

**Enlaces, Antenas e
Propagação para Internet Sem Fio (Conceitos de Wireless)**

Autores

**Eng Wilton J. Fleming , Msc
Eng Helcio Aranha**

beta@betatelecom.com.br

Abril de 2005

Resumo

O uso dos sistemas de radio por Espalhamento Espectral para prover Internet sem fio é hoje , sem dúvida, uma forma eficaz de cobrir uma grande área de assinantes de forma rápida. Neste tipo de serviço existe uma grande interação entre as especialidades técnicas de enlaces de radiofrequências e sistemas de computadores. Neste artigo procura-se apresentar os princípios básicos da teoria de antenas, propagação, e as características essenciais dos equipamentos mais comuns no mercado , bem como os pontos principais das normas Anatel aplicáveis, com a finalidade de fornecer informações necessárias à avaliação da implantação de um sistema desse tipo.

I. Introdução

O uso das redes sem fio é hoje uma forma rápida de fornecer acesso de Internet ao grande público, com qualidade e segurança. Os primeiros sistemas apareceram há menos de cinco anos e hoje existe uma grande quantidade de provedores operando, por vezes, na mesma área de cobertura. O conhecimento dos princípios básicos das antenas e sistemas irradiantes, bem como da legislação pertinente ao assunto é de grande importância para aqueles provedores que pretendem iniciar nesse serviço ou manter a qualidade daqueles já existentes. Neste artigo procura-se apresentar os princípios básicos da teoria de antenas, propagação, e as características essenciais dos equipamentos mais comuns no mercado, bem como os pontos principais das normas Anatel aplicáveis.

É importante salientar que, além dos aspectos técnicos da legislação a serem observados, o candidato à exploração do serviço de Internet via rádio deve também obter junto à Anatel a licença de SCM (Serviço de Comunicação Multimídia). A entrada em operação do serviço, sem esta licença, está sujeita à multas, confisco dos equipamentos e processo criminal.

I.1. Configuração Básica do sistema

A Figura 1 apresenta o diagrama simplificado de um sistema para fornecimento de Internet sem fio, utilizando rádios de Espalhamento Espectral. Nesse desenho estão representados o Ponto de Presença Principal (PT01) e dois pontos de repetição (Ponto 2 e Ponto 3). Nos próximos itens serão descritos os principais parâmetros dos rádios e antenas, que influenciam no bom funcionamento do sistema.

REE – Rádio de Espalhamento Espectral

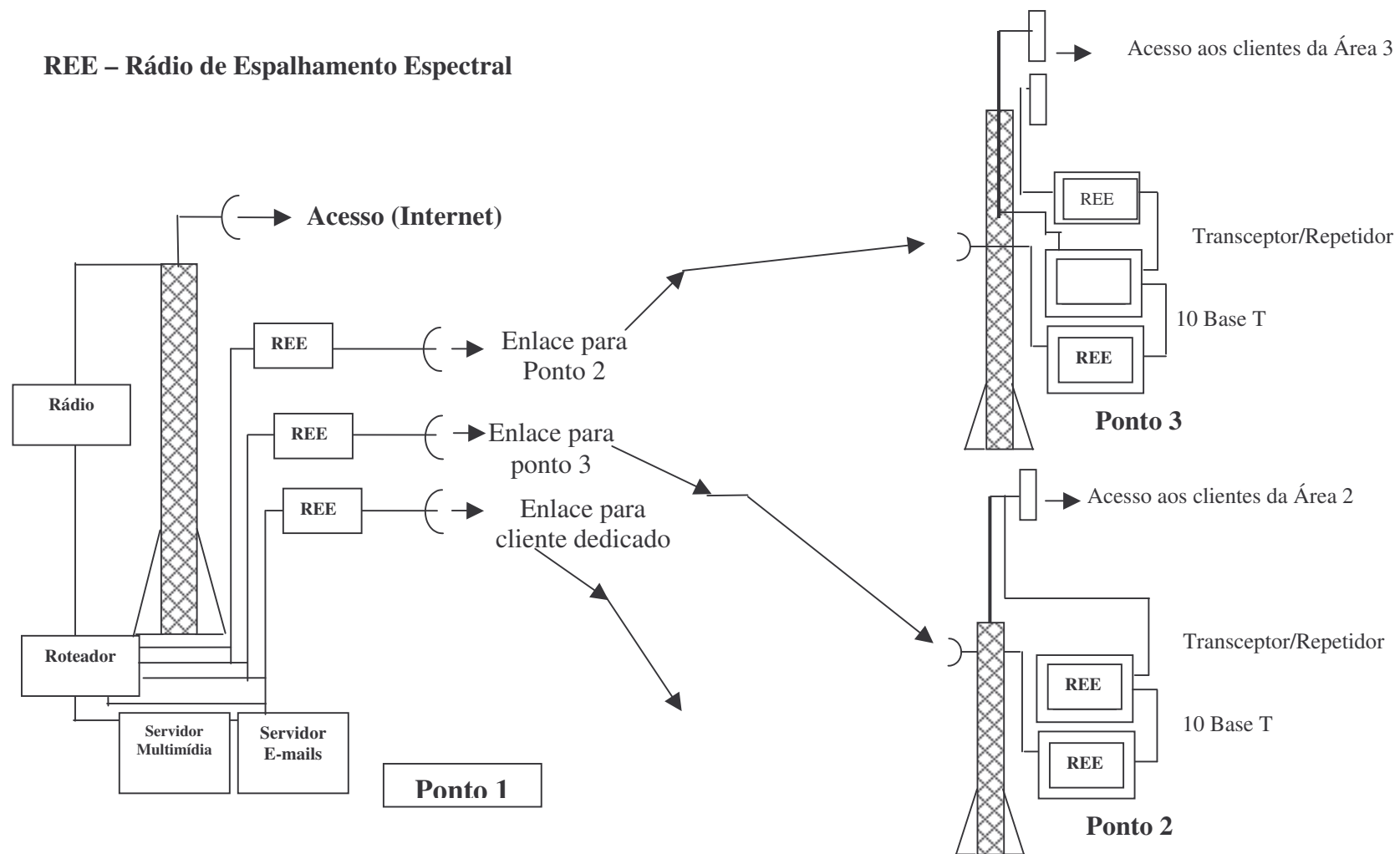


Fig.1 - Diagrama simplificado de um sistema para fornecimento de Internet sem fio

II. Conceitos Básicos de uma antena

Uma antena pode ser definida como uma estrutura metálica associada a uma região de transição entre uma onda confinada (guiada), e uma onda no espaço livre, ou vice-versa.

A Figura 2 apresenta esse conceito da antena.

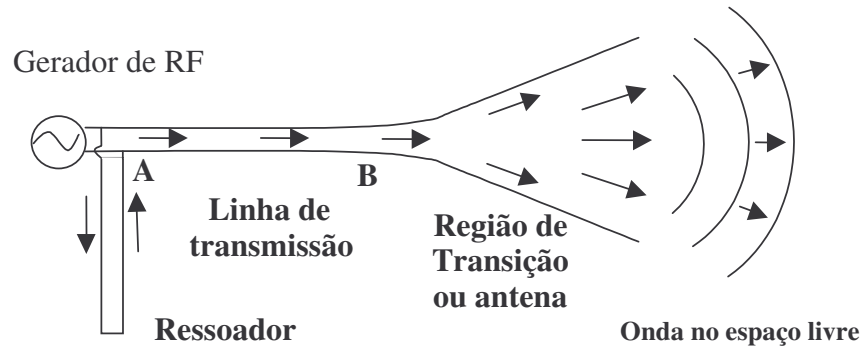


Fig.2 – Conceito de uma antena

Os princípios básicos de radiação de ondas eletromagnéticas foram apresentados por Maxwell ^[1] por volta de 1884. Daquela época até os dias de hoje, a engenharia de antenas se desenvolveu rapidamente, tomando grande impulso com o advento dos computadores pessoais, e métodos matemáticos para a solução numérica das Equações de Maxwell e suas condições de contorno.

De uma forma geral, pode-se definir ou especificar as antenas a partir de parâmetros essenciais que são o Ganho, Largura de Feixe, Largura de Faixa, Perda de Retorno e Polarização. Cada um desses parâmetros, bem como o conceito de antena isotrópica, será descrito a seguir de forma simplificada.

II.1. A antena isotrópica

A antena isotrópica é definida como sendo aquela que irradia igualmente em todas as direções. Não tem existência física, sendo considerada uma abstração matemática que serve para definição de ganho de outras antenas práticas. Para distâncias iguais do irradiador isotrópico, a densidade de potência é sempre igual, qualquer que seja o ângulo de observação. Uma figura representativa das condições de radiação dessa antena é uma esfera, como apresentado na Figura 3. A antena isotrópica está situada no centro da esfera de representação.

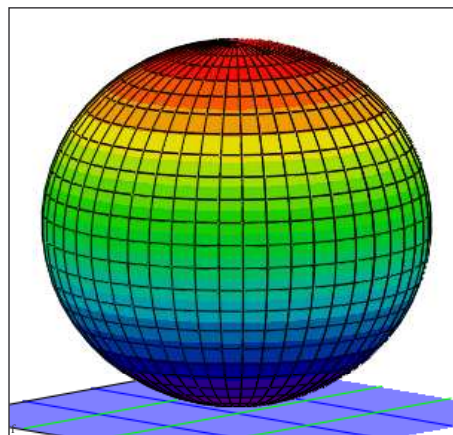


Fig 3 – Representação da radiação de uma antena isotrópica

II.2. Diagramas de radiação

O diagrama de radiação é um dos mais importantes parâmetros das antenas, pois a partir dele é possível extrair grande quantidade de informação.

É importante salientar uma propriedade das antenas definida pelo chamado de "Teorema da reciprocidade" que consiste no seguinte: "desde que mantida constante a frequência, as antenas se comportam igualmente, tanto na transmissão como na recepção". Isso significa que os diagramas de radiação, impedância e outros parâmetros são iguais nas duas situações. Note-se que certos parâmetros possuem restrições de ordem construtiva. Como exemplo pode-se citar que uma antena de recepção não suporta potências elevadas, necessárias às antenas transmissoras.

O diagrama de radiação é uma maneira de visualizar, e medir, a densidade de potência irradiada pela antena nas diversas direções e, fundamentalmente apresenta-se como um gráfico em três dimensões. Entretanto em termos práticos é muito trabalhoso (e oneroso) obter na prática o diagrama em três dimensões. Por essa razão é mais comum utilizar-se o diagrama em duas dimensões, fazendo-se tantos planos (cortes) quantos necessários para definir a antena.

Utiliza-se normalmente dois tipos de representação: Polar (r, θ) e Retangular (x, y).

Ambos os diagramas representam a mesma grandeza, ou seja: intensidade de campo em função dos ângulos de observação. O diagrama polar é mais útil para visualizar o comportamento da antena como um todo. Por outro lado, esse diagrama não apresenta muita precisão para extrair dados numéricos, principalmente quando a antena possui características de radiação muito direcionais.

A Figura 4 apresenta os diagramas polar e retangular da antena isotrópica mostrada na Figura 3.

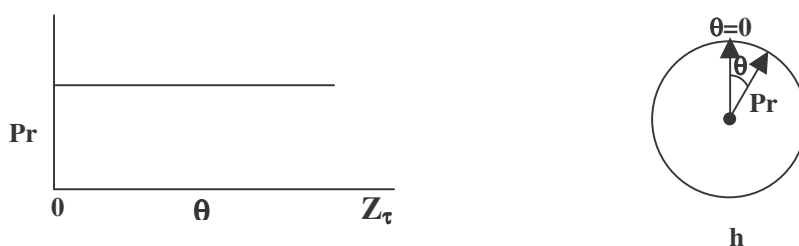


Fig.4 – Diagramas de radiação polar e retangular para uma antena isotrópica

A Figura 5 apresenta o diagrama de radiação para uma antena qualquer, que irradia mais em uma direção do que em outra. Esse diagrama é chamado de diretivo.

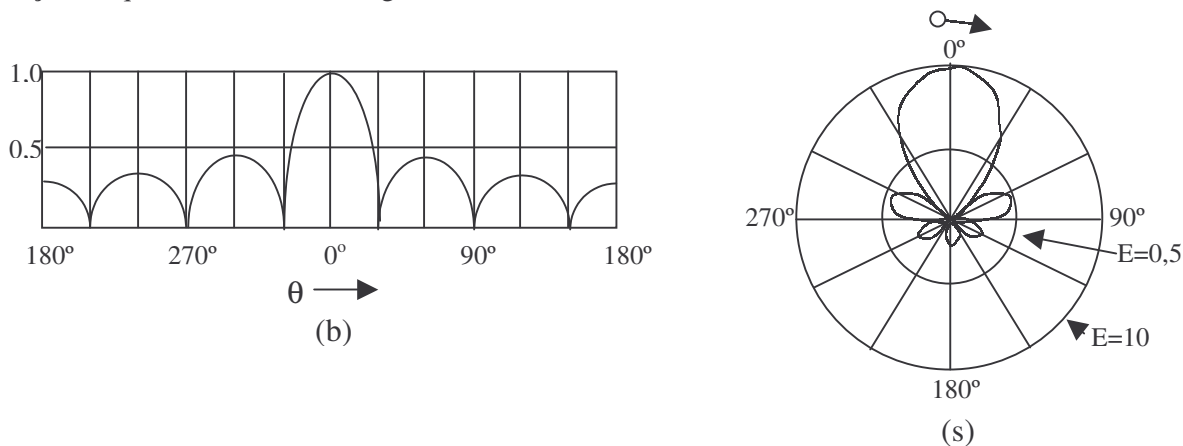


Fig.5 – Diagramas de uma antena diretiva

Para a maioria das aplicações práticas, utilizam-se dois planos de corte ortogonais entre si, que em geral são suficientes para definir a antena. Toma-se como referência o plano do campo elétrico e do campo magnético (E e H) irradiados.

II.3. Ganho e Diretividade

A Diretividade de uma antena indica a capacidade da antena em concentrar ou focalizar energia em uma determinada direção.

Mede-se a Diretividade comparando-se a intensidade da radiação na direção de máximo em relação a intensidade de radiação produzida por uma antena isotrópica, sendo mantida constante a potência total irradiada. A Figura 6 apresenta o conceito de Diretividade comparando-se o diagrama da antena diretiva com o da antena isotrópica, para a mesma potência de entrada nas duas antenas e em um dos planos ortogonais de medidas. Note-se que, enquanto a potência radiada da antena diretiva é maior em uma determinada direção, comparada à isotrópica, para outras direções o valor pode ser até menor que aquele irradiado pela antena isotrópica. Note-se o aparecimento do chamados lóbulos secundários, que são representações de irradiações fora da direção de máximo..

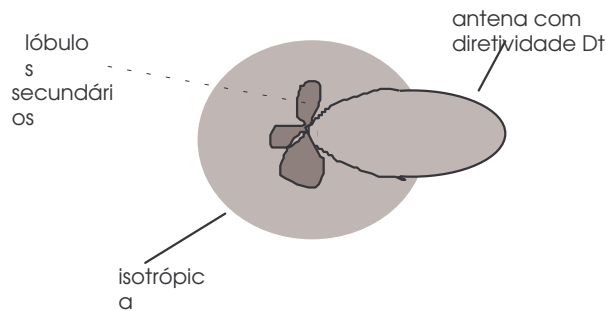


Fig.6 – Conceito de Diretividade

Normalmente a Diretividade de uma antena é expressa em dBi, ou seja, é a capacidade de concentração de energia, expressa em dB's, relativa a uma hipotética antena isotrópica.

Como exemplo típico tem-se o dipolo de meia onda que apresenta Diretividade de 2,15 dBi na frequência central.

A relação de Ganho e Diretividade é dada por :

$$G = \eta \cdot D \tag{1}$$

onde

- G = ganho
- η = eficiência da antena
- D = diretividade

Na verdade o Ganho leva em conta as perdas ôhmicas existentes na antena, bem como, outras perdas como, por exemplo, aquelas produzidas por descasamento, ou má adaptação de impedâncias.

Para antenas de abertura, como, por exemplo, as parabólicas, pode-se estimar o Ganho utilizando a seguinte expressão ^[2]:

$$G(\text{dBi}) = 10 \log \left[\frac{\pi^2 d^2}{\lambda^2} \eta \right] \tag{2}$$

onde

- d é o diâmetro da abertura
- λ é o comprimento de onda da frequência de operação

O Ganho tem fundamental importância no desempenho do sistema, sendo responsável direto pela intensidade de sinal recebida dado que, os outros parâmetros do enlace sejam mantidos constante (potência do transmissor, distância do transmissor, etc.). Pode-se obter a relação sinal/ruído necessária para uma margem adequada no sistema dimensionando-se corretamente o Ganho da antena. Entretanto, o

Ganho não é só importante no que diz respeito à relação sinal/ruído, mas também quanto à rejeição de sinais interferentes que causam erros de dados, devido às múltiplas reflexões das ondas incidentes, e interferências de outros sistemas.

Deve-se citar também que quanto maior o Ganho menores serão os lóbulos secundários da antena, e certamente o sistema será mais imune às interferências.

Os lóbulos secundários são indesejáveis, porém não existem antenas sem radiações em direções diferentes da principal, logo o que se pode fazer é minimizá-los. O principal efeito de tais lóbulos é a recepção indesejável de sinais interferentes de outros serviços, ou as reflexões em prédios, árvores, solo, etc., que causam perda de dados e aumentam a taxa de erro em sistemas digitais.

No mercado é comum encontrar antenas para a faixa de 2400MHz a 2500 MHz com lóbulos secundários variando de -12 à -20 dB, abaixo do lóbulo principal. Para um bom desempenho dos sistemas, deve-se ter como meta lóbulos laterais menores que -20 dB

II.4. Eficiência η

Esse parâmetro não é geralmente especificado pelos fabricantes de antenas, uma vez que o Ganho já o leva em consideração. Mas é importante lembrar que antenas de baixa eficiência tornam-se grandes, pesadas e desajeitadas, desnecessariamente. Portanto, se o fabricante puder oferecer uma antena de boa eficiência, o instalador, bem como o cliente, serão beneficiados. A Tabela I apresenta alguns exemplos da influência da eficiência em antenas parabólicas de 21 dBi de Ganho, na faixa de frequências de 2400 MHz a 2500 MHz.

Tabela I – Eficiência x Diâmetro para antenas parabólicas (21 dB1 de Ganho e faixa de 2400MHz a 2500 MHz)

Diâmetro	Eficiência
106 cm	15 %
69 cm	35 %
53 cm	60 %

Como pode ser observado na Tabela I, o diâmetro cai pela metade quando a eficiência vai de 15% para 60%. Não são incomuns eficiências da ordem de 35% nas antenas de grade hoje comercializadas. Baixas eficiências não causam apenas aumento desnecessário nas dimensões das antenas, mas também são oriundas de descasamentos e de perdas ôhmicas no alimentador da antena.

II.5. Largura de feixe de – 3dB

A Largura de Feixe define o ângulo formado entre os dois pontos do diagrama da antena em que o valor da intensidade de radiação cai de 3 dB em relação ao máximo. A Figura 7 apresenta a medida da Largura de Feixe para um plano da antena.

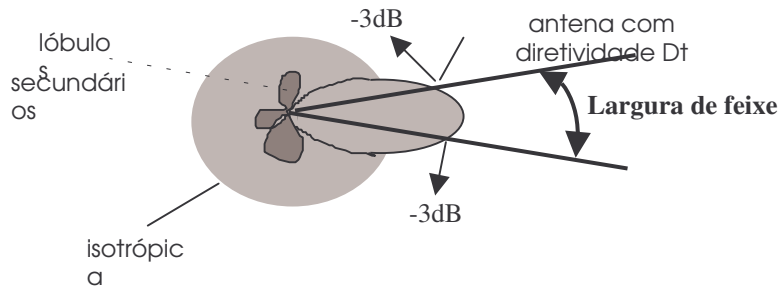


Fig.7 – Largura de Feixe de uma antena

Em geral, quando a antena é uma parábola de revolução, a largura de feixe de -3 dB tanto no plano de corte horizontal quanto no vertical são valores próximos, o que não ocorre em outras configurações de antenas assimétricas. Por essa razão, deve-se sempre analisar os dois planos de corte dos diagramas da antena. Outros parâmetros já citados como, por exemplo, os lóbulos secundários podem variar muito de um plano para outro. É muito comum o fabricante fornecer ao usuário o diagrama apenas do plano em que o gráfico é melhor. Por essa razão deve-se exigir dos fabricantes os diagramas nos dois planos e em pelo menos três frequências na faixa de operação prevista da antena.

Um aspecto prático importante a ser considerado o cálculo aproximado da Diretividade pelos ângulos de meia potência.

Considerando que toda a potência irradiada pela antena seja transmitida por uma área retangular angular $\phi_1 \cdot \theta_1$, a Diretividade é dada por:

$$D = \frac{4\pi}{\phi_1 \cdot \theta_1} \quad (3)$$

Onde θ_1 é o ângulo de meia potência no plano vertical (radianos) e ϕ_1 é o ângulo de meia potência no plano horizontal (radianos).

Para os ângulos θ_1 e ϕ_1 em graus tem-se:

$$D = \frac{41253}{\theta_1^\circ \cdot \phi_1^\circ} \quad (4)$$

Uma melhor aproximação é ainda obtida considerando que a área de fluxo de potência é circular e não retangular, o que reduz a área de $\frac{\pi}{4}$ (78%), logo:

$$D = \frac{41253}{\phi_1^\circ \cdot \theta_1^\circ} \cdot \frac{4}{\pi} = \frac{52525}{\phi_1^\circ \cdot \theta_1^\circ} \quad (5)$$

Em antenas onde a potência irradiada pelos lóbulos secundários não pode ser desprezada, considera-se que aproximadamente 55% da potência irradiada flui através da largura de feixe. Desse modo, a Diretividade é dada por:

$$D = \frac{29000}{\phi_1^\circ \cdot \theta_1^\circ} \quad (6)$$

II.6. Relação Frente-Costas

É definida como sendo a relação entre o lóbulo principal e os lóbulos secundários situados no hemisfério posterior da antena.

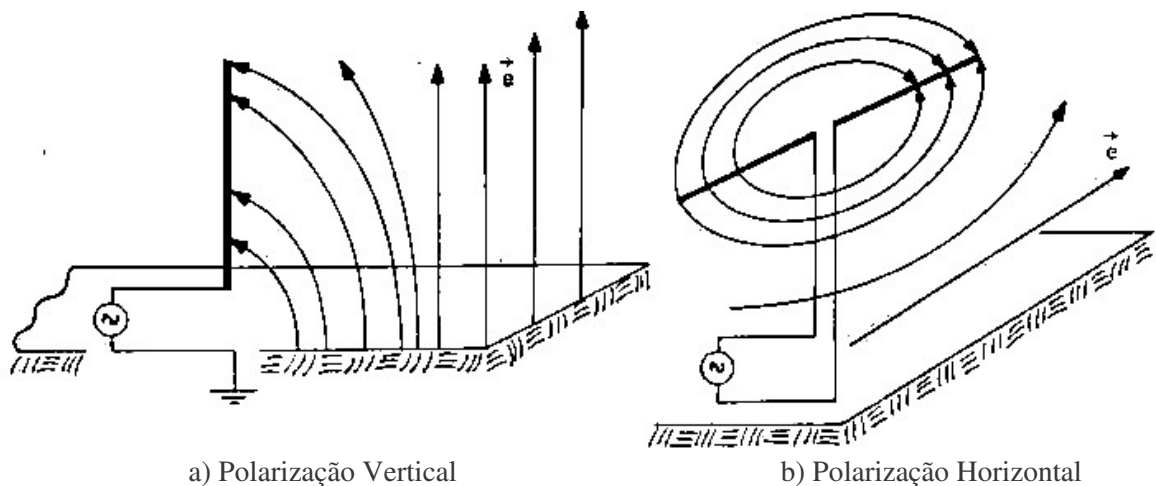
A relação Frente-Costas deve ser superior a 25 dB para antenas de boa qualidade.

II.7. Polarização e Rejeição de Polarização

A polarização de uma antena é definida pela orientação do campo elétrico da onda recebida ou transmitida em relação ao plano de terra, na direção do máximo da radiação. A radiação oriunda de uma antena pode ser linear, elíptica ou circular.

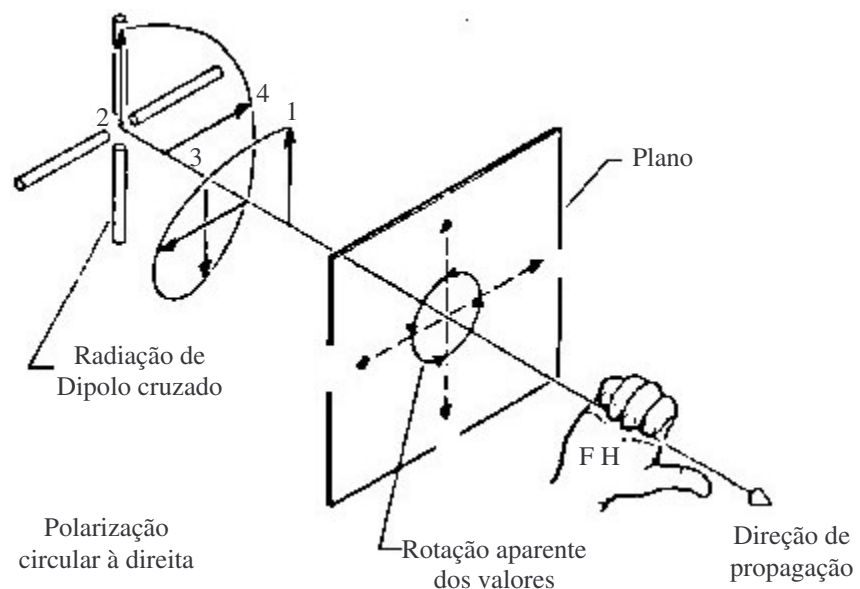
As polarizações mais comuns são denominadas de Vertical e Horizontal e, em última análise, não passam de situações particulares da polarização linear, que pode assumir qualquer ângulo em relação a uma referência, que em geral é a superfície da terra. Também são usadas as polarizações circulares à esquerda e à direita, que são casos particulares da polarização elíptica. A polarização circular pode ser produzida por dois campos ortogonais polarizados linearmente e defasados no tempo de um quarto do período da onda transmitida.

A Figura 8 ilustra os campos polarizados nas três modalidades básicas; linear, elíptica e circular, bem como a orientação da polarização circular (esquerda ou direita utilizando-se a rotação aparente dos vetores):



a) Polarização Vertical

b) Polarização Horizontal



Rotação de campos para polarização circular

c) Polarização Circular

Fig.8 – Polarização de uma antena

A relação de polarização cruzada é definida como sendo a parcela de energia que excita a polarização ortogonal à principal, comparada com esta. Sinais indesejáveis podem entrar no sistema através da polarização ortogonal (ou cruzada), causando os mesmos efeitos dos lóbulos secundários. Por outro lado, polarizações cruzadas entre antenas inviabilizam as transmissões ou recepção de sinais. Isso significa que se a antena transmissora está em polarização Vertical, a receptora também deve estar em polarização Vertical, para otimizar a recepção. Teoricamente, polarizações ortogonais são incompatíveis, ou seja, a antena literalmente não funciona. A resposta de uma antena em polarizações cruzadas ocorre, geralmente, devido às deformidades construtivas da antena. No caso da polarização circular, a polarização cruzada ocorre entre as polarizações direita e esquerda. Antenas circularmente polarizadas podem ser definidas pela sua Razão Axial, que consiste na desigualdade entre os dois eixos da elipse que forma a rotação da polarização. O ideal é a razão axial igual a 1 ou 0dB, o que significa que não há perdas por despolarização no sistema.

II.8. Impedância de Entrada da Antena

A impedância de entrada de uma antena é muito importante para os engenheiros de sistemas, visto que afeta diretamente a transferência de energia do transmissor para a antena. A impedância total da antena não depende somente do elemento irradiante, mas também da impedância mútua entre os elementos que formam a antena, bem como das linhas de transmissão a ela acopladas. Enquanto é possível com relativa facilidade calcular a impedância das linhas de transmissão e componentes de guia de ondas, é muito difícil calcular a impedância característica das antenas em geral, salvo quando a geometria é muito simples.

Matematicamente, a impedância apresentada nos terminais de uma antena pode ser representada por:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = R_A + jX_A \quad (7)$$

A parte resistiva é composta por:

$$R_A = R_r + R_p \quad \text{onde} \quad (8)$$

R_r - Resistência de radiação. Indica a resistência ôhmica que dissiparia a mesma potência irradiada pela antena.

R_p - Resistência de perdas. Indica o componente responsável pela perda de potência que não é irradiada.

Assim, como nos circuitos lineares, passivos, com um único par de terminais para haver a máxima transferência, deve-se obedecer a condição:

$$Z_A = Z_g^*$$

Onde Z_g^* é o complexo conjugado de Z_A . Isso significa que a parte resistiva da impedância interna do gerador que alimenta a antena deve ser igual a parte resistiva da impedância da antena. $R_g = R_A$, e a parte reativa deve ter sinal contrário à parte reativa da impedância da antena. Na prática normalmente a impedância de entrada da antena é medida e o casamento de impedância é feito para se obter a máxima transferência de energia.

II.9. Faixa de Frequências

Todas as antenas são limitadas em sua faixa de frequências de operação. Parâmetros como Diagrama de radiação, Ganho, Níveis de lóbulos secundários, Polarização, Impedância e outros que definem uma antena são afetados pela variação de frequência. Portanto, é fundamental definir sempre a faixa de operação para iniciar um projeto ou avaliar uma antena. Normalmente o parâmetro mais afetado pela faixa de frequência é a impedância da antena, que normalmente define a faixa. Entretanto, existem

situações onde se pode admitir descasamentos de impedância, porém nem sempre os outros parâmetros são mantidos inalterados, inviabilizando assim, o uso em faixas não especificadas.

II.10. Temperatura

Esse parâmetro é muito importante para antenas de recepção, principalmente nas antenas para comunicação por satélite, devido aos fracos sinais recebidos e por estarem apontados para o céu, que apresenta ruído baixo em microondas quando comparado ao ruído gerado pela terra.

Por outro lado, para as antenas transmissoras ou para as receptoras que virtualmente "apontam" para o solo, não se torna necessário avaliar a temperatura de ruído. Quando uma antena é conectada aos terminais de entrada de um receptor, estão disponíveis tanto o sinal quanto o ruído recebido pelo sistema.

Define-se, portanto, como temperatura de ruído de uma antena, como a temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$) em que deveria estar um resistor para fornecer a mesma potência de ruído que a antena está recebendo. Deve-se observar que a temperatura de ruído da antena (T_A) não guarda nenhuma relação direta com sua temperatura física (ambiente).

Como conclusão, tem-se que a temperatura de ruído total é função do diagrama de irradiação e das perdas no que diz respeito à antena. Dessa forma, quanto menos e menores forem os lóbulos que apontam para o solo, menor será a temperatura de ruído total da antena ^[3].

Outra observação interessante é que em parábolas a direção de apontamento também interfere na temperatura de ruído final, ou seja, quanto mais lóbulos apontados para a terra, maior a contribuição do solo.

II.11. Fator de Mérito G/T

A capacidade de um sistema de receber sinais fracos está diretamente ligado ao ganho do sistema. Um ganho alto permite a detecção de sinais fracos. Entretanto, o ruído do sistema define o limite de recepção e sua sensibilidade. Como os ruídos atmosféricos e galácticos são inevitáveis, o sistema deve ser projetado para o mínima temperatura de ruído. Isso é feito utilizando amplificadores de baixíssimo ruído e no que diz respeito a antena, o projeto é feito evitando ao máximo seu acoplamento com a terra, visto que o ruído gerado pelo solo é muito maior que do céu. Somando-se a esse esforço, também as perdas ôhmicas são reduzidas ao máximo.

O parâmetro G/T (Ganho da antena / Temperatura de ruído equivalente do sistema) é o fator de mérito de uma estação de recepção, ou seja, sua capacidade em receber sinais muito fracos.

$$\text{Figura de mérito (dB)} = 10 \log (G/T) \quad (\text{dB/K}) \quad (9)$$

O ganho (G) é o ganho da antena e a temperatura de ruído é a soma das contribuições da antena e do amplificador (LNA ou LNB) que normalmente é instalado junto à antena.

Um exemplo pode ser uma antena Cassegrain de comunicação via satélite com os seguintes parâmetros: $f = 4 \text{ GHz}$; $T_{LNA} = 20\text{K}$; $T_{total} = 60\text{K}$ (20° elevação) (inclusive perdas ôhmicas); $G = 61\text{dBi}$; resulta em $G/T = 42\text{dB/K}$

II.12. Área Efetiva de Radiação

O desempenho de uma antena também pode ser expressa em termos do aproveitamento de sua área física em relação a sua seção transversal ou área efetivamente ativa. Uma antena receptora coleta energia de uma onda plana incidente, e se devidamente casada, transfere essa energia para a carga. A área efetiva de radiação pode ser definida como a área de uma antena ideal a qual absorve a mesma potência de uma onda plana incidente da antena em questão.

De uma maneira mais direta, a área efetiva pode ser expressa como a porção da área física da antena realmente utilizada.

Desse modo pode-se definir agora a eficiência de abertura.

$$\eta_a = \frac{\text{área efetiva da abertura da antena}}{\text{área física da abertura da antena}} \quad (10)$$

A eficiência de abertura pode ser otimizada a ponto de obter-se valores que podem atingir 90% em antenas Cassegrain, porém o mais usual para antenas refletoras é da ordem de 50 a 70%. Em antenas cornetas piramidais a eficiência de abertura pode variar de 50 a 80% dependendo do projeto. Em termos da Diretividade a área efetiva é dada:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D \quad (11)$$

onde λ - comprimento de onda

No caso das antenas de abertura (refletora como as parabólicas) fica relativamente simples visualizar esse parâmetro. Entretanto, o conceito também pode ser aplicado para antenas lineares como dipolo, etc. Por exemplo, a área efetiva de um dipolo de meia-onda é dada por^[4]:

$$A_e \cong 0,13 \lambda^2 \quad (12)$$

A Figura 9 a seguir, ilustra uma corneta imersa em um campo de ondas planas, onde se pode imaginar de forma intuitiva que uma parcela da energia é efetivamente aproveitada.

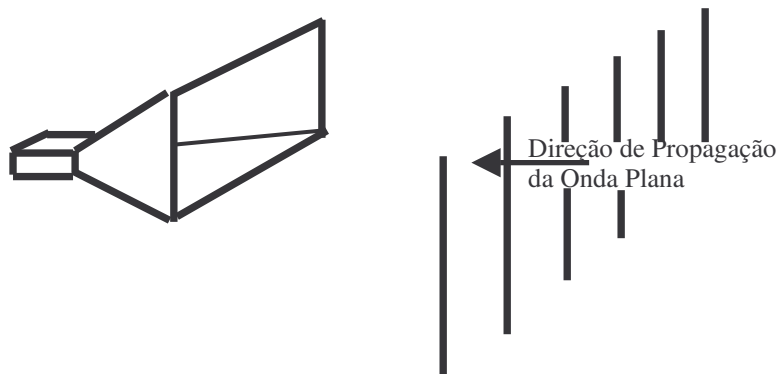


Fig.9 - Onda plana incidente sobre uma corneta

III. Espalhamento Espectral

III.1. Conceitos gerais

A tecnologia de Espalhamento Espectral é hoje um dos processos mais utilizados para interligação de sistemas sem fio com confiabilidade e sigilo^[5]. A principal razão disso é a sua capacidade de codificação inerente, que faz com que seja muito difícil a interpretação ou interceptação dos sinais emitidos por unidades não autorizadas. Por outro lado, devido à sua própria natureza, os canais de rádio que operam em Espalhamento Espectral conseguem funcionar adequadamente em ambientes agressivos, do ponto de vista eletromagnético, onde os sistemas com modulação tradicional tendem a falhar^{[6][7]}. Este é, por exemplo, o caso de ambientes industriais, saturados por interferências causadas pelo funcionamento de máquinas e sistemas de comunicações mal dimensionados.

A tecnologia de Espalhamento Espectral, como todas as grandes inovações é, no seu âmago, muito simples^{[8][9]}:

- O primeiro passo do processo é codificar a informação de modo que ela tenha formato de ruído, transmiti-la e, no ponto de recepção, recuperá-la sem erro.

Nos sistemas convencionais de modulação ocorre uma tentativa de maximizar a concentração de energia para uma dada mensagem. O sistema de Espalhamento Espectral toma a direção oposta, espalhando o sinal por uma faixa muito maior que a faixa de frequência original da mensagem. Ou seja, o

espectro de frequência do sinal codificado é muito maior que o espectro de sinal da informação (ver Figura 10).

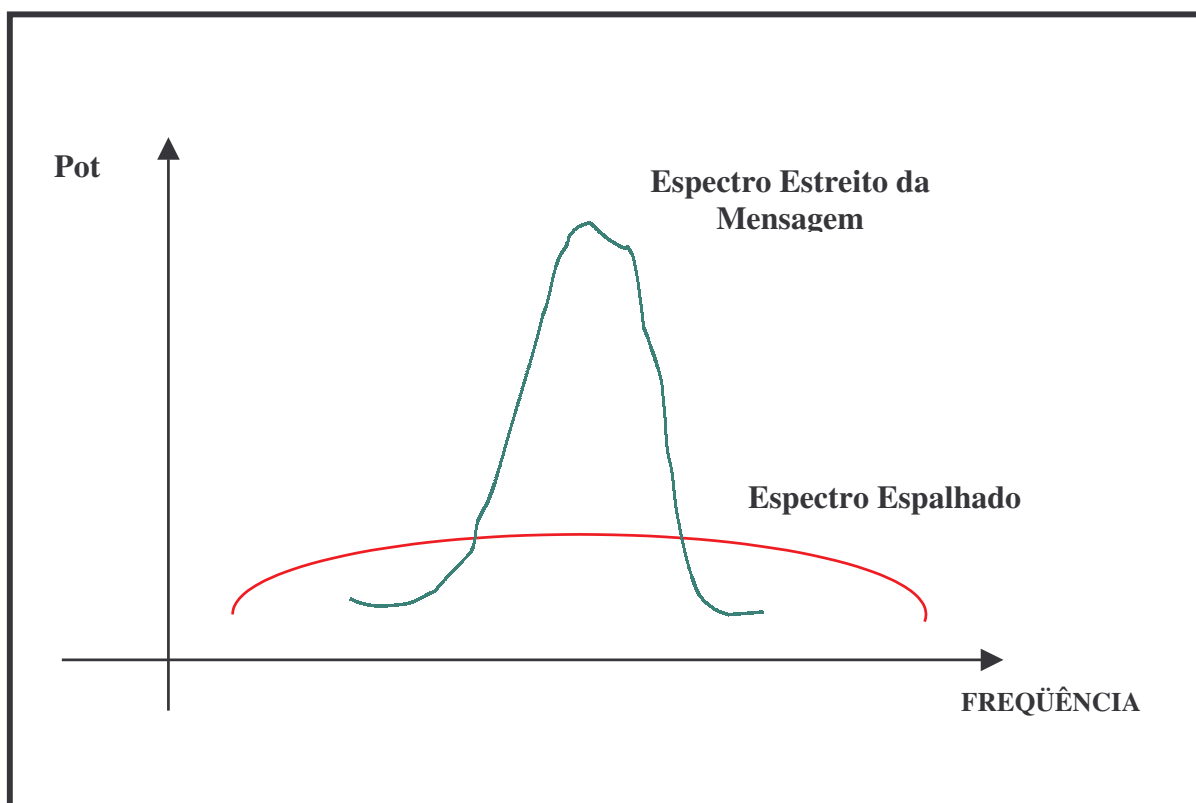


Fig.10 - Relação entre o espectro da mensagem e o espectro espalhado

Por outro lado, como o sistema distribui a energia em uma grande faixa de frequências, a relação sinal/ruído na entrada do receptor é baixa, chegando mesmo, em alguns casos, abaixo do nível de ruído dos receptores convencionais e, portanto, tornando-se invisível para os mesmos. No receptor do sistema de Espalhamento Espectral o processo recíproco ao espalhamento é realizado, restaurando o nível adequado das mensagens. Define-se como parâmetro de comparação à grandeza Ganho de Processamento, que indica a melhoria da relação sinal/ruído que o sistema é capaz de obter sobre um sistema que não utiliza Espalhamento Espectral.

Existem dois processos principais para a codificação da informação e geração do Espalhamento Espectral:

O primeiro é chamado de "Salto de Frequência" (Frequency Hopping - FH) e o segundo é a "Seqüência Direta" (Direct Sequence - DS). No FH a informação simplesmente "pula" de um canal de frequência para outro, de forma codificada no tempo. Nesse caso, o receptor só poderá encontrar o sinal nos vários canais, se ele souber onde sintonizar, ou seja, se souber previamente as posições de frequência onde o transmissor vai "pular". Se algumas frequências estiverem sofrendo interferência por sinais espúrios, a informação ainda pode ser recuperada pelo processamento dos outros canais da seqüência dos "pulos".

O código FH, que determina a seqüência de "pulos de frequência", é gerado por um circuito chamado gerador de pulsos Pseudo-Aleatórios. O mesmo código deve ser usado no transmissor e no receptor, de modo que os dois saibam a próxima frequência a ser usada. O gerador de código deve ser síncrono no transmissor e receptor, o que é obtido por um sinal piloto de sincronização.

Geradores de código Pseudo-Aleatórios (também chamados de códigos "Pseudo-Noise" ou PN) produzem códigos com aproximadamente o mesmo número de "zeros" e "uns", e seqüência definida. Após um dado número de bits, chamado de comprimento de código, eles se repetem. Códigos que são completamente aleatórios, e não se repetem, não podem ser realizados e não são distinguíveis do ruído.

Nos sistemas comerciais, atualmente disponíveis, a eficiência dos sistemas FH baseia-se mais em evitar a interferência do que na supressão da mesma. O FCC Americano, e a legislação em outros

países, inclusive o Brasil prevê ainda que, o número mínimo de canais para os "pulos" de frequência seja de 50 na faixa de 902 - 928 MHz (máxima largura de banda a 20 dB no canal de salto é 500 KHz) e 75 nas outras duas bandas. O tempo médio de ocupação de qualquer frequência não deve ser maior que 0,4 segundos, dentro de um período de 30 segundos^[10].

O Ganho de Processamento para o FH é uma função direta do número de canais de saltos nos quais está sendo espalhada a informação transmitida.

Na técnica de seqüência direta (DS) a codificação em Espalhamento Espectral é implementada pela mistura da informação com um sinal de código de alta taxa de bits. A saída do modulador conterá, portanto, a informação espalhada pelo sinal codificador.

Os tipos de modulações geralmente utilizados na DS são o chaveamento binário por deslocamento de fase (BPSK), ou o chaveamento por quadratura de fase (QPSK). O sinal codificador para a DS é gerado por um circuito similar ao FH, com a diferença que o fator de Espalhamento Espectral obtido na DS (Ganho de Processamento) é a razão entre a taxa do código Br (conhecido como "chip rate") e a taxa de bits da informação R_c .

O sinal DS é recuperado no receptor por uma modulação complementar usando um código similar ao do transmissor, e sincronizado com o mesmo.

Um sistema Ds bem projetado pode rejeitar interferências por uma quantidade relacionada ao valor do Ganho de Processamento.

Potenciais sinais interferentes que chegarem ao receptor são "espalhados" em frequência pelo mesmo processo que recupera o sinal desejado. Desse modo, o receptor consegue recuperar a informação mesmo na presença de sinais interferentes de faixa estreita, e com densidades de potências muito maiores que a do sinal desejado.

Nos dois casos, FH e DS, a recepção é impossível para receptores que não conhecem o código do transmissor.

Adicionalmente, uma das características dos códigos Pseudo-Aleatórios usados é a propriedade de ortogonalidade: múltiplos transmissores e receptores podem ocupar a mesma porção do espectro utilizando códigos diferentes, até que o limite da relação Portadora/Interferência (P/I) dos receptores seja atingido. Este é o princípio dos sistemas CDMA (Code Division Multiple Access). Uma variação dessa tecnologia é, por exemplo, utilizado no sistema GPS, onde todos os satélites da constelação transmitem na mesma faixa de frequências (os sinais espalhados das mensagens são transmitidos aos usuários em duas portadoras: L1 de 1575.42 MHz e L2 de 1227.6 MHz) e o nível do sinal que chega à Terra está perto do nível de ruído. A codificação inerente do sistema (códigos PN) é que permite "arrancar" o sinal de dentro do ruído.

A Figura 11, a seguir, apresenta de forma gráfica o comportamento dos sistemas FH e DS.

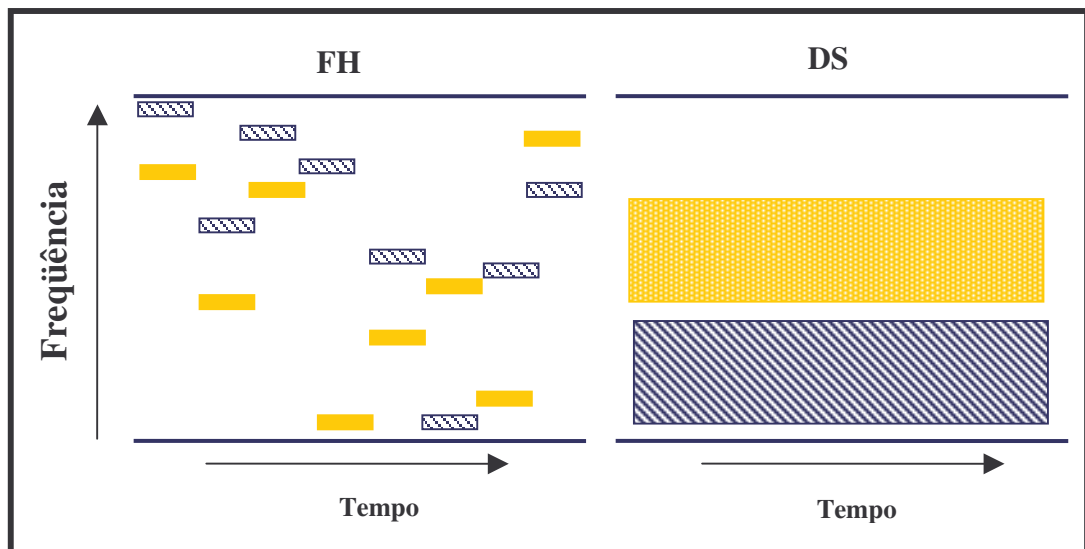


Fig.11 – FH e DS para dois canais

Existe ainda um terceiro tipo de Espalhamento Espectral, chamado CHIRP, que é muito utilizado em sistemas de radares [12]. Nesse caso não é utilizada uma seqüência Pseudo-Aleatória para controlar o espectro de saída. Em vez disso, o sinal CHIRP é gerado fazendo com que a portadora seja variada dentro de uma certa faixa de frequência de forma linear (ou de outra maneira conhecida), dentro da duração de um período fixo de pulso do radar.

A idéia por trás dos sistemas CHIRP é que o receptor pode usar um filtro casado, de projeto relativamente simples, para receber a portadora dispersada no tempo, de forma a criar um somatório coerente e, assim, prover uma melhora na relação sinal / ruído do sistema.

Essa tecnologia é usada em sistemas de radares para solucionar o conflito técnico entre alcance e precisão de resolução de alvos, ou seja, no sistema tradicional de radar o alcance está diretamente relacionado com energia do pulso, que é calculada pelo produto da potência de pico vezes a largura do pulso. Contudo, a resolução de alvos é cada vez melhor quanto menor for a largura do pulso. Esses dois parâmetros, conflitantes com relação à largura do pulso, são otimizados fazendo-se o pulso longo na transmissão, através de uma expansão codificada, e comprimindo-o na recepção, de tal modo que sua largura final atenda aos requisitos de resolução exigidos pelo sistema.

No Brasil existe uma legislação específica para regular os sistemas de Espalhamento Espectral. Esse conjunto de regras foi inicialmente definido na Norma 002/93, aprovada pela Portaria 046 do Ministério das Comunicações de 28 de janeiro de 1993, modificado pela Portaria 814 de 12 de julho de 1996, e atualmente definido pelo Anexo à Resolução 365 da Anatel, emitido em 10/05/2004 [10]. É importante salientar que aqui no Brasil, como em vários outros países, a operação do sistema por Espalhamento Espectral não necessita de licença governamental para instalação e operação, desde que as regras e requisitos da Resolução 365 sejam obedecidos.

As faixas de frequências estabelecidas no Brasil e nos Estados Unidos, para operação com Espalhamento Espectral, estão definidas na Tabela II, a seguir:

Tabela II - Faixa de Frequências para operação com Espalhamento Espectral no Brasil

Frequências	Faixa
902 - 907,5 MHz 915 - 928 MHz	18,5 MHz
2400 - 2483,5 MHz	83,5 MHz
5725 - 5850 MHz	125 MHz

O Anexo à Resolução 305 da Anatel especifica, além das faixas descritas na Tabela II-1, os máximos níveis de potência que podem ser utilizados. Nas faixas de 902MHz a 928 MHz e 2400MHz a 2483,5 MHz a potência máxima permitida do transmissor é de 1W e a EIRP (Potência Efetiva Irradiada Isotropicamente) nos sistemas ponto-multiponto é limitado em 4W (6dBW ou 36dBm), Para cidades com mais de 500.000 habitantes, e na faixa de 2400 MHz a 2483,5 MHz a EIRP máxima é de 400 mW.

A EIRP é dada por :

$$EIRP = P_T (dBm) - L_T (dB) + G_T (dBi) \quad (13)$$

Onde P_T = Potencia da transmissor em dBm

L_T = Perdas nos cabos entre o transmissor e a antena em dB

G_T = Ganho da antena transmissora em dBi

Portanto, para EIRP de 36 dBm e $P_T = 30$ dBm (1W) o Ganho máximo da antena de transmissão fica limitado em 6dBi para perdas $L_T=0$ dB. Para operação em enlaces ponto a ponto, pode-se aumentar o ganho da antena de 3dB acima de 3dBi, para cada diminuição de 1dB na potência de 1W do transmissor.

Nas aplicações ponto a ponto e na banda de 5725 MHz a 5850 MHz, de acordo com o Anexo à Resolução 365, pode-se utilizar antenas com ganho superior a 6dBi sem a necessidade de redução da potência de 1 W do transmissor.

É importante observar aqui que a limitação de EIRP em 400 mW (24 dBm), em sistemas na faixa de 2400 MHz a 2483,5 MHz em cidades com mais de 500.000 habitantes, causa grandes limitações de alcance para os sistemas “wireless”, o que exige grande número de bases repetidoras para cobrir determinada área, quando comparada com o valor de EIRP = 36 dBm.

Para distâncias menores que 10 km entre os pontos do enlace, a curvatura da Terra pode ser desprezada e os enlaces de radio podem ser considerados sobre uma superfície plana. Nessas condições o nível de sinal recebido é obtido pela equação de Friis:

$$P_R(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) - L_T + G_T + G_R - L_R - A \quad (14)$$

Onde :

$P_R(\text{dBm})$	-	potência do sinal recebido em dBm
$L_T(\text{dB})$	-	perdas entre o transmissor e a antena
$G_T(\text{dBi})$	-	ganho da antena transmissora em relação à antena isotrópica
$G_R(\text{dBi})$	-	ganho da antena receptora em relação à antena isotrópica
$L_R(\text{dB})$	-	perdas entre o receptor e a antena

A = Perda no espaço entre o transmissor e o receptor, calculada por:

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10n \log R \quad (15)$$

Onde :

log	-	logaritmo na base 10
R	-	distância em metros entre o transmissor e o receptor
λ	-	comprimento de onda de operação
n	-	fator que depende do ambiente

O valor de “n” na expressão anterior depende das condições de propagação no meio entre os pontos de transmissão e recepção. No caso do espaço livre de obstáculos entre o transmissor e o receptor, o valor de n é igual a 2 e “A” assume o valor de

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (16)$$

É importante notar que o valor de atenuação A, dado pelas Equações 15 e 16, não leva em conta perdas dissipativas do meio, as quais, se existirem, devem ser adicionadas as perdas totais do enlace. Deve ser também enfatizado que, embora esse modelo de atenuação seja amplamente aceito e utilizado, ele é só uma aproximação e, no melhor dos casos, fornece apenas uma atenuação média. Além do mais ele deve ser considerado como de faixa estreita e não necessariamente prevê as atenuações de todas as frequências contidas em um sinal por Espalhamento Espectral de faixa larga.

Em ambientes considerados interiores, como armazéns, prédios, etc., o valor de n pode variar entre 2 e 3,5. Nesses casos o valor a ser adotado é determinado empiricamente, e depende da frequência de operação.

No caso da espaço livre considera-se como condição ideal de transmissão que a região entre a antena transmissora e a receptora esteja livre de obstáculos em um volume definido pelo chamado Elipsóide de Fresnel, mostrado de forma esquemática na Figura 12.

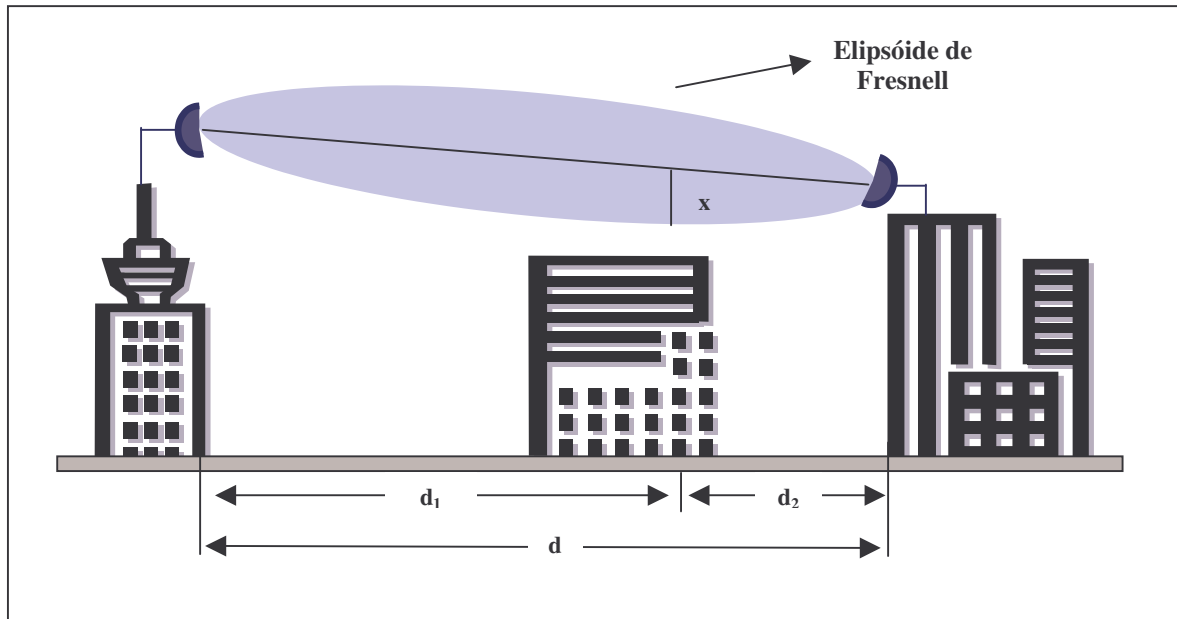


Fig.12 – Elipsóide de Fresnel em comunicações de rádio

O raio (x) do elipsóide de Fresnel, de acordo com a distância d_1 (de um ponto qualquer na linha de visada ao transmissor) e de d_2 (do mesmo ponto ao receptor), e em função do comprimento de onda do sinal transmitido, pode ser calculado por^[13]:

$$x = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}} \quad (17)$$

As condições de visibilidade e liberação do elipsóide de Fresnel devem ser verificadas detalhadamente antes da instalação dos enlaces de rádio. Essa fase preliminar do projeto é chamada de “site survey” e não deve ser ignorada, pois de suas conclusões é que serão definidos pontos importantes para avaliação de investimentos, como por exemplo, o uso de torres .

IV. Conclusão

Neste artigo procurou-se dar uma visão geral dos princípios de antenas, propagação, e da tecnologia de Espalhamento Espectral que são utilizados nas operações de Internet sem fio via rádio. Salientou-se a necessidade de experiência técnica para o cálculo dos enlaces, e definição dos equipamentos. O uso dos sistemas de radio por Espalhamento Espectral para prover Internet sem fio é hoje , sem dúvida, uma forma eficaz de cobrir uma grande área de assinantes de forma rápida. O preço dos equipamentos caiu, ao longo do tempo, de forma vertiginosa, permitindo o uso em grande escala. A possibilidade do uso das bandas pré-licenciadas é outro fator de incentivo para esses serviços. Contudo o provedor deve ficar atento à legislação no que concerne à potência máxima de utilização, principalmente na faixa de 2400 MHz a 2483,5 MHz em cidades com mais de 500.000 habitantes. É muito importante também lembrar que para a exploração do serviço com assinantes pagos o provedor deve ter a licença SCM (Sistemas de Comunicação Multimídia) da Anatel.

A avaliação técnica dos enlaces deve sempre ser feita para garantir uma taxa mínima de comunicação entre os usuários e o provedor, de modo a manter a qualidade do serviço.

V. Referências

1. Kraus, J.D.; Carver, K.R.; "Eletromagnetismo", 2ª edição, Guanabara 2, 1978, RJ.
2. Aranha, H.; Fleming, W.J.; Curso de Antenas : Teoria e Aplicações, INPE, São Jose dos Campos, SP, Set/2004.
3. Fleming, W.J, Soldá, E.; "Temperatura de Ruído de Antenas", Revista de Engenharia de Televisão-SET, Fevereiro de 1995, Número 24, São Paulo, SP.
4. Esteves, L.C.;" Antenas , teoria básica e aplicações" Mcgraw-Hill, 1980, São Paulo, SP.
5. Fleming, W.J.;" Espalhamento Espectral: Conceitos Básicos e Características do Sistema, Revista de Engenharia de Televisão-SET, Março-Abril 2001 e Maio-Junho de 2001, Números 55 e 56, São Paulo-SP.
6. Fleming, W.J.; "Projeto de Cobertura para Implantação do Sistema de Comunicação de Dados Via Rádio CKD-GM", Nota de Aplicação Beta Telecom, BT.513/96-603, Beta Telecom, SJCampos, SP, Mai/96.
7. Nishinaga, E.; et al; "Wireless Advanced Automatic Train Control", Reprinted from Proceedings of the 1994 ASME /IEEE Joint Railroad Conference, 13-28, May/94.
8. Schumacher D. M.; "Understand the Basics of Spread Spectrum Communications", Microwaves & RF, 149-159, May/93.
9. Dixon R. C.; "Spread Spectrum Systems", Second Edition, New York, Wiley & Sons, 1975.
10. Anatel, " Regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita " Anexo a Resolução 365, 10 de Maio de 2004, Brasília, DF.
11. Utlaut, William F.; "Spread Spectrum 'Principles and Possible Application to Spectrum Utilization and Allocation", ITU Telecom Journal, Vol. 45, 20-32, Jan/78, reprint from IEEE Communications Society Magazine, Vol.16, nº 5, 21-31, Sep/78.
12. Dixon, R.C.; "Why Spread Spectrum?", Reprint from IEEE Communication Society Magazine, vol.13, 21-25, Jul/75.
13. Fleming, W.J., Aranha, H.;" Curso de radioenlaces", BT.1874/01, CPqD, Set/2001, Campinas, SP.
14. Fleming, W.J.; Galvão, B.S.M.C.;" Projetos de Alta frequência e Antenas Auxiliados por Microcomputadores", Mcgraw-Hill, 1987, São Paulo - SP

Currículo dos autores

Eng. Wilton Fleming, Msc

1982 - Mestre em Eletrônica e Telecomunicações pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) - São José dos Campos - SP

1977 - Engenheiro Eletrônico pela Escola de Engenharia de São José dos Campos - São José dos Campos - SP

1972 - Técnico em Eletrônica pela Escola de Eletrônica (ETE) de Santa Rita de Sapucaí – MG

Projetista e líder de grupos de pesquisa e desenvolvimento em empresas atuantes nas áreas de Microondas, Radar, Antenas e dispositivos de RF.

Autor do livro “Projetos de Alta Freqüência e Antenas Auxiliados por Micro computadores”, editado pela McGraw-Hill - São Paulo - SP

Autor de vários artigos técnicos em revistas e simpósios especializados na área de telecomunicações e microondas.

Vários cursos de treinamento no exterior.

Eng. Helcio Aranha

1980 - Engenheiro Eletrônico pela Escola de Engenharia de São José dos Campos - SP

1975 - Técnico em Eletrônica pela Escola de Eletrônica (ETE) de Santa Rita do Sapucaí – MG

Projetista e líder de grupos de pesquisa e desenvolvimento em empresas atuantes nas áreas de Microondas, Radar, Antenas e dispositivos de RF.

Autor de vários artigos técnicos, em revistas dentro da especialidade, bem como de apostilas dedicadas aos cursos ministrados, para várias empresas.

Cursos de especialização no exterior nas áreas de TV a cabo, Tecnologia de montagem de superfície, Amplificadores de Microondas de alta potência (TWTA), Sistemas ópticos em CATV, etc.