas super ou sub-refrativas e de dutos troposféricos, que fazem variar aleatoriamente o nível do sinal recebido num enlace rádio. Estas variações são denominadas desvanecimentos.⁶

Os desvanecimentos são normalmente classificados em rápidos e lentos. Embora não exista uma regra definida para esta classificação, pode-se indicar, genericamente, que os desvanecimentos lentos correspondem a variações de poucos dB por minuto na intensidade do sinal, enquanto que os desvanecimentos rápidos podem corresponder a variações de dezenas de dB em segundos. Além disto, os desvanecimentos lentos são causados por efeitos de propagação como a

difração, dutos troposféricos e a atenuação por chuvas, cuja variação com a frequência é suficientemente pequena na faixa de frequências do canal, podendo ser desprezada e por esse motivo são denominados desvanecimentos planos. Já os desvanecimentos rápidos estão geralmente associados ao efeito de multipercursos atmosférico que é fortemente dependente da frequência, sendo por isto denominados desvanecimento seletivos.

A Figura 7 ilustra o efeito do desvanecimento plano, nos domínios do tempo e da frequência, em um sinal recebido em um enlace de microondas.

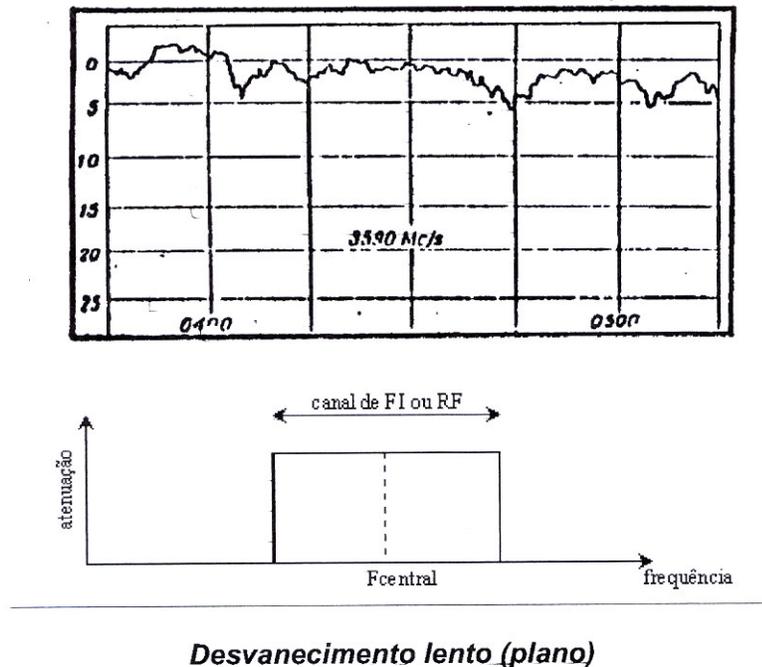


Figura 7: Efeito do desvanecimento plano num sinal rádio de 3590 MHz

O multipercursos atmosférico é um fenômeno aleatório que ocorre quando as irregularidades no índice de refração do ar produzem caminhos alternativos para a energia. Desta maneira o sinal total será formado pelas componentes fasoriais geradas pelos multipercursos. Se houver uma atenuação do raio direto de maneira que este se equipare as componentes geradas pelos multipercursos, poderão acontecer desvanecimentos profundos e conseqüentemente situações de recepção críticas. Além do multipercursos atmosférico propriamente dito, reduções na intensidade do raio direto por efeito de desfocalização podem torná-lo comparável ao raio refletido, gerando também os efeitos de multipercursos.

A Figura 8 abaixo esquematiza o perfil de um enlace para uma propagação por multipercursos.

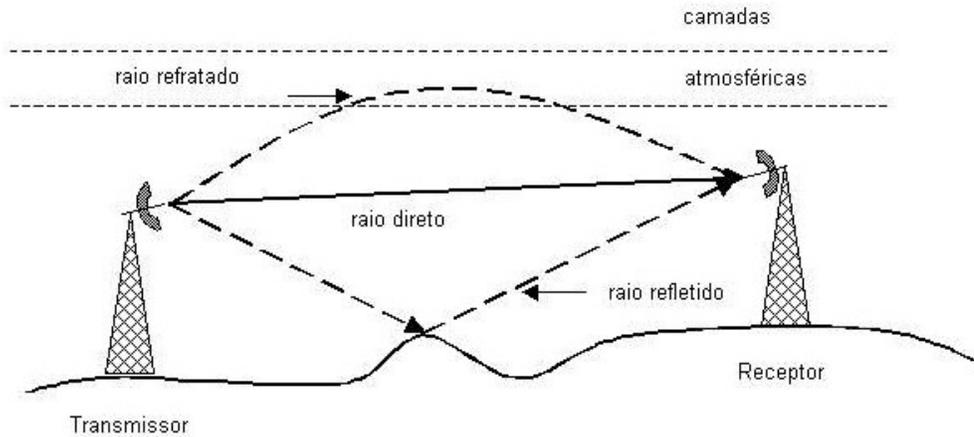


Figura 8: Perfil de um enlace com multipercurso

A Figura 9 mostra o efeito do desvanecimento rápido, no domínio do tempo, em um sinal recebido no mesmo enlace do caso.

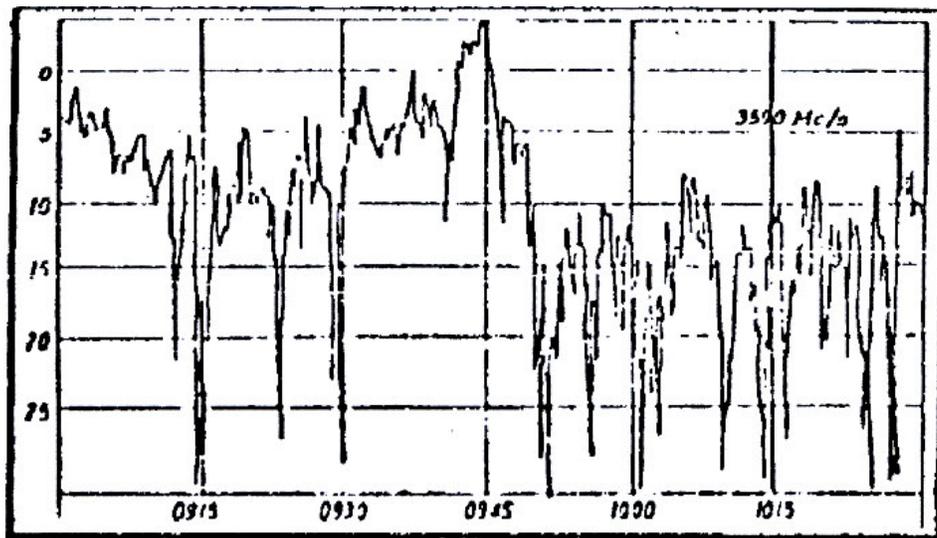
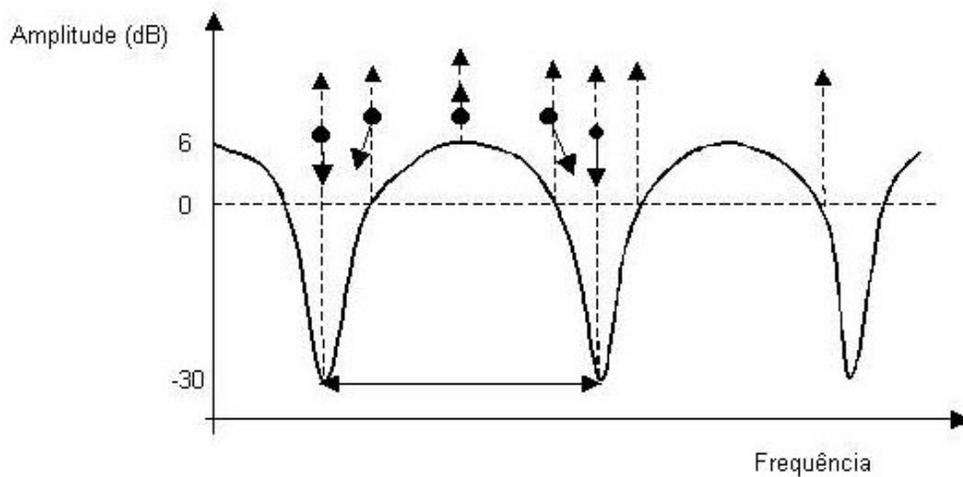


Figura 9: Efeito do desvanecimento rápido (seletivo) num sinal de 3590 MHz

A seletividade do desvanecimento fica evidente quando observamos na $\frac{1}{\tau}$

Figura 10 os vales (*notches*) que aparecem quando o sinal direto tem fase oposta aos sinais refletidos. Por outro lado, quando as fases dos dois sinais coincidem há um reforço de sinal (ponto de máximo na figura).⁸



$$\frac{1}{\tau}$$

Figura 10: Desvanecimento do sinal

O intervalo entre os vales é $\frac{1}{\tau}$, onde τ é o atraso de tempo entre os raios direto e refletido. A amplitude relativa dos raios determina a profundidade dos vales. Quando esses vales estão presentes dentro de um canal de rádio, significa que houve uma dispersão em amplitude, degradando conseqüentemente a TEB (taxa de erro de bits). Os rádios digitais de alta capacidade são mais sensíveis a esse tipo de degradação.