

# 34

# NOÇÕES SOBRE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO, PROPAGAÇÃO E RECEPÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E ACÚSTICAS

## 34.1 NAVEGAÇÃO ELETRÔNICA

### a. DEFINIÇÃO. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO

Em sua definição mais rigorosa, a expressão **Navegação Eletrônica** refere-se a todos os usos da eletrônica na navegação. Assim, o termo inclui, por exemplo, o emprego da Agulha Giroscópica para o governo do navio e a utilização do Ecobatímetro na navegação costeira ou em águas restritas. Entretanto, na prática, a expressão **Navegação Eletrônica** aplica-se quando os dois propósitos básicos da navegação (determinação da posição e controle dos movimentos do navio) são efetuados usando meios eletrônicos. Então, pode-se definir **Navegação Eletrônica** como aquela que envolve o emprego de equipamentos e sistemas eletrônicos para determinação da posição e controle dos movimentos do navio.

A expressão Navegação Eletrônica é mais abrangente que o termo Radionavegação, que se limita aos equipamentos eletrônicos de navegação que usam ondas de radiofrequência. Assim, por exemplo, o sonar doppler e o sistema de navegação inercial são recursos de Navegação Eletrônica, mas não são de Radionavegação.

Os instrumentos e equipamentos eletrônicos, apesar de todos os avanços e dos desenvolvimentos recentes, em termos de confiabilidade, precisão e área de cobertura, ainda são tradicionalmente denominados de **auxílios eletrônicos à navegação**, para denotar que constituem recursos complementares aos métodos clássicos de navegação. Embora sistemas eletrônicos, como o GPS (“Global Positioning System”), sejam capazes de

prover cobertura mundial permanente, com grande precisão de posicionamento e confiabilidade, o navegante não deve esquecer que a sua utilização depende do perfeito funcionamento de instrumentos delicadíssimos, sobre os quais não exerce qualquer tipo de controle, e que a interpretação das informações fornecidas requer o conhecimento de conceitos tradicionais de navegação e depende da experiência do operador. Em suma, não se pode confiar cegamente na “push-button navigation”, sob pena de colocar em risco a segurança do navio e da tripulação. Por esta razão, recomenda-se:

1. Somente conduzir a navegação exclusivamente por métodos eletrônicos naquelas circunstâncias em que não seja possível a sua verificação pelos métodos convencionais, em virtude de má visibilidade, ausência de astros para observação, inexistência de auxílios visuais à navegação ou pontos notáveis, etc.; se essa situação ocorrer, recordar sempre que uma deficiência instrumental, um erro de interpretação, ou, ainda, anomalias na propagação das ondas eletromagnéticas, ou acústicas, podem levar a resultados errados e situações perigosas;

2. aproveitar todas as ocasiões para verificar o desempenho dos sistemas eletrônicos, por comparação com os métodos clássicos de navegação, a fim de poder formar um juízo de valor sobre sua confiabilidade, precisão e cobertura; e

3. providenciar para que os equipamentos sejam submetidos às rotinas de manutenção recomendadas, conhecer completamente os procedimentos para operação dos instrumentos e sistemas, suas possibilidades e limitações, além de verificar o seu funcionamento, antes de o navio suspender.

Quando estudamos os métodos clássicos de navegação, verificamos que a posição do navio é obtida utilizando o conceito de **linha de posição (LDP)**, definida como o lugar geométrico de todas as posições possíveis de serem ocupadas pelo navio, tendo sido efetuada uma determinada observação, em um dado instante. A posição, como se sabe, estará na interseção de duas ou mais LDP. Ademais, vimos que as LDP podem ser obtidas por métodos visuais (reta de marcação, alinhamento, distância pelo ângulo vertical, segmento capaz, etc.) ou astronômicos (reta de posição astronômica).

A Navegação Eletrônica também utiliza o conceito de linha de posição para determinação da posição do navio. As LDP eletrônicas são obtidas por três métodos básicos:

- método direcional;
- método de medição de distâncias, ou diferença de distâncias; e
- método composto direcional-distâncias.

O método direcional consiste na determinação de uma reta de marcação eletrônica (ângulo entre uma direção de referência e a linha que une o navio ao objeto/estação). Como exemplos de equipamentos de Navegação Eletrônica que empregam o método direcional na determinação da LDP, citam-se o Radiogoniômetro e o Consol, além do Radar, quando usado na obtenção de marcações.

O método de medição de distâncias, ou diferença de distâncias, consiste na determinação de uma circunferência de igual distância, ou de uma hipérbole de posição (lugar geométrico de pontos que têm a mesma diferença de distâncias a dois pontos fixos). No primeiro caso (método de medição de distâncias), citam-se o Sistema GPS e o Radar, quando usado na obtenção de distâncias. O método de medição de diferença de distâncias é utilizado pelos sistemas de navegação hiperbólica (Loran-C, Decca e Omega). Mesmo os equipamentos GPS, Loran-C e Omega que incorporam computadores, os quais já fornecem

diretamente as coordenadas da posição (Latitude e Longitude), utilizam para os seus cálculos LDP eletrônicas determinadas pelos métodos citados.

O método composto direcional-distâncias é empregado pelo Radar, quando determinam-se posições por marcações e distâncias radar, conforme estudado no Volume I, Capítulo 14.

Os equipamentos de navegação inercial utilizam um método próprio, baseado nos princípios da Navegação Estimada, determinando a posição do navio através dos rumos e distâncias navegadas, medidos com grande precisão, a partir de uma posição inicial conhecida.

É comum, também, denominar de **Sistema de Navegação Eletrônica** o conjunto de instrumentos, equipamentos e dispositivos, em terra e a bordo, que possibilitam a obtenção de uma LDP eletrônica, ou de um ponto completo (Latitude e Longitude). O radar e os equipamentos de navegação inercial e doppler constituem, por si só, um sistema, pois são “self contained”, isto é, com eles podemos determinar a posição do navio sem auxílio de dispositivos baseados em terra, ou no espaço.

## b. PRECISÃO, PREVISIBILIDADE E REPETITIBILIDADE

Uma das primeiras perguntas formuladas acerca dos sistemas de Navegação Eletrônica refere-se à precisão (acurácia)<sup>1</sup> com que determinam as posições do navio. De interesse primordial para o navegante é a precisão ou acurácia absoluta, isto é, a exatidão da posição obtida, com respeito à Terra e seu sistema de coordenadas (Latitude e Longitude). Outros conceitos relacionados à precisão são os de previsibilidade, repetitibilidade e precisão relacional, adiante explicados.

Quando comentarmos a precisão dos sistemas de Navegação Eletrônica estudados nos capítulos que se seguem, estaremos nos referindo à acurácia absoluta dos mesmos, exceto quando especificamente indicado de outro modo.

Esta precisão pode ser medida de uma série de maneiras. O **erro médio quadrático** (RMS – “root mean square”) é a medida estatística da variabilidade de uma única LDP; este valor unidimensional tem pouca utilidade no caso de posições que resultam de várias LDP. Mais conveniente é o conceito de **erro circular provável** (CEP – “circular error probable”), que é o raio de um círculo no interior do qual existe 50% de probabilidade das posições determinadas estarem localizadas.

No entanto, quando a interseção das LDP resulta em uma elipse, em vez de um círculo, utiliza-se o termo **erro radial** (dRMS – “distance root mean square”) para definir a precisão da posição. O **erro radial** (dRMS) significa que uma posição determinada terá cerca de 67% de probabilidade de ter um erro igual ou menor que o seu valor. Quando se usa 2 dRMS (ou seja, duas vezes o desvio padrão anterior), esta probabilidade cresce para 95% a 98%.

A **previsibilidade** de um sistema de Navegação Eletrônica consiste no conhecimento das características de propagação do sinal sob determinadas condições atmosféricas. A **previsibilidade** é influenciada, principalmente, pela refração atmosférica e pela condutividade da superfície de propagação. Sabe-se, por exemplo, que o sinal de

<sup>1</sup> Embora o termo técnico-científico mais correto para definir o grau de exatidão de uma medida seja **acurácia**, este Manual utilizará a palavra **precisão** com o mesmo significado, em virtude desta ser de uso mais comum, já consagrado na navegação.

radiogoniometria perde alcance e pode induzir erros na marcação radiogoniométrica quando se propaga sobre terra ou sobre água doce. Além disso, é também afetado pelas condições ionosféricas durante a noite (efeito noturno). O sinal Omega, por outro lado, é afetado pela calota polar, quando se propaga em Latitudes elevadas. Ademais, as hipérbolas de posição traçadas nas Cartas Omega correspondem a condições padrão de propagação. Quando as condições reais diferem consideravelmente dos padrões, as leituras do receptor Omega necessitam ser corrigidas, antes do traçado das LDP na carta.

O segundo conceito, denominado **repetibilidade** refere-se à capacidade de um sistema de indicar as mesmas medidas, sempre que se estiver na mesma posição, ou seja, está relacionado à capacidade de retornar exatamente a uma determinada posição, em uma ocasião posterior, orientado pelas coordenadas lidas anteriormente no sistema, quando na mesma posição. Isto é importante, por exemplo, para embarcações de pesca ou de pesquisa científica.

Além desses, é relevante o conceito de **precisão relacional**, que consiste na exatidão de uma posição, com respeito a outra posição determinada pelo mesmo sistema.

## 34.2 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E ACÚSTICAS

Os sensores e sistemas de **Navegação Eletrônica** têm que operar em diferentes meios, entre os quais estão o espaço, a atmosfera e as águas dos mares, oceanos e rios. Na execução da **Navegação Eletrônica** e em outras atividades relacionadas à navegação, como a recepção de informações meteorológicas e de Avisos aos Navegantes, dados devem ser transmitidos através de um ou mais desses meios. Basicamente, existem duas maneiras de se conseguir isso: pelo uso das **ondas eletromagnéticas** ou das **ondas acústicas**. O primeiro caso inclui a radionavegação, o radar e as comunicações. As ondas acústicas compreendem o emprego do som, ou das ondas sonoras e ultra-sonoras, na navegação.

No espaço, ou no vácuo, apenas as ondas eletromagnéticas podem se propagar entre dois pontos. Na atmosfera, tanto as ondas eletromagnéticas como as acústicas podem se propagar, embora as primeiras o façam com maiores vantagens. Essas vantagens fazem com que as ondas eletromagnéticas dominem completamente o panorama dos sistemas de navegação para uso na atmosfera e no espaço. No oceano, a situação se inverte, e as ondas acústicas dominam os sistemas desenvolvidos para atuar neste meio.

A **Navegação Eletrônica**, por se desenvolver tanto na atmosfera como nos mares e oceanos, exige compreensão da natureza das ondas eletromagnéticas e acústicas e das suas implicações sobre a capacidade de um navegante obter as informações que necessita para a condução segura do navio ou embarcação.

As ondas representam, em ambos os casos, o mecanismo segundo o qual a propagação se efetua, existindo, portanto, várias semelhanças entre os processos. Entretanto, os fenômenos físicos responsáveis pela geração de cada um dos tipos de onda diferem fundamentalmente. É importante que se tenha uma razoável noção dessas diferenças e semelhanças. Os itens que se seguem buscam apresentar uma resenha dos conceitos básicos referentes às ondas eletromagnéticas e acústicas, abordadas separadamente.

## 34.3 TEORIA BÁSICA DA ONDA ELETROMAGNÉTICA

Para entender os princípios em que se baseia a Radionavegação, o navegante deverá compreender a forma em que se geram as ondas eletromagnéticas e as principais características de sua propagação.

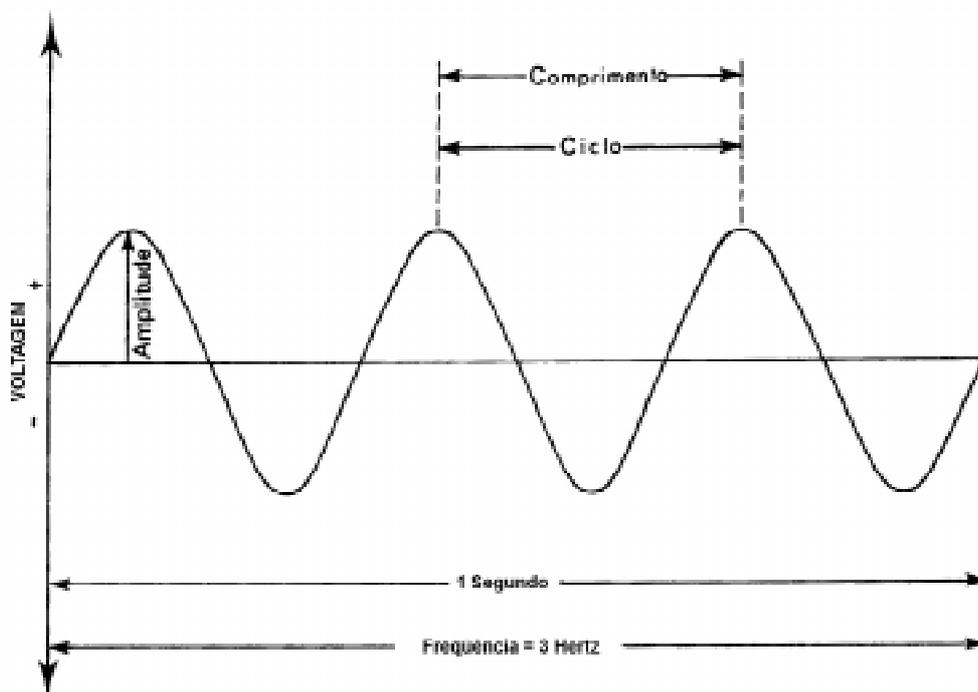
### a. GERAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Os fenômenos nos quais intervêm tanto a corrente elétrica como o campo magnético, são denominados de fenômenos eletromagnéticos. São três os fenômenos eletromagnéticos básicos:

1. Se uma corrente elétrica fluir por um condutor será criado, ao redor do mesmo, um campo magnético (o condutor produzirá um campo magnético, como se fosse um ímã);
2. se um condutor percorrido por uma corrente elétrica for colocado dentro de um campo magnético, ficará sujeito a uma força; e
3. se um condutor fechado for colocado em um campo magnético, de modo que a superfície determinada pelo condutor seja atravessada pelo fluxo magnético, a variação do fluxo induzirá no condutor uma corrente elétrica.

A teoria básica da corrente alternada estabelece que um campo variável, que resulta do fluxo de uma corrente alternada em um circuito, induz uma voltagem em um condutor colocado dentro do campo. Na realidade, a voltagem é induzida ainda que não haja condutor no campo. Esta voltagem induzida no espaço, com a forma mostrada na figura 34.1, é, de fato, um campo elétrico. Desta forma, um campo magnético cria no espaço um campo elétrico variável. Este campo elétrico, por sua vez, produz uma corrente

**Figura 34.1 - Campo Elétrico Variável (Curva Representativa da Geração de Corrente Alternada)**



de deslocamento que gera um campo magnético, o qual, por seu turno, cria um campo elétrico, e assim por diante. O processo mediante o qual estes campos se induzem mutuamente denomina-se **indução eletromagnética**. A combinação de campos é denominada **campo eletromagnético**.

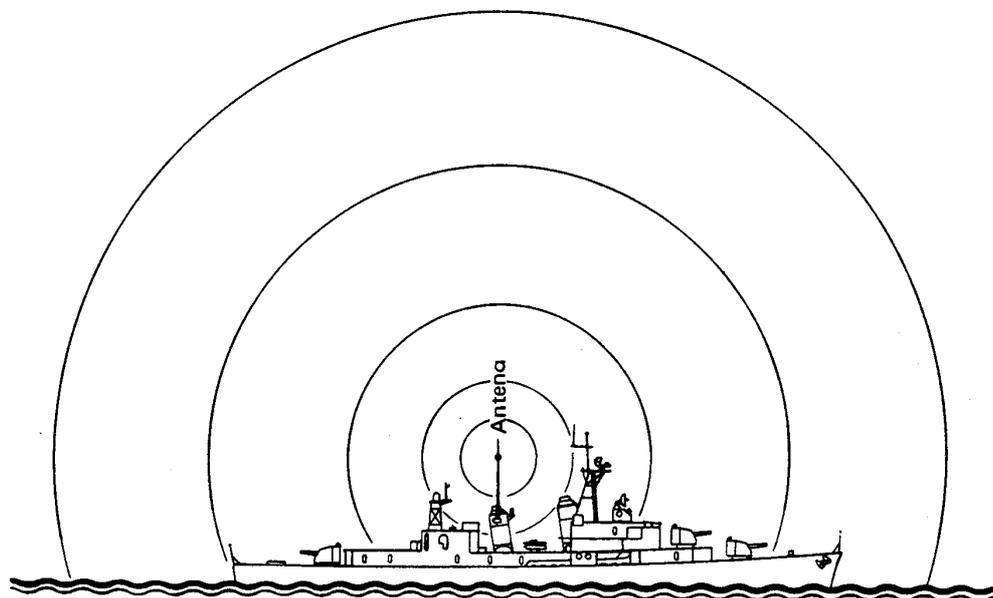
Em um campo de irradiação eletromagnética, as linhas do campo elétrico se fecham sobre si mesmas, não estando unidas a cargas elétricas; e as linhas do campo magnético não estão relacionadas à corrente em um condutor. Os campos são verdadeiramente independentes, como se houvessem sido liberados no espaço. Há, portanto, uma idéia de movimento no processo, sendo esta propagação denominada **onda eletromagnética**.

Toda a teoria sobre esta matéria foi desenvolvida há mais de 100 anos por J. C. Maxwell, que correlacionou uma série de quatro equações parcialmente diferenciadas, que descrevem a interação das componentes elétricas e magnéticas do **campo eletromagnético** e sua relação com a voltagem e corrente elétrica. Estas equações proporcionam a base teórica do eletromagnetismo e com seu emprego podem ser resolvidos os problemas de campos eletromagnéticos e de irradiação. São elas: a Lei de Ampère para circuitos, o Teorema de Gauss para campos elétricos, o Teorema de Gauss para campos magnéticos e a Lei de Faraday sobre a força eletromotriz. A teoria de Maxwell facilita o cálculo da propagação eletromagnética.

Para produção das ondas eletromagnéticas utilizadas em **Navegação Eletrônica**, onde as frequências são elevadas, usa-se um circuito eletrônico denominado **circuito oscilador**, ou, simplesmente, **oscilador**. Assim, pode-se dizer que uma **onda eletromagnética** é produzida pelas rápidas expansões e contrações de um campo magnético que, por sua vez, é gerado pela energização e desenergização de um circuito eletrônico especialmente projetado, denominado **oscilador**. Um **amplificador** é, geralmente, usado para fortalecer a potência de saída do **oscilador** e uma **antena** para formar a onda de saída e irradiar a onda eletromagnética no espaço.

Na prática, exceto no caso de ondas de rádio de frequências muito elevadas, uma das extremidades do **oscilador** é ligada à terra. O campo de irradiação é, pois, o da figura 34.2, onde se verifica que a metade inferior penetra no terreno.

**Figura 34.2 - Irradiação das Linhas de Força**

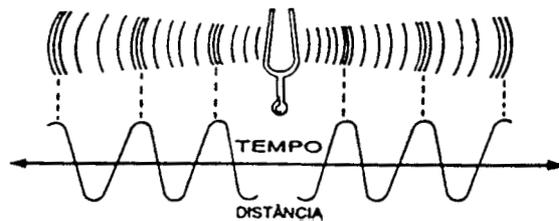


## b. ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A oscilação da carga elétrica (energia que se propaga) tem a forma sinusoidal e recebe o nome de **onda eletromagnética**. Esta oscilação pode ser produzida por um circuito oscilador, pelo movimento de um condutor dentro de um campo magnético, pelo método magnetostritivo (a vibração mecânica de matérias ferromagnéticas induz uma corrente alternada em um condutor enrolado em torno do material), pelo método piezoelétrico (a vibração mecânica do quartzo produz corrente alternada entre duas placas nos lados opostos do cristal), ou pela natureza, como são as oscilações do movimento ondulatório que dá origem à luz, raios X, raios Gama e outras radiações.

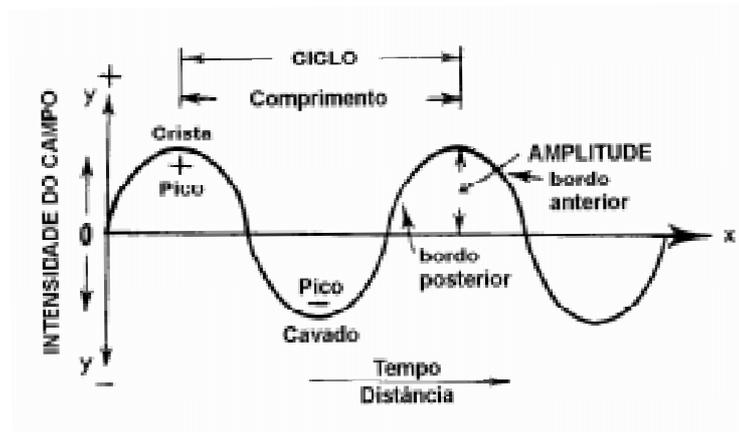
Representando a propagação de uma onda em um plano vertical, tendo como referência uma linha base, à qual chamaremos de linha zero, vemos que qualquer onda sempre terá uma parte acima da linha zero (positiva), e outra abaixo da linha zero (negativa). A linha zero representa, na realidade, uma linha de tempo/distância, dando a noção do afastamento, no tempo e no espaço, da onda eletromagnética, com relação à fonte emissora (figura 34.3).

**Figura 34.3 - Onda Eletromagnética**



No que se refere à terminologia da **onda eletromagnética**, os pontos mais altos da curva sinusoidal são denominados **picos**. O pico positivo é medido na direção considerada positiva; o pico negativo, na direção oposta. A parte mais alta de uma onda é denominada **crista**, na direção positiva, e **cavado**, na direção considerada negativa. A parte da frente da onda, no sentido do deslocamento, é denominada **bordo anterior**. A parte de trás da onda é o **bordo posterior** (figura 34.4).

**Figura 34.4 - Nomeclatura da Onda Sinusoidal**

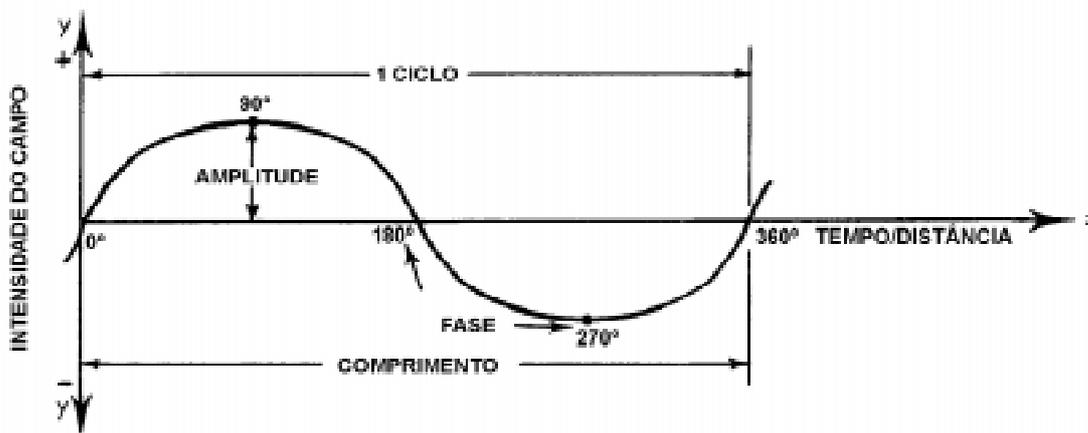


**Ciclo** é uma seqüência completa de valores da intensidade da onda que passa através de um ponto no espaço. É a seqüência completa de valores, de crista a crista, de cavado a cavado, ou de nulo a nulo (figuras 34.4 e 34.5).

**Comprimento** da onda é a distância horizontal de crista a crista, ou de cavado a cavado consecutivos. É, portanto, a distância entre dois picos positivos (ou negativos) sucessivos da onda. É medido em metros e seus submúltiplos. O **comprimento** da onda é o comprimento de um **ciclo** expresso em unidades de distância. A distância percorrida pela energia durante um **ciclo** é o **comprimento** da onda. Então, nas figuras 34.4 e 34.5, o **ciclo** acompanha o trajeto senoidal, enquanto que o **comprimento** é uma distância horizontal.

**Amplitude** da onda é a distância vertical entre um ponto da onda e a linha zero (eixo dos X); é, assim, a altura da onda e indica a sua intensidade (força) no ponto considerado (figura 34.5).

**Figura 34.5 - Terminologia da Onda Eletromagnética**



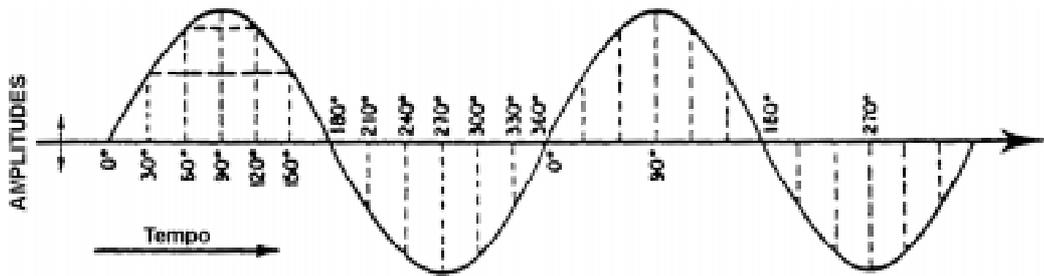
**Período** da onda é o tempo gasto para completar um ciclo.

**Freqüência (f)** é o número de ciclos completados na unidade de tempo. Em se tratando de **ondas eletromagnéticas**, a unidade de tempo normalmente usada é o segundo, ou seus submúltiplos (microsegundo, picosegundo ou nanosegundo). Na faixa de rádio do espectro eletromagnético, as freqüências são medidas em **Hertz (Hz)**, que corresponde a 1 ciclo por segundo.

**Fase** é a quantidade que um ciclo progrediu desde uma origem especificada. A **fase** é geralmente medida em unidades angulares, correspondendo um **ciclo** completo a 360° (figura 34.5). A **fase** também pode ser definida como sendo a situação de um determinado ponto da onda em relação a um ponto-origem, expressa em unidades angulares. Assim, na figura 34.6, temos a representação dos ângulos de fase. Normalmente, a origem é o zero da curva. A fase alcança 90° na crista da onda; 180° quando a amplitude é novamente zero; 270° no cavado e 360° quando volta de novo a zero.

Se tivermos duas ondas com o mesmo ângulo de fase, diremos que as mesmas estão **em fase**. Se os ângulos de fase forem diferentes, com relação a uma origem comum, diz-se que as ondas estão **fora de fase**, ou **defasadas**. O ângulo de diferença de fase denomina-se **defasagem**.

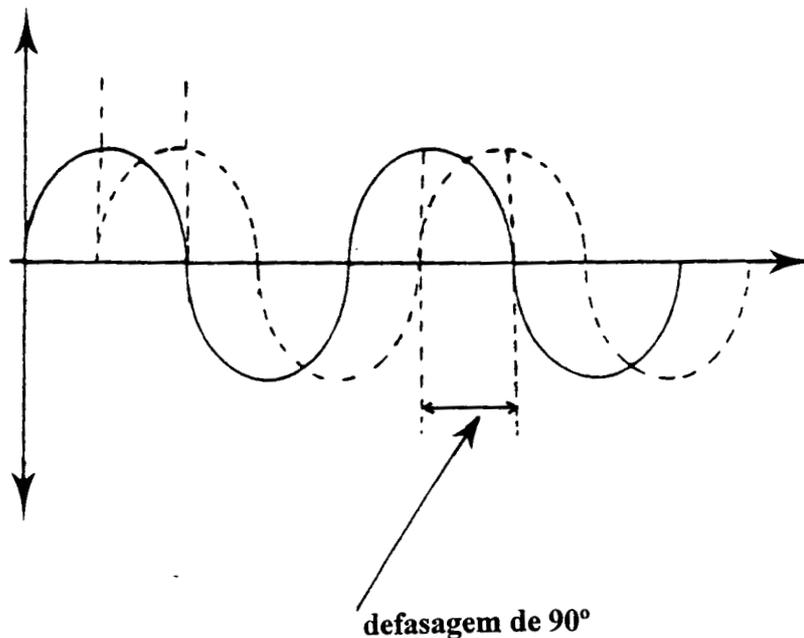
**Figura 34.6 - Dois Ciclos da Curva Sinusoidal, Mostrando as Amplitudes da Onda a Cada 30° de Fase**



Portanto, duas ondas podem ser comparadas pela medida da diferença de suas fases. Se, por exemplo, duas ondas tiverem suas cristas defasadas de um quarto de ciclo, elas estarão defasadas de  $90^\circ$ , ou  $90^\circ$  fora de fase, conforme mostrado na figura 34.7.

O conceito de **fase** é importante e forma a base dos Sistemas Hiperbólicos de Navegação, como o Decca e o Omega.

**Figura 34.7 - Diferença de Fase**



### c. **RELAÇÃO ENTRE FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DE ONDA. ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO**

Para calcular a velocidade das ondas de energia eletromagnética que se propagam no espaço a partir do ponto em que foram geradas, devem ser consideradas as características do meio através do qual se deslocam. Maxwell descobriu, mediante deduções matemáticas, que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo era muito semelhante à velocidade de propagação das ondas luminosas, ou seja, aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/seg, ou 300.000 km/seg, concluindo, também, que as ondas de luz constituem uma forma de energia eletromagnética. Medições posteriores determinaram que, embora existam pequenas variações em função da frequência e da densidade do meio, a velocidade de

propagação das ondas eletromagnéticas na atmosfera é de 299.708.000 metros/segundo (161.829,37 milhas náuticas/segundo), o que corresponde a uma diferença de 0,097% em relação ao primeiro valor.

Pela própria definição de frequência da onda eletromagnética (número de ciclos completados na unidade de tempo), pode-se concluir que o **comprimento de onda** será tanto menor quanto maior for a **frequência**. Assim, o valor do **comprimento de onda** está diretamente relacionado à **frequência** e à **velocidade de propagação**.

Para ilustrar a relação que existe entre **velocidade de propagação**, **comprimento de onda** e **frequência**, considere-se o tempo que transcorre para a passagem de um ciclo completo de um campo eletromagnético por um ponto específico da superfície terrestre.

Durante este lapso de tempo (uma fração de segundo), passará pelo ponto considerado um comprimento de onda, ou seja, o intervalo de tempo que se mediu corresponde ao tempo necessário para que o campo magnético se desloque de uma distância igual a um comprimento de onda. Pela física, sabemos que a distância percorrida é igual ao produto da velocidade pelo tempo, isto é:

$$e = v \cdot t$$

Neste caso, a distância (e) é igual ao comprimento de onda (l) e a velocidade (v) é igual à velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (C @ 300.000 km/s). O tempo (t) corresponde a 1 ciclo completo.

Sabemos que a **frequência (f)** é igual ao número de ciclos na unidade de tempo. O intervalo de tempo correspondente a um ciclo, portanto, será igual a 1/f.

Então:

$$l = C \cdot t$$

$$l = C/f; \text{ ou } C = l \cdot f$$

Como vimos, a **frequência** é medida em Hertz (ciclos/seg). Assim, o **comprimento de onda (l)**, em metros, será:

$$l = \frac{300.000.000}{f \text{ (em Hertz)}}$$

Se for necessária maior precisão:

$$l = \frac{299.708.000}{f \text{ (em Hertz)}}$$

Então, conclui-se que cada frequência eletromagnética é irradiada em um comprimento de onda próprio, ou seja, a cada frequência corresponde um determinado comprimento de onda.

O conjunto total das **frequências** das radiações eletromagnéticas constitui o **espectro eletromagnético**, ou **espectro de frequências**. As frequências nesse espectro variam desde dezenas de Hertz até 10<sup>10</sup> Hertz, englobando rádio, radar, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X, raios Gama e outras radiações. O comportamento de

uma onda eletromagnética depende, sobretudo, da sua **frequência** e do correspondente **comprimento de onda**. Para efeitos descritivos, as frequências eletromagnéticas são agrupadas em faixas, arranjadas de forma ascendente, conforme mostrado no quadro abaixo.

A faixa das frequências apropriadas para utilização em transmissões de rádio é denominada de **espectro das ondas de rádio** ou **faixa de radiofrequências**, estendendo-se de 10 kHz (10.000 ciclos/segundo) a 300.000 MHz (300.000 megaciclos/segundo), sendo, também, conhecida como **Faixa de Rádio e de Microondas**.

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO			
Faixa	Abreviatura	Frequências	Comprimentos
Audiofrequência	AF	20 a 20.000 Hz	15.000.000 a 15.000m
Radiofrequência	RF	10 kHz a 300.000 MHz	30.000m a 0,1cm
Calor e Infravermelho*		$10^6$ a $3,9 \times 10^8$ MHz	0,03 a $7,6 \times 10^{-5}$ cm
Espectro Visível*		$3,9 \times 10^8$ a $7,9 \times 10^8$ MHz	$7,6 \times 10^{-5}$ a $3,8 \times 10^{-5}$ cm
Ultravioleta*		$7,9 \times 10^8$ a $2,3 \times 10^{10}$ MHz	$3,8 \times 10^{-5}$ a $1,3 \times 10^{-6}$ cm
Raios X*		$2,0 \times 10^9$ a $3,0 \times 10^{13}$ MHz	$1,5 \times 10^{-5}$ a $1,0 \times 10^{-9}$ cm
Raios Gama*		$2,3 \times 10^{12}$ a $3,0 \times 10^{14}$ MHz	$1,3 \times 10^{-8}$ a $1,0 \times 10^{-10}$ cm
Raios Cósmicos*		$> 4,8 \times 10^{14}$ MHz	$< 6,25 \times 10^{-11}$ cm

ESPECTRO DAS RADIOFREQUÊNCIAS			
Faixa	Abreviatura	Frequências	Comprimentos
Frequência muito baixa (Very Low Frequency)	VLF	10 a 30 kHz	30.000 a 10.000m
Frequência baixa (Low Frequency)	LF	30 a 300 kHz	10.000 a 1.000m
Frequência média (Medium Frequency)	MF	300 a 3.000 kHz	1.000 a 100m
Frequência alta (High Frequency)	HF	3 a 30 MHz	100 a 10m
Frequência muito alta (Very High Frequency)	VHF	30 a 300 MHz	10 a 1m
Frequência ultra alta (Ultra High Frequency)	UHF	300 a 3.000 MHz	100 a 10cm
Frequência super alta (Super High Frequency)	SHF	3.000 a 30.000 MHz	10 a 1cm
Frequência extremamente alta (Extremely High Frequency)	EHF	30.000 a 300.000 MHz	1 a 0,1cm

\* Dados aproximados; kHz = Quilohertz e MHz = Megahertz.

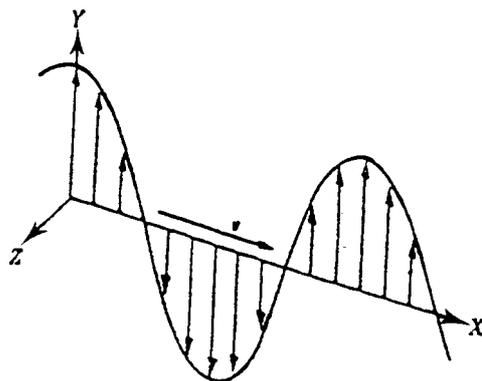
Para facilidade de referência, o **espectro das ondas de rádio** é dividido nas oito faixas de frequência antes descritas, cujas principais aplicações na **Navegação Eletrônica** e comunicações marítimas são:

- **VLF** – (Very Low Frequency = frequência muito baixa): nessa faixa estão incluídas todas as frequências de rádio **menores que 30 kHz**. A principal utilização dessa faixa em navegação é o sistema **OMEGA**, que estudaremos em outro capítulo;
- **LF** – (Low Frequency = baixa frequência): nessa faixa, compreendida entre **30 e 300 kHz**, situam-se os sistemas **DECCA, LORAN-C** e a maioria dos **radiofaróis**;
- **MF** – (Medium Frequency = média frequência): nessa faixa, compreendida entre **300 kHz e 3 MHz**, encontramos algumas estações de radiofaróis e as estações de “broadcast”;
- **HF** – (High Frequency = alta frequência): essa faixa, compreendida entre **3 MHz e 30 MHz**, é usada, principalmente, para comunicações a longa distância (Avisos aos Navegantes, Previsões Meteorológicas);
- **VHF** – (Very High Frequency = frequência muito alta): essa faixa, compreendida entre **30 MHz e 300 MHz**, é usada para comunicações de curta e média distâncias (navio-navio e navio-terra), além de radiogoniometria em VHF;
- **UHF** – (Ultra High Frequency = frequência ultra-alta): essa faixa inclui frequências entre **300 MHz e 3.000 MHz**, e é usada nas comunicações de curta distância e em algumas **transmissões radar** (final da faixa). Além disso, é usada pelo Sistema GPS de navegação por satélite;
- **SHF** – (Super High Frequency = frequência super-alta): essa faixa inclui frequências entre **3.000 MHz e 30.000 MHz**. É usada em **transmissões radar**;
- **EHF** – (Extremely High Frequency = frequência extra-alta): essa faixa inclui frequências de **30.000 MHz a 300.000 MHz**. Tanto essa, quanto a faixa anterior (SFH), são usadas quase que exclusivamente em **radares de elevada precisão**.

#### d. POLARIZAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

As ondas eletromagnéticas são uma forma de energia oscilatória constituída por campos elétrico e magnético que se propagam no espaço. Se essas ondas estão num mesmo plano, ou seja, se os deslocamentos estão sempre no plano XY da figura 34.8, diz-se que o movimento ondulatório é polarizado linearmente. Se o plano estiver na vertical, a polarização será vertical. Se o plano estiver na horizontal, a polarização será horizontal.

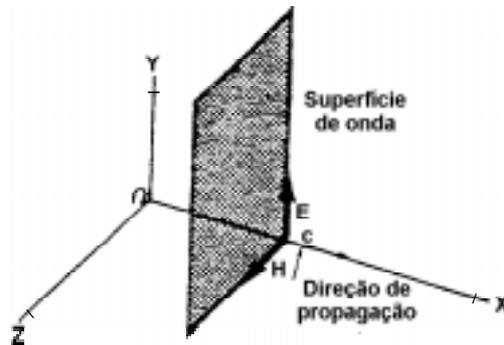
**Figura 34.8 - Polarização Linear**



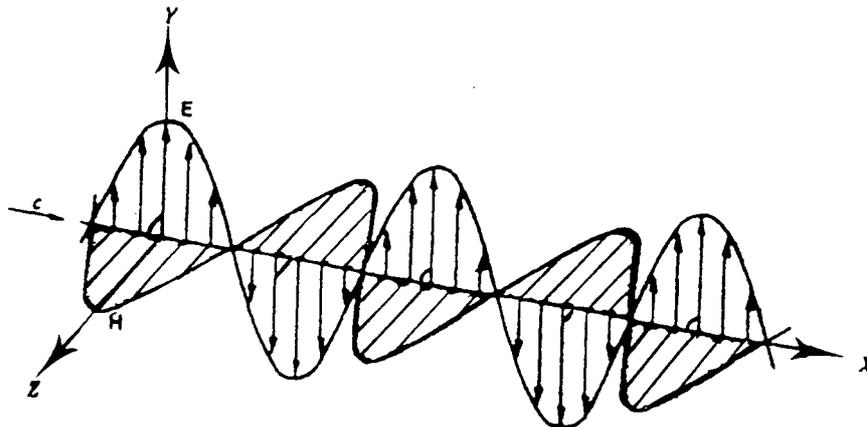
Na figura 34.9, a seta  $\mathbf{c}$  indica a direção de propagação da onda; o vetor  $\mathbf{E}$  representa o campo elétrico e o vetor  $\mathbf{H}$ , o campo magnético. Os dois campos, elétrico e magnético, de uma onda plana são perpendiculares entre si (o vetor  $\mathbf{E}$  é perpendicular ao vetor  $\mathbf{H}$ ). A figura 34.10 apresenta um trem de ondas eletromagnéticas, onde novamente a seta  $\mathbf{c}$  representa a direção de propagação, o vetor  $\mathbf{E}$  o campo elétrico e o vetor  $\mathbf{H}$  o campo magnético. Verifica-se, mais uma vez, que os dois campos são perpendiculares.

**Polarização** de uma onda eletromagnética é a direção do plano onde oscila o campo elétrico. Portanto, na figura 34.10, a onda está polarizada no plano XY.

**Figura 34.9 - Orientação dos Campos Elétrico e Magnético com Relação à Direção de Propagação da Onda**



**Figura 34.10 - Campos Elétrico e Magnético de uma Onda Plana, Polarizada no Plano XY**



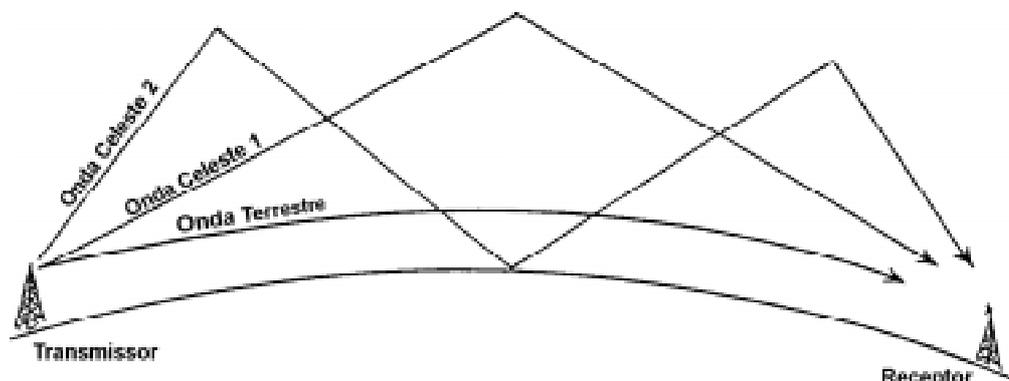
Uma onda eletromagnética deslocando-se através do espaço pode estar polarizada em qualquer direção. Mas, junto à Terra, devido a esta ser condutora e curto-circuitar todas as componentes horizontais, a onda eletromagnética estará sempre **polarizada verticalmente**, o que é uma importante característica da propagação, que devemos conhecer.

## e. ONDAS TERRESTRES E ONDAS CELESTES

A energia eletromagnética, ao ser irradiada pela antena, propaga-se em todas as direções. Uma parte desta energia se propaga paralelamente à superfície da Terra, enquanto

o restante desloca-se para cima, até que se choca com a ionosfera e reflete-se de volta à Terra. Esta onda refletida, quando alcança a superfície terrestre, reflete-se outra vez em direção às altas camadas da atmosfera, onde pode refletir-se de novo para a Terra, conforme mostrado na figura 34.11 (nessa figura, a onda celeste nº 1 sofreu uma única reflexão, enquanto a onda celeste nº 2 sofreu uma dupla reflexão). A parte da energia que segue a superfície da Terra denomina-se **onda terrestre**, as que são refletidas denominam-se **ondas celestes** ou **ionosféricas**. As ondas que se propagam em linha reta têm o nome de **ondas diretas**.

**Figura 34.11 - Onda Terrestre e Onda Celeste**



Em frequências baixas, a **onda terrestre** adquire uma grande importância, pois a maior parte da energia se irradia seguindo esta direção, sendo a condutividade do terreno um fator determinante na atenuação do sinal (diminuição de amplitude de uma onda, ou corrente, ao aumentar sua distância da fonte emissora), devido à absorção e seus efeitos sobre a velocidade de propagação.

A condutividade do terreno faz com que uma parte do campo eletromagnético penetre na superfície da Terra. Como resultado, o limite inferior da frente de onda se atrasa em seu deslocamento, com relação à parte superior, devido à sua penetração neste meio de maior condutividade (enquanto a parte superior não é afetada). Isto traz, como consequência, que toda a frente de onda inclina-se para vante, com relação à vertical da fonte emissora, fazendo com que o movimento das ondas eletromagnéticas se curve, acompanhando a curvatura da Terra.

Esta tendência de seguir a curvatura da Terra é que torna possível a transmissão de ondas terrestres a grandes distâncias. Entretanto, deve-se recordar que, junto com esta curvatura do movimento da onda eletromagnética, produz-se, também, uma dissipação de energia, devido à absorção causada pela penetração na superfície terrestre. Para compensar este efeito, é necessário o emprego de potências elevadas, quando se deseja alcançar grandes distâncias mediante o emprego de **ondas terrestres**.

A variação das características de condutividade do solo, ao longo do caminho seguido por uma onda terrestre, torna a previsão de seus efeitos muito complexa e difícil. Por outro lado, a condutividade das superfícies oceânicas é praticamente constante, com o que a velocidade de propagação, neste caso, pode ser prevista com bastante precisão.

Somente as transmissões em baixas frequências se curvam o suficiente para seguir a superfície terrestre por grandes distâncias. Os campos eletromagnéticos de frequências mais altas curvam-se apenas ligeiramente, não o bastante para proporcionar sinais a grandes distâncias da fonte de transmissão.

## 34.4 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

O comportamento das ondas eletromagnéticas é afetado pelo meio que atravessam. Os efeitos da atmosfera e da superfície da Terra que afetam a propagação e interessam diretamente ao desempenho dos sistemas de **Navegação Eletrônica** são:

- **Dispersão;**
- **Absorção e Atenuação;**
- **Reflexão;**
- **Refração; e**
- **Difração.**

### a. DISPERSÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A potência ou energia que emana de uma fonte é projetada em todas as direções. Isso, no entanto, não quer dizer que essa projeção é uniforme. Na realidade, no caso de algumas fontes altamente direcionais, a quantidade de energia irradiada ao longo de algumas direções é desprezível, ou mesmo nula.

Imaginemos uma fonte puntiforme que irradia uniformemente em todas as direções. Se considerarmos uma esfera do espaço que envolva esta fonte, o princípio da **conservação da energia** nos assegura que toda a energia irradiada deverá cruzar a superfície esférica. Esta afirmativa é verdadeira, qualquer que seja o tamanho da esfera considerada.

Em conseqüência, pode ser facilmente visualizada a forma pela qual a mesma intensidade de energia terá que preencher espaços cada vez maiores, resultando em densidades de potência cada vez menores. Esta densidade a uma distância R qualquer da fonte emissora será:

$$p = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Onde **p** é a densidade de potência a uma distância R da fonte que irradia uma potência **P**.

Este princípio aplica-se, ainda, ao caso da irradiação direcional, modificada por um fator de ganho, **G**.

$$p = \frac{GP}{4\pi R^2}$$

Um outro tipo de dispersão é a que ocorre quando a energia é de alguma forma contida, de modo que a sua propagação se faça de **maneira anômala**, segundo dutos ou canais. Neste caso, conhecido como **dispersão cilíndrica**, as perdas se tornam

inversamente proporcionais à distância, se considerarmos que a seção reta do duto ou canal de propagação é constante. Então, teremos:

$$p = \frac{P}{(2pr)R}$$

Traduzindo, na prática, as equações acima, verificamos que, na dispersão esférica, cada vez que a distância dobra, ocorre uma perda de potência de 6 dB. No caso da dispersão cilíndrica, cada vez que a distância é dobrada, há uma perda de 3 dB.

As Leis da dispersão, como pode ser observado, aplicam-se igualmente às ondas eletromagnéticas e acústicas, e são independentes da frequência.

Não deve ser esquecido que, no caso de sensores ativos, a onda deve percorrer duas vezes a distância que separa a fonte do alvo, introduzindo, portanto, os fatores multiplicadores correspondentes nas Leis da dispersão apresentadas.

## b. ABSORÇÃO E ATENUAÇÃO

A propagação de ondas através de qualquer meio diferente do vácuo é sempre acompanhada de perdas causadas pela absorção de potência pelas partículas do meio. Assim, apenas as ondas eletromagnéticas ao se propagarem no vácuo não são atenuadas pela absorção.

As ondas eletromagnéticas, ao se propagarem na atmosfera, são afetadas pela absorção. O vapor-d'água e as moléculas de oxigênio existentes na atmosfera são os principais responsáveis pela absorção de energia. Os efeitos da absorção crescem com o aumento da frequência.

Perturbações atmosféricas, tais como chuvas e nuvens, que aumentam muito a densidade de umidade do ar, causam atenuações substanciais nas frequências mais elevadas da faixa de rádio e microondas.

Como a densidade da atmosfera diminui com o aumento da altura, a absorção das ondas de rádio e radar será, também, influenciada pela inclinação do feixe. Com maiores inclinações para o alto, a porção da trajetória na parte inferior, mais densa, da atmosfera é menor, resultando numa absorção total menor.

Em frequências das faixas SHF e EHF a absorção atmosférica torna-se um problema, além do que existe a **difração** devido à presença de gotas de água de chuva, moléculas de oxigênio e vapor-d'água (obstáculos de dimensões praticamente iguais aos comprimentos de onda).

As ondas terrestres, além de perderem energia para o ar, também perdem para o terreno (figura 34.12). A onda é refratada para baixo e parte de sua energia é absorvida. Como resultado dessa primeira absorção, o bordo anterior da onda é curvado para baixo, resultando numa nova absorção, e assim por diante, com a onda perdendo energia gradualmente. A absorção é maior sobre uma superfície que não seja boa condutora. Relativamente pouca absorção ocorre quando a onda se propaga sobre a superfície do mar, que é uma excelente condutora. Assim, as ondas terrestres de frequência muito baixa percorrem grandes distâncias sobre os oceanos.

**Figura 34.12 – Absorção da Onda Terrestre pelo Terreno**

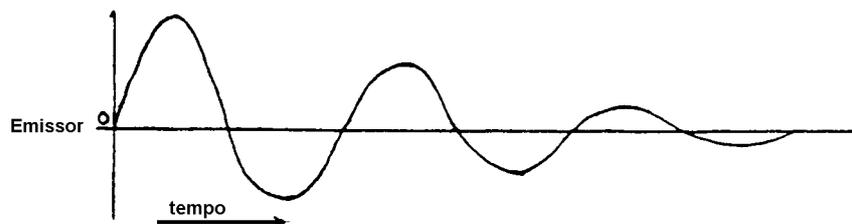


Também as ondas refletidas que sofrem mais de uma reflexão perdem energia por absorção quando de sua reflexão intermediária na Terra. Além disso, as ondas refletidas sofrem absorção quando de sua reflexão na ionosfera, cujo grau depende da densidade de ionização, da frequência da onda eletromagnética e da altura. A absorção ionosférica máxima ocorre aproximadamente na frequência de 1.400 kHz.

Quanto à penetração na água, as ondas eletromagnéticas são muito absorvidas pelo oceano. Apenas as frequências extremamente baixas (ELF), muito baixas (VLF) e baixas (LF) podem conseguir alguma penetração no meio aquático, assim mesmo às expensas de elevadas potências de transmissão. Estas ondas, após percorrerem alguns milhares de milhas, penetram na água até profundidades que permitem o recebimento de sinais por submarinos imersos até 100 pés (VLF), como no sistema Omega de navegação. Recentes experiências, realizadas na área das ELF, indicam a possibilidade de recebimento de mensagens por submarinos em qualquer profundidade e sem limitação de velocidade.

**Atenuação** é a diminuição da intensidade da onda com a distância. Da Física, sabemos que a intensidade do campo varia inversamente com o quadrado da distância. Essa diminuição da intensidade é que se denomina **atenuação**. Quanto mais distante do emissor, mais fraco é o campo eletromagnético, como mostrado na figura 34.13.

**Figura 34.13 – Atenuação da Onda Eletromagnética**



### c. REFLEXÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS. A IONOSFERA E AS ONDAS DE RÁDIO

A reflexão é um fator indispensável para o funcionamento de sensores ativos, como o radar.

Quando uma onda encontra a superfície limítrofe entre dois meios de densidades diferentes, uma parte da energia é refletida, outra parte da energia é absorvida pela superfície refletora e uma terceira porção pode penetrar, refratar-se e se propagar no segundo meio. As quantidades de energia envolvidas nesses três processos irão depender, basicamente, da natureza da superfície, das propriedades do material e da frequência da onda. No caso das ondas EM, a orientação da polarização do campo elétrico em relação à superfície também exercerá influência.

As ondas eletromagnéticas são afetadas pela reflexão e pelo espalhamento. O emprego das ondas EM na detecção pode ser grandemente prejudicado pelos ecos indesejáveis que obscurecem o alvo, tais como grandes massas de terra, retorno do mar, aguaceiros e nevascas, fenômenos estes que influenciam, principalmente, as frequências mais elevadas.

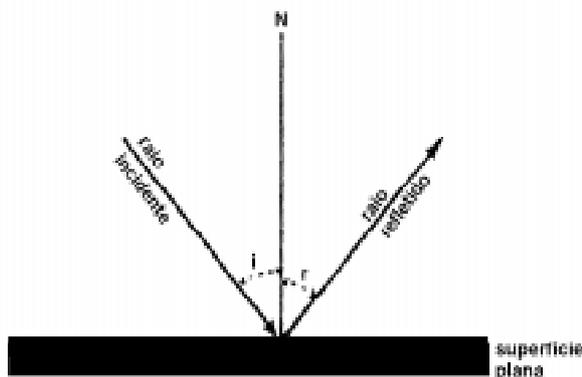
Uma outra consequência da reflexão é o aparecimento de zonas de desvanecimento nos feixes dos radares, efeito que foi abordado com maiores detalhes no Capítulo 14 (Volume I), que trata desse sensor.

Então, quando uma onda de rádio encontra uma superfície, se as condições forem favoráveis ela será refletida de forma “especular” (como em um espelho), da mesma maneira que ocorre com uma onda luminosa, que também é uma onda eletromagnética, cumprindo-se as Leis:

- 1 – O raio de incidência e o raio de reflexão estão no mesmo plano; e
- 2 – O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

A figura 34.14 mostra a reflexão em uma superfície plana. A relação entre a intensidade do campo incidente e a do campo refletido denomina-se **coeficiente de reflexão**.

**Figura 34.14 – Reflexão da Onda Eletromagnética em uma Superfície Plana**



A superfície terrestre reflete ondas de todas as frequências. As baixas frequências possuem grande penetração e as ondas são muito menos refletidas. Em frequências muito baixas, sinais de rádio podem ser recebidos a até alguns metros abaixo da superfície do mar, como vimos.

Árvores, edifícios, montanhas e outros objetos podem causar reflexões de ondas de rádio. Para as frequências baixas, e mesmo médias, essas reflexões podem ser desprezadas. Já nas altas frequências, elas se tornam importantes, sendo o fenômeno, por vezes, aproveitado como base de sistemas eletrônicos, como o radar. Quando o fenômeno é indesejável, como nas comunicações, costuma-se usar antenas direcionais, que, pelo menos, minimizam os efeitos da reflexão.

Nas frequências mais altas, ocorrem reflexões pela chuva e por nuvens densas. Também, a onda de rádio de frequência muito alta (VHF), ou superior, pode ser refletida pelos limites bem definidos (frentes) entre massas de ar frias e quentes, quando o ar quente e úmido flui sobre o ar frio mais seco. Se a superfície entre as massas de ar é paralela à superfície da Terra, as ondas de rádio podem percorrer distâncias muito maiores que as normais.

Sempre que uma onda é refletida pela superfície terrestre, dá-se uma mudança de fase, que varia com a condutividade do terreno e a polarização da onda, alcançando um máximo de  $180^\circ$  para uma onda polarizada horizontalmente, quando refletida pela água do mar (que considera-se como tendo condutividade infinita).

A atmosfera possui várias superfícies refletoras, a principal das quais é a **ionosfera**.

Uma onda, emitida por um transmissor, poderá propagar-se até o aparelho receptor acompanhando a superfície da Terra. A onda que faz esse trajeto denomina-se, como vimos, onda terrestre. Porém, conforme estudado, a onda pode alcançar o receptor através de uma ou mais reflexões, denominando-se, então, onda refletida.

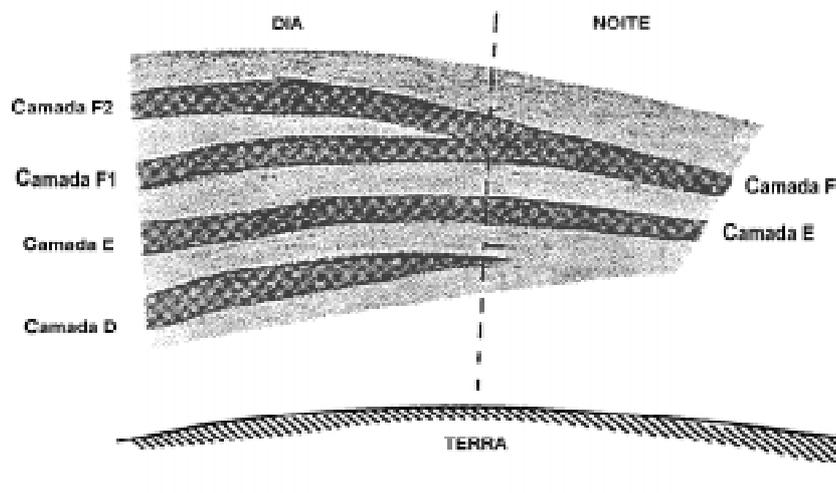
Quando uma onda terrestre e uma onda refletida chegam ao mesmo tempo a um receptor, o sinal total é a soma vetorial das duas ondas. Se os sinais estão em fase, uma onda reforça a outra, produzindo um sinal mais forte. Se há diferença de fase, os sinais tendem a cancelar-se mutuamente, sendo o cancelamento completo quando a **diferença de fase** é de  $180^\circ$  e os dois sinais têm a mesma **amplitude**. Essa interação tem o nome de interferência de ondas. A diminuição de sinal no receptor devido a essa interação de ondas terrestres e refletidas é denominada **“fading”** (desvanecimento).

Sob certas condições, uma porção da energia eletromagnética de uma onda de rádio poderá ser refletida de volta à superfície terrestre pela **ionosfera**, uma camada carregada de partículas entre 90 e 400 km de altura. Quando isso ocorre, denominamos a onda refletida de **onda celeste**.

A parte superior da atmosfera terrestre durante o dia é ininterruptamente bombardeada pelos raios ultravioletas solares. Essas ondas luminosas de elevada energia fazem com que os elétrons das moléculas gasosas da parte superior da atmosfera tornem-se ativos e libertem-se de suas moléculas, passando a formar as **camadas ionizadas**. Essas camadas alcançam sua maior intensidade quando o Sol atinge sua altura máxima.

Existem quatro **camadas ionosféricas** de importância no estudo da propagação das ondas de rádio (figura 34.15):

**Figura 34.15 - Camadas Ionosféricas**



**Camada F** – É a mais alta, onde a densidade do ar é tão baixa que os gases se apresentam, na maioria dos casos, como átomos separados, em vez de moléculas. Aí há uma forte ionização produzida pela radiação solar. Acima dela, há um decréscimo de ionização devido à falta de átomos; abaixo dela, também há um decréscimo, porque o agente ionizador (radiação solar) já foi absorvido. Durante o dia, a camada se divide em duas subcamadas: **F1** e **F2**, sendo **F1** a mais baixa. São dois níveis máximos de ionização, sendo que **F1** vai de cerca de 175 a 250 km de altitude, e **F2** de 250 a 400 km de altitude. De noite, elas se reúnem numa única camada, em altitude de cerca de 300 km, e a ela damos o nome comum de camada **F**, a qual é, normalmente, a única camada ionosférica importante para a propagação rádio no período noturno.

**Camada E** – Estende-se de 100 a 150 km de altitude e julga-se ser devida à ionização de todos os gases por raios **X** leves. É a região onde os raios **X** que não foram absorvidos pelas camadas anteriores encontram um grande número de moléculas de gás, ocorrendo novamente um máximo de ionização. A camada **E** tem uma altura praticamente constante, ao contrário das camadas **F**, e permanece durante a noite, se bem que com um decréscimo em seu grau de ionização. Existem regiões irregulares de grau de ionização, denominadas “camadas **E** esporádicas”, cujas densidades de elétrons podem ser até 10 vezes maiores que a da camada **E** normal. Essas regiões esporádicas podem ocorrer a qualquer hora do dia e em qualquer estação do ano.

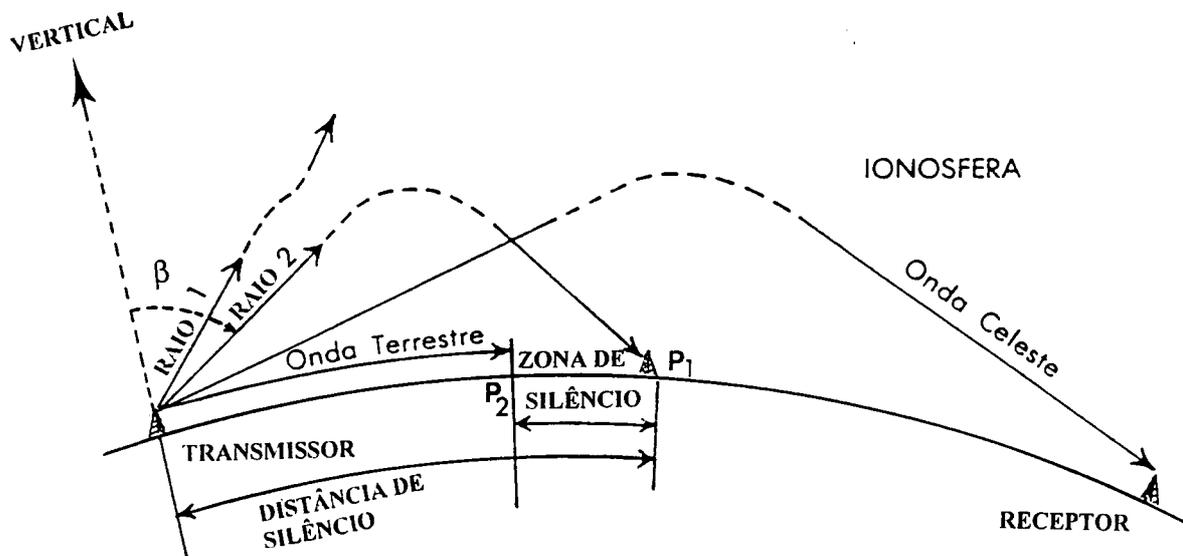
**Camada D** – É a mais fraca e a mais próxima da superfície da Terra, situando-se entre 60 e 90 km de altitude. Como dito, tem uma densidade de ionização bem fraca, muito menor que qualquer das outras, e desaparece durante a noite. Ela absorve ondas de alta frequência (HF) e reflete ondas de frequência baixa (LF e VLF), obviamente durante o dia claro.

Todas as camadas da ionosfera são variáveis de alguma forma, com seus padrões principais parecendo ser função dos períodos diurnos, das estações do ano e do ciclo solar. As camadas podem favorecer a propagação da onda de rádio para uma área de recepção desejada, ou elas podem dificultar, e até mesmo impedir inteiramente, tal transmissão. A frequência da onda, seu ângulo de incidência e a altura e densidade das várias camadas no momento da transmissão serão os fatores determinantes da facilidade ou não de recepção da transmissão realizada. De uma forma geral, as frequências nas faixas de **MF** e **HF** são mais apropriadas para a reflexão ionosférica durante o dia, sendo que a parte superior da faixa **LF** e a parte mais baixa da faixa **VHF** produzem ondas celestes somente utilizáveis à noite. As frequências fora desses limites ou não produzem ondas celestes, ou aquelas que são produzidas são tão fracas que não podem ser utilizáveis.

Combinando os efeitos da **onda celeste**, ou **onda ionosférica**, com os da **onda terrestre**, já estudada, pode-se imaginar um padrão de propagação como mostrado na figura 34.16.

A **onda celeste** que sai diretamente pela vertical da antena (na direção do Zênite) penetra na ionosfera e perde-se no espaço. Uma onda que faça um pequeno ângulo com a vertical ao sair da antena, também poderá atravessar a ionosfera e se perder no espaço, como no caso do raio 1 mostrado na figura 34.16. Aumentando o ângulo que o raio emitido faz com a vertical da antena, alcança-se um ângulo sob o qual a onda transmitida reflete-se na ionosfera e retorna à Terra. Este ângulo ( $\theta_c$ , na figura) tem o nome de **ângulo crítico**. Então, o raio 2 (figura 34.16), incidindo sobre a ionosfera com um ângulo igual (ou maior) que o ângulo crítico, reflete-se na ionosfera, formando uma onda refletida que atinge a superfície da Terra no ponto  $P_1$ .

Figura 34.16 – Padrão de Irradiação



A **onda terrestre** mostrada na figura 34.16 propaga-se acompanhando, de forma aproximada, a curvatura da Terra, enquanto perde energia, através do **efeito absorção**, tendo como **alcance máximo** o ponto  $P_2$ . A zona entre o **alcance máximo** da onda terrestre e o **alcance mínimo** da onda celeste é denominada **zona de silêncio**. A distância entre o transmissor e o ponto  $P_1$  é denominada **distância de silêncio**, que significa a distância mínima para o recebimento de uma **onda celeste**. Dentro da **distância de silêncio** nenhuma onda refletida na ionosfera é recebida.

As reflexões aumentam o alcance da onda. A distância máxima em que um sinal refletido na camada **E** pode ser recebido é de, aproximadamente, 1.400 milhas náuticas (para isso é necessário que o sinal deixe o transmissor em direção quase horizontal). Como a camada **F** é mais alta, suas reflexões são recebidas a maiores distâncias; neste caso, a distância máxima de recepção é de cerca de 2.500 milhas.

Entretanto, as ondas terrestres de baixas frequências também podem ter alcances comparáveis e até maiores, como no caso das ondas **VLF** (frequências muito baixas) usadas no sistema Omega.

#### d. REFRAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Sempre que uma frente de onda se propaga por um meio onde ocorre uma variação de densidade, haverá um encurvamento do feixe. As ondas eletromagnéticas são refratadas na atmosfera devido a pequenas diferenças de velocidade de propagação, em consequência da existência de gradientes de densidade. Como era de se esperar, este fenômeno ocorre, principalmente, na baixa atmosfera. Na faixa do espectro de rádio e de microondas, os efeitos da refração podem se tornar extremamente importantes, nas regiões mais baixas da atmosfera, dependendo das variações de temperatura, umidade e pressão. Alcances extraordinários nos radares, recepção de sinais de TV oriundos de emissoras de outros Estados, ou, algumas vezes, de outros países, são testemunhos do fenômeno da refração.

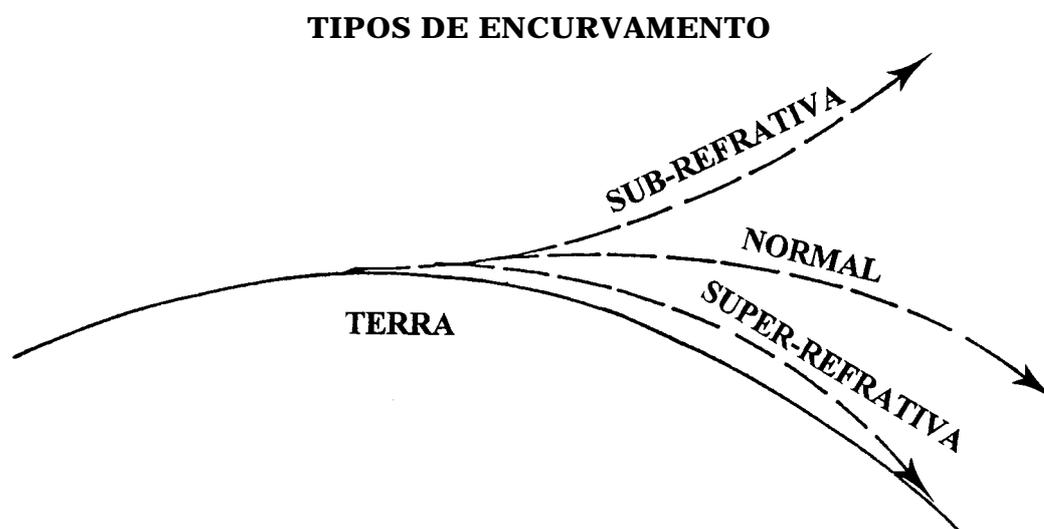
A atmosfera pode refratar as ondas de rádio e radar. O coeficiente que mede esse poder se designa por "**N**" (expressa-se a refração em unidades **N**) e é função da densidade

do ar e da velocidade de propagação da energia nessa mesma massa de ar. Podemos dizer, também, que é função da temperatura, da umidade e da pressão (que, em outras palavras, servem para caracterizar a densidade do ar). Nas camadas mais baixas da atmosfera, a umidade, a pressão e a temperatura decrescem com a altitude nas primeiras centenas de pés de altura. O gradiente nessas camadas é da ordem de 12 unidades **N** por mil pés. Este valor é denominado “refração normal” e tem como consequência um suave encurvamento dos feixes **EM**, quase acompanhando a curvatura normal da superfície terrestre (a refração da camada inferior da atmosfera estende o horizonte rádio à distância de 15% a mais que o horizonte visual). O efeito é o mesmo que se o raio da Terra fosse cerca de 1/3 maior, e não houvesse refração. Quando o índice de refração decresce com variações maiores que a normal, por exemplo 50 unidades “**N**” por mil pés de ascensão, o encurvamento do feixe **EM** é sensivelmente maior.

Como sabemos, a atmosfera não é homogênea. Conseqüentemente, os gradientes de refração variam e, como resultado, geram zonas onde há refração normal, super-refração ou sub-refração (figura 34.17). Tais coeficientes variáveis podem causar a um feixe de ondas **EM**:

- encurvamento brusco, reduzindo o alcance; e
- a subdivisão de feixe em diversas partes, causando zonas de sombra e dutos, falhas e concentração de energia.

**Figura 34.17 - Efeitos da Refração**

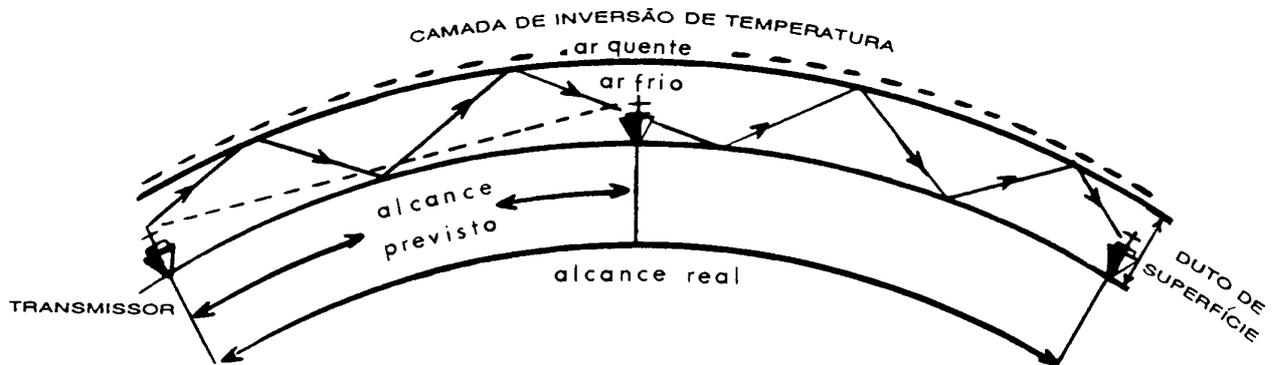


As **falhas**, ou **zonas de sombra**, nada mais são que porções do espaço aéreo, dentro de uma região onde se espera propagação normal, mas que, devido à existência de camadas de sensível refração, deixam de ser energizadas ou iluminadas pela transmissão **EM**. Assim, por exemplo, um alvo situado numa dessas falhas poderá ser detectado visualmente, antes de sê-lo pelos radares.

Os **dutos**, como o próprio nome indica, são regiões onde a energia é aprisionada, confinada e concentrada por efeito de refrações sucessivas, de modo a atingir regiões bem além do horizonte normal e, em consequência, possibilitando a detecção de alvos a distâncias que, normalmente, estariam além do alcance nominal dos sensores ou das comunicações.

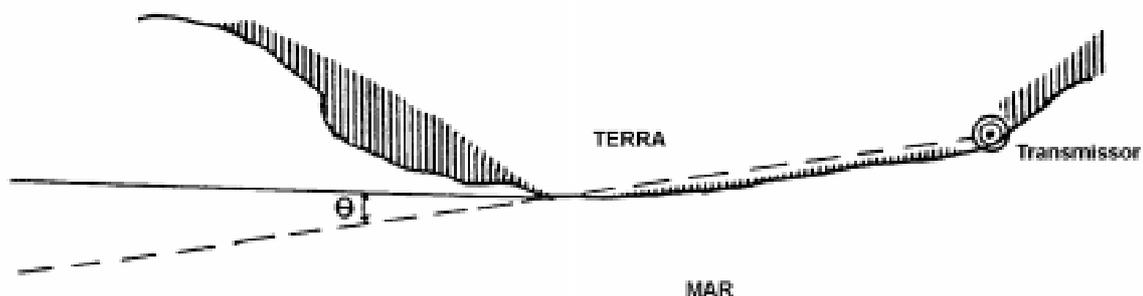
Ocasionalmente, sob condições atmosféricas bastante especiais e pouco frequentes, poderá ocorrer o fenômeno conhecido como “**duto de superfície**”, fazendo com que a onda terrestre atinja distâncias muito além de seus limites normais de recepção. O “**duto de superfície**” é formado entre a superfície da Terra e a parte inferior de uma camada de ar dentro da qual existe uma forte inversão de temperatura. Devido à largura do “duto” ser necessariamente maior do que o comprimento da onda para ser atuante, o fenômeno está, em geral, associado às mais altas frequências de rádio e radar (figura 34.18). O fenômeno ocorre mais vezes nas Latitudes tropicais, especialmente nas regiões do Pacífico, onde um “duto de superfície”, uma vez formado, persiste por muitas horas e, em certas ocasiões, até mesmo por vários dias.

**Figura 34.18 – Duto de Superfície**



Quando a onda de rádio terrestre cruza obliquamente a linha limite entre terrenos de condutividade diferente, há uma refração. Isso se manifesta, principalmente, na costa (pois há uma máxima variação de condutividade entre a terra e o mar) e, por isso, recebe o nome de **refração da costa** ou **efeito terrestre** (figura 34.19).

**Figura 34.19 – Refração da Costa**



Na figura, a linha tracejada representa o trajeto da onda de rádio a partir do transmissor, sem considerar a **refração da costa**. Devido a esta refração, a onda muda de caminho ao cruzar a linha da costa, passando a seguir a linha cheia. O ângulo  $\theta$  é o **ângulo de refração**, que pode alcançar valores de  $4^\circ$  a  $5^\circ$ . A **refração da costa** é variável com o comprimento de onda e diminui com o seu aumento. É praticamente desprezível para comprimentos de onda de mais de 3.000 metros e, geralmente, é maior quando a costa é retilínea e a direção de propagação forma um ângulo muito agudo com ela. A **refração da costa** é zero quando a onda é perpendicular à direção da costa. Para ondas de 800 a 1.000 m

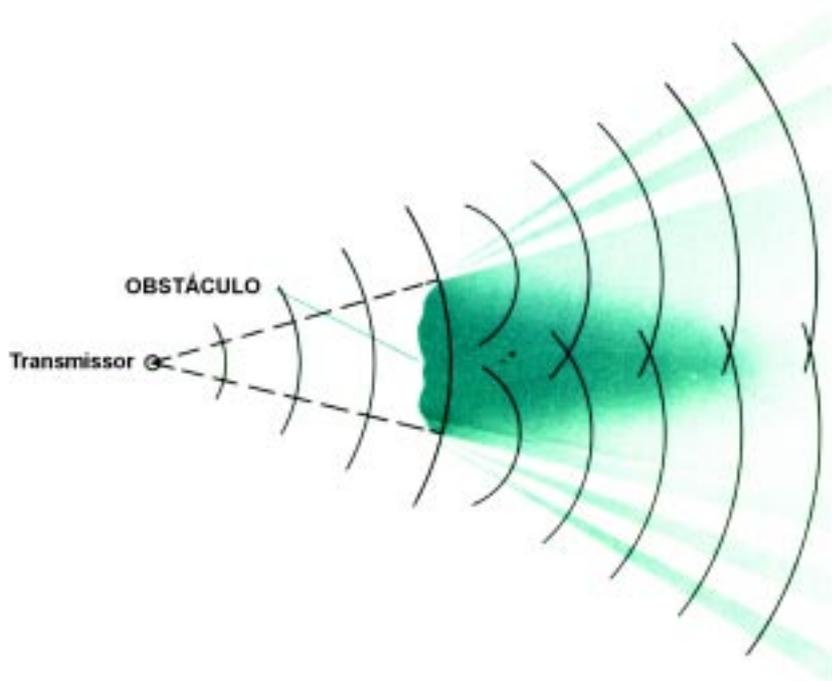
de comprimento (375 a 300 kHz), e para ângulos com a linha da costa de menos de 10°, foram obtidos, experimentalmente, erros de 4° a 5°. É importante levar em conta este efeito no caso das marcações radiogoniométricas, pois os radiofaróis operam na faixa acima citada.

### e. DIFRAÇÃO

A difração é um fenômeno que ocorre com ondas acústicas e com ondas eletromagnéticas, bem como, também, com partículas que se comportam como ondas. É a dispersão da onda em torno de um obstáculo.

Seja a figura 34.20, onde temos um transmissor emitindo ondas eletromagnéticas, que encontram em sua propagação um objeto opaco. Por trás do obstáculo se formará uma zona de interferência (onde as ondas se sobrepõem, podendo tanto se reforçarem como se cancelarem), enquanto que a parte desobstruída do bordo anterior da onda prossegue em sua direção original. Quando a onda incide nos limites do objeto, curva-se para trás do mesmo, de maneira que uma pequena quantidade de energia é propagada para dentro da zona de sombra (área de interferência). No caso de ondas de luz, isso resultará em que os limites do objeto não apresentarão sombra nítida, e sim um borrão, formando-se, atrás da obstrução, uma área de pouca luminosidade, porém, certamente, mais clara que a ausência total de luz.

**Figura 34.20 - Difração**



Portanto, **difração** é a mudança da direção da onda quando a mesma passa junto a um obstáculo. Seu efeito prático é uma diminuição na potência do sinal na área de sombra, e um padrão perturbado numa curta distância fora dessa área sombreada. A difração tem valor máximo quando o comprimento do obstáculo é igual ao comprimento da onda. A quantidade de difração é inversamente proporcional à frequência, sendo maior nas frequências muito baixas. Na **zona de sombra** o sinal de rádio somente será recebido de forma fraca e entrecortada.

A difração, portanto, é uma outra forma de encurvamento do feixe, que ocorre quando a onda passa pela borda de um objeto opaco (insensível à onda de rádio), a qual causa uma deflexão da onda na direção do objeto. Como o grau de difração é maior nas frequências mais baixas, a difração é, então, mais significativa para as ondas de rádio, em comparação com as ondas de radar.

Assim, por exemplo, ondas de rádio viajando sobre a superfície da Terra sofrem uma difração sobre a sua curvatura, o que, somado à refração, faz com que elas se propaguem além do horizonte geográfico. Nas VLF podem ser conseguidas comunicações de âmbito mundial. Por outro lado, a difração não contribui para que as frequências de radar sejam estendidas muito além da linha de visada.

## 34.5 TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

### a. MODULAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO

Quando uma série de **ondas eletromagnéticas** é transmitida em frequência e amplitude constantes, ela é denominada de **onda contínua**, ou, abreviadamente, **CW** (do inglês “continuous wave”).

Estas ondas só poderão ser ouvidas em **VLF** (frequências muito baixas), quando produzirão um forte zumbido no receptor. Entretanto, usando no receptor um **oscilador de batimento** (ou **oscilador de frequência de batimento**), poderia ser ouvido um tom constante de audiofrequência. Ao receber um sinal de radiofrequência, o **oscilador de batimento** (“beat frequency oscillator”) gera um sinal com uma frequência diferente da do sinal recebido, dentro da faixa audível (de 20 a 20.000 Hz), que pode ser percebido pelo ouvido humano.

Contudo, um sinal contínuo não tem significado algum, mas pode-se formar um código se variarmos, por meio de interrupções, esse sinal. É isso que se faz em radiotelegrafia. Interrompe-se a produção da onda contínua não modulada, por meio de uma chave, denominada **manipulador**. O código usado é constituído de sinais longos (traços) e curtos (pontos) e denomina-se Código Morse. Um transmissor de radiotelegrafia de onda contínua não modulada é mostrado na figura 34.21. A transmissão em onda contínua é conhecida como transmissão em **CW** (“continuous wave”).

**Figura 34.21 – Diagrama em Bloco de um Transmissor CW**



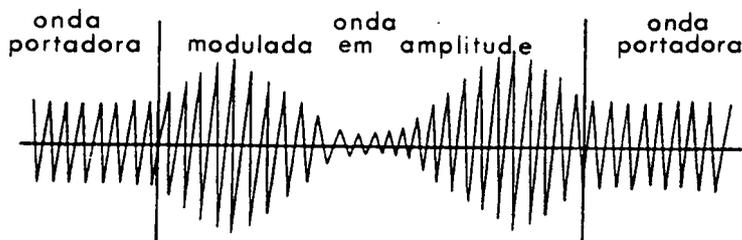
Devido ao fato de uma onda contínua não poder conduzir muitas informações, na **Navegação Eletrônica** ela é quase sempre modificada, ou seja, modulada de alguma forma. Quando isso ocorre, a onda **CW** passa a ser chamada de **onda portadora**.

Na prática, existem três maneiras para modularmos uma onda **CW** para que conduza as informações desejadas:

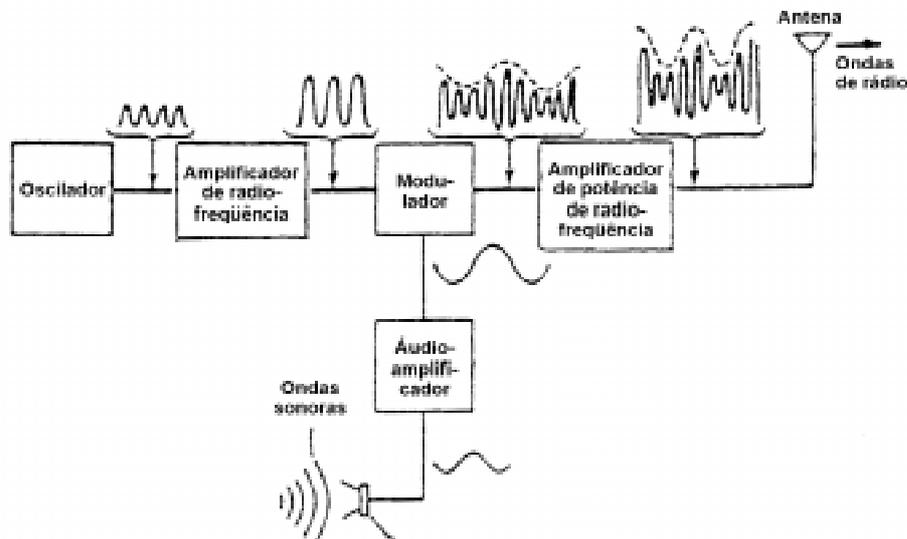
- Modulação em Amplitude;
- Modulação em Freqüência; e
- Modulação em Pulsos.

Na **modulação em amplitude (AM)**, a amplitude da **onda portadora** (onda de radiofreqüência) é modificada pela amplitude da **onda moduladora** (geralmente, porém nem sempre, uma onda de audiofreqüência). A figura 34.22 mostra este tipo de modulação. O processo no transmissor é o seguinte: após terem sua potência aumentada no **amplificador de áudio**, as ondas sonoras vão ao **modulador**, onde essa corrente elétrica de baixa freqüência é somada à corrente elétrica de alta freqüência das ondas de radiofreqüência que vêm do **amplificador de RF**. Ou seja, a modulação se dá pela soma das amplitudes das duas ondas. A corrente elétrica que sai do **modulador** é, então, a soma das duas ondas (a onda de áudio mais a onda de radiofreqüência). Esta onda, após mais um estágio de amplificação, é transmitida pela **antena** (figura 34.23). No receptor, o sinal é **demodulado**, pela remoção da onda moduladora que, em caso de voz irradiada, é amplificada e, então, relatada ao ouvinte através de um alto-falante. Este tipo de modulação é bastante comum, sendo a forma usual de modulação na faixa de irradiação das estações comerciais **AM**.

**Figura 34.22 - Modulação em Amplitude**

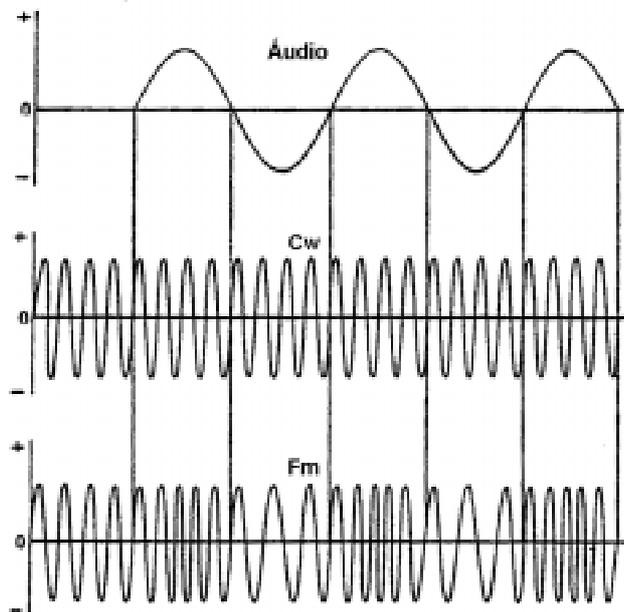


**Figura 34.23 - Diagrama em Bloco de um Transmissor de Onda Modulada em Amplitude (AM)**

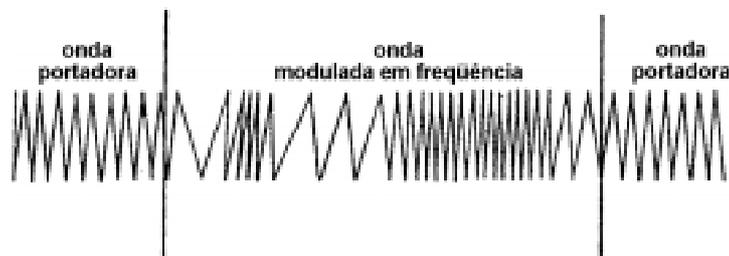


Na **modulação em frequência (FM)**, a frequência da onda **portadora** é modificada pela frequência da onda **moduladora** (geralmente, mas nem sempre, uma onda de **audiofrequência**), conforme mostrado nas figuras 34.24 e 34.25. É a modulação da onda de radiofrequência (portadora) de maneira que sua frequência instantânea difere da frequência da onda de áudio (moduladora) de uma quantidade proporcional à amplitude instantânea da moduladora. Este tipo de modulação é usado pelas estações de rádio comerciais em **FM** e, também, pelos canais de som das estações de TV. Uma outra modalidade de modulação em frequência é a denominada **modulação em fase (PhM = “phase modulation”)**. Neste modo, o ângulo de fase da **portadora** é desviado de seu valor original de uma quantidade proporcional à amplitude da **moduladora**.

**Figura 34.24 - Modulação em Frequência**



**Figura 34.25 - Onda Modulada em Frequência**



Na **modulação por pulsos (PM)** não existe onda moduladora. A onda contínua é transmitida de forma interrompida. Pulsos extremamente rápidos de energia são transmitidos, seguidos por períodos relativamente longos de “silêncio”, durante os quais não há transmissão. A figura 34.26 mostra este tipo de modulação, que é usado na maioria dos radares de navegação marítima, inclusive radares de busca de superfície. A modulação por pulsos é, também, empregada em alguns auxílios eletrônicos de longo alcance, dos quais o mais conhecido é o LORAN.

Figura 34.26 - Modulação por Pulsos



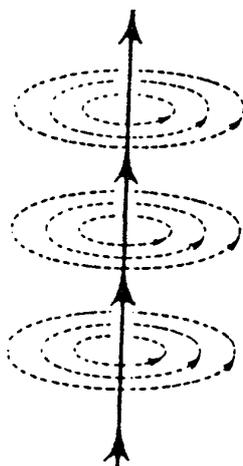
## b. TRANSMISSÃO DAS ONDAS DE RÁDIO. ANTENAS DE TRANSMISSÃO

Como já mencionado anteriormente, a onda eletromagnética é gerada em um oscilador. No caso das ondas de rádio, a saída do oscilador é reforçada em potência por um amplificador, sendo, então, modulada na unidade moduladora. Na transmissão por voz, a unidade moduladora incorpora um microfone, que converte a onda sonora em onda moduladora. A onda de rádio, agora modulada, vai a um segundo amplificador e é, finalmente, transmitida para o espaço através de uma antena. Se a esses componentes juntarmos uma fonte de energia e um recurso para controlar a frequência da onda gerada pelo oscilador, teremos todos os componentes de um transmissor (cujo diagrama em bloco é mostrado na figura 34.23).

Os tipos de transmissão e as designações das emissões de rádio constam do Apêndice a este Capítulo.

Quando uma corrente elétrica percorre um condutor, cria-se em torno dele, como vimos, um campo magnético. Se o condutor está na vertical e o deslocamento dos elétrons é de baixo para cima, conforme mostrado na figura 34.27, o sentido do campo magnético é o contrário ao dos ponteiros de um relógio. Mudando-se a polaridade da corrente elétrica, o sentido do campo magnético se inverterá, ou seja, será o sentido horário. Este é o princípio de irradiação de uma antena transmissora vertical. Devido à rapidez com que se produzem, os campos eletromagnéticos formam-se junto à antena, libertam-se e se propagam no espaço em ondas concêntricas, com a velocidade da luz. Já foi dito, também, que o campo elétrico e o campo magnético são perpendiculares. Portanto, se o campo magnético é horizontal, o campo elétrico será vertical, ou seja, a onda é polarizada verticalmente.

Figura 34.27 - Campo Magnético Gerado por um Condutor (Antena) Percorrido por uma Corrente Elétrica



Para uma antena vertical, a potência do sinal é a mesma em todas as direções horizontais. A menos que a polarização passe por uma mudança durante o percurso da onda, sinais mais fortes serão recebidos de uma antena vertical quando a antena receptora também for vertical.

Para baixas frequências, a irradiação de um sinal acontece pela interação da antena com a terra. Para uma antena vertical, a eficiência aumenta com o seu maior comprimento. Para uma antena horizontal, a eficiência aumenta com a maior distância entre a antena e a terra.

Na prática, a eficiência máxima de uma antena horizontal se dá quando a distância antena-terra é a metade do comprimento da onda. Esta é a razão porque se elevam as antenas de baixas frequências a grandes alturas. Entretanto, para as frequências mais baixas, essa elevação se torna impraticável. Por exemplo, para uma frequência de 10 kHz ela teria que ser elevada a uma altura de cerca de 8 milhas náuticas (metade do comprimento da onda). Por isso é que há dificuldades para projetar antenas eficientes para baixas frequências.

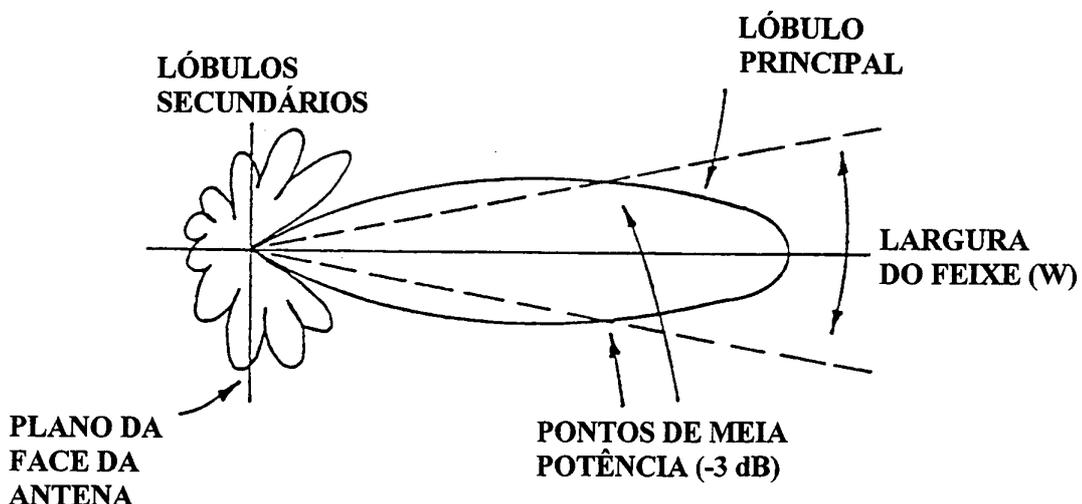
Para frequências mais altas, uma das saídas não é ligada à terra. Ambas as saídas do amplificador final de radiofrequência são ligadas a uma antena dipolo (bipolar). Essa antena não é somente eficiente, como, também, altamente direcional, aumentando, assim, a potência do sinal transmitido numa determinada direção. As antenas dipolo de meia onda, tanto as horizontais, como as verticais, são antenas direcionais. Seus máximos de irradiação ocorrem perpendicularmente às antenas. O mínimo, ou nulo, está alinhado com o eixo da antena.

Assim, a energia irradiada de uma antena é distribuída no espaço segundo **padrões de irradiação**, compostos de **lóbulos** e **nulos**.

O projeto de uma antena direcional busca tornar os lóbulos laterais, ou secundários, os menores possíveis (figura 34.28). Alguns parâmetros que influem nos padrões de irradiação das antenas são:

- Polarização;
- ganho da antena; e
- largura de feixe.

**Figura 34.28 - Diagrama de Irradiação**



A **polarização** de uma antena é dada pela direção do campo elétrico em relação à Terra.

O **ganho** da antena é a relação entre as tensões produzidas, em um determinado ponto, pela antena considerada e uma antena isotrópica. O ganho é, em geral, expresso como uma relação entre potências; é, então, proporcional ao quadrado da relação entre tensões. Uma antena com ganho 2 terá, portanto, um ganho de potência 4. Isto significa que, para produzir igual intensidade de campo na mesma distância, uma antena isotrópica teria que ser alimentada com uma potência quatro vezes maior. Os valores típicos de ganhos de antenas variam de 100 a 10.000 (20 dB a 40 dB).

A **largura de feixe (W)** de uma antena é a medida angular entre as direções nas quais a potência transmitida ou recebida é a metade da potência máxima do lóbulo. Esses são chamados pontos de 3 dB. O Apêndice a este Capítulo traz uma informação sobre decibel (dB) e seu uso.

Algumas considerações sobre a relação existente entre ganho, tamanho da antena e largura de feixe podem ser úteis. Para uma determinada frequência, o ganho cresce com a área da antena numa razão aproximadamente direta. Do mesmo modo, qualquer dimensão de uma antena aumentada causará um estreitamento do feixe. Podemos ver, portanto, que antenas grandes estão normalmente associadas a ganho elevado e feixe estreito.

É importante observar que o tamanho de uma antena é um valor que dependerá da frequência utilizada. Na realidade, o fator importante é o comprimento de onda empregado, comparado às dimensões físicas da antena. Uma determinada dimensão pode ser considerada grande para uma frequência e pequena para outras. Concluímos, portanto, que duas antenas de dimensões diferentes podem ter o mesmo ganho e largura de feixe, desde que a menor delas opere com frequência maior e, conseqüentemente, menor comprimento de onda.

Deve-se ter em mente que uma antena pode receber e irradiar energia fora de sua largura de feixe, por intermédio de seus lóbulos laterais ou secundários. Este é um ponto importante a ser considerado.

### c. RECEPTORES E ANTENAS DE RECEPÇÃO

O receptor de rádio é um equipamento projetado para converter a onda de rádio em uma forma adequada de recebimento de informações. Ele deve ser capaz de selecionar as ondas portadoras de uma frequência desejada; demodular a onda; amplificá-la, se necessário; e apresentar a informação recebida de uma forma utilizável.

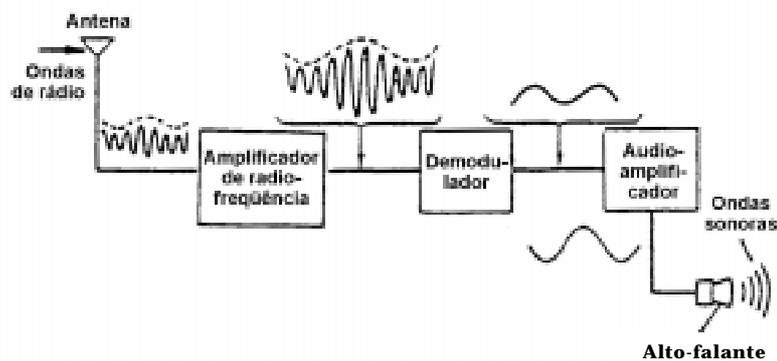
A saída do receptor pode ser através de fones de ouvido, de alto-falante, ou, ainda, de um mostrador, anteriormente constituído, em muitos sistemas, por uma válvula de raios catódicos (VRC), hoje substituída, nos modernos equipamentos eletrônicos de navegação, por um mostrador LCD (“liquid crystal display”).

Um receptor deve incorporar os seguintes componentes básicos:

- Antena, para converter a onda de rádio recebida em corrente elétrica;
- demodulador, para separar a onda moduladora da portadora; e
- mostrador (“display”), que apresenta a informação de uma forma utilizável.

A figura 34.29 mostra o diagrama de um receptor de fonia. As ondas eletromagnéticas que vêm do transmissor, ao baterem na antena, imprimem uma pressão elétrica, que provoca uma corrente alternada de intensidade muito fraca. Essa corrente é, então, aumentada de intensidade pelo amplificador de radiofrequência. Daí, ela é levada ao demodulador, onde são separadas as radiofrequências das audiofrequências, ou seja, a corrente alternada de audiofrequência que contém a mensagem é separada da portadora. A corrente de audiofrequência é levada ao amplificador de áudio, que lhe aumenta a potência, e, por fim, no alto-falante são emitidas ondas sonoras (que correspondem às ondas sonoras que incidem no microfone do transmissor).

**Figura 34.29 – Diagrama em Bloco de um Receptor de Fonia (RF Sintonizada)**



Os receptores devem possuir uma série de qualidades para que desempenhem a contento as tarefas para as quais foram construídos:

1. A **faixa de frequências** deve estar de acordo com as ondas eletromagnéticas que deve receber;
2. deve possuir a capacidade de separar sinais da frequência desejada de outros sinais de frequências aproximadas; a essa característica dá-se o nome de **seletividade**;
3. **sensibilidade**: deve possuir meios para detectar e amplificar um sinal fraco, de maneira a extrair as informações desejadas;
4. **estabilidade**: é a capacidade de resistir à derivação das condições ou valores nos quais foi sintonizado, permanecendo na frequência em que foi ajustado; e
5. **fidelidade**: deve repetir exatamente as características essenciais do sinal original (precisão na reprodução das características da onda moduladora original).

Algumas dessas características podem ser conflitantes. Por exemplo, se aumentarmos demais a seletividade de um receptor, podemos causar uma perda de fidelidade; se diminuirmos ao máximo uma abertura de faixa de um receptor de radiofonia, poderá acontecer do mesmo não receber todas as frequências de áudio, e os sons mais graves e os mais agudos poderão não ser apresentados no alto-falante.

Os receptores podem possuir dispositivos adicionais, como controle automático de volume, que se destina a minimizar os efeitos do “**fading**”; controle automático de ruídos, que tem como finalidade diminuir os ruídos de fundo; etc.

Os sinais indesejáveis na recepção de uma onda denominam-se **interferências**. As interferências podem ser produzidas pelo homem, intencionalmente ou não, ou por fontes naturais. As interferências intencionais, no sentido de obstruir as comunicações, ou interromper

a transmissão ou recepção de informações, tais como o bloqueio, são objeto da Guerra Eletrônica. As interferências produzidas pelo homem não intencionalmente e as de fontes naturais denominam-se **ruídos**.

Os ruídos do próprio receptor (ruídos internos) são provocados pelos circuitos de corrente alternada, pela vibração de elementos eletrônicos, por maus contatos ou componentes defeituosos, etc. Os ruídos externos produzidos pelo homem não intencionalmente são provenientes de motores elétricos, geradores e outros equipamentos elétricos e eletrônicos. Geralmente, eles diminuem com o aumento da frequência, com exceção da ignição de motores, que tem sua máxima interferência na faixa de frequências muito altas (VHF). Esses ruídos podem ser diminuídos pela aplicação de filtros ou pela blindagem do aparelho. Os ruídos de fontes externas não produzidos pelo homem são os ruídos atmosféricos, os ruídos cósmicos e ruídos térmicos. Os ruídos atmosféricos também são conhecidos como **estática** e provêm de descargas elétricas naturais. No globo terrestre, por segundo, ocorrem cerca de 100 relâmpagos, em sua maioria na faixa tropical da Terra. Eles se apresentam na saída do receptor como um murmúrio, sendo que os mais próximos apresentam-se como estalidos. Eles ocorrem em todas as frequências, mas diminuem com o aumento da mesma. Acima de 30 MHz, geralmente, não apresentam problemas. Os ruídos cósmicos são os provenientes da emissão rádio de várias fontes da galáxia, inclusive do Sol. Os ruídos térmicos são produzidos pela atmosfera aquecida e pela superfície da Terra.

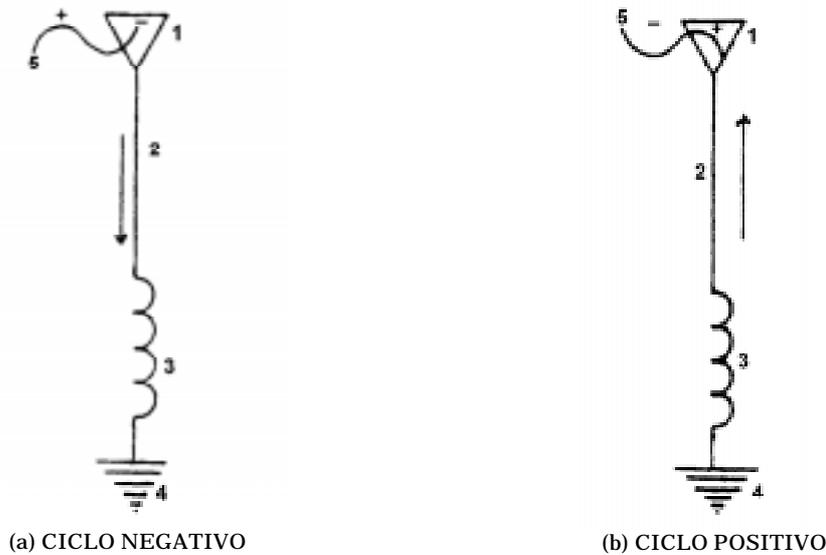
O total desses ruídos soma-se na saída do receptor: ruídos de fontes externas + ruídos do próprio receptor. Melhorando os componentes de fabricação e adequando os circuitos, introduzindo filtros nas fontes de ruídos produzidos pelo homem e escolhendo apropriadamente a frequência, pode-se ter uma recepção mais livre de interferências.

Quando uma onda de rádio incide em uma antena, nela imprime uma pressão elétrica. Contudo, o fato de existir uma voltagem na antena não significa que ela esteja sendo percorrida por uma corrente elétrica. Para que haja essa corrente é preciso que a pressão elétrica seja maior num lado que no outro da antena, ou seja, que exista uma diferença de potencial entre as extremidades da antena. Então, os elétrons escoarão do local onde estão em excesso, para o local onde estão em falta, produzindo a corrente elétrica.

Na figura 34.30a, temos um sistema antena-terra, onde (1) é a antena, (2) o condutor da mesma, (3) o primário do transformador dentro do receptor e (4) a terra que fecha o circuito. A curva (5) representa um ciclo da onda de radiofrequência que, em sua propagação pelo espaço, encontrou a antena. Nessa figura, o ciclo da onda que encontrou a antena é negativo, logo, transfere à mesma elétrons, que descerão da antena para terra, criando uma corrente elétrica no sentido da seta. Quando passar o próximo ciclo da onda, agora positivo, a antena ficará carregada positivamente em relação à terra. E, como cargas de nomes contrários se atraem, os elétrons da terra sobem e, assim, criam uma corrente no sentido ascendente (figura 34.30b). É fácil identificar o sentido da corrente elétrica na antena unifilar vertical aplicando a lei da atração e repulsão das cargas elétricas: sendo o semiciclo negativo, os elétrons da onda repelem os elétrons “livres” da antena e a corrente tem sentido de cima para baixo. No semiciclo positivo, como as cargas elétricas de sinais contrários se atraem e a maior carga de elétrons está na terra, o sentido da corrente da antena é de baixo para cima.

Este é o princípio da antena unifilar vertical, que auxilia a compreender o funcionamento das antenas de recepção. Os outros tipos de antena de recepção (unifilar horizontal, parabólica, em quadro, etc.) serão mencionados ao estudarmos os equipamentos que as usam.

**Figura 34.30 - Antena de Recepção Unifilar Vertical**

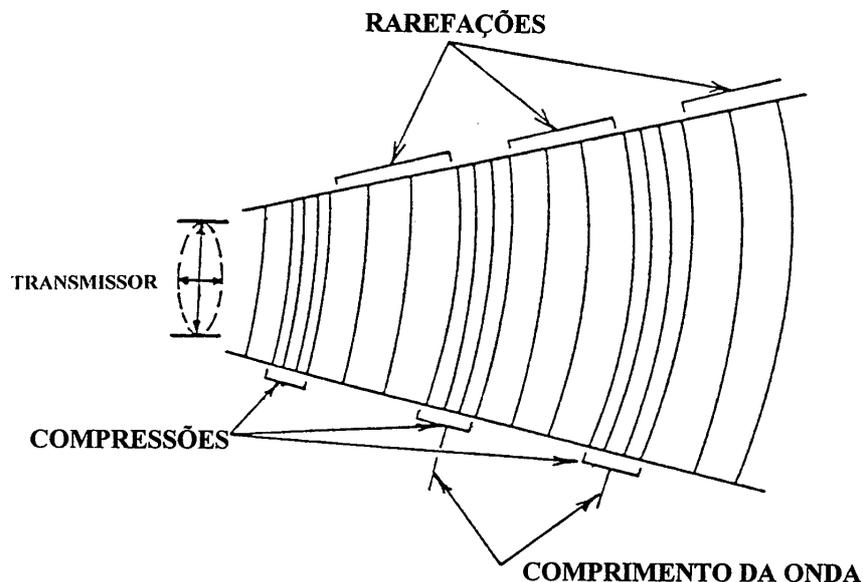


## 34.6 ONDAS ACÚSTICAS

As **ondas acústicas** propagam-se com vantagens (em relação às ondas EM) no meio aquático. Assim, dominam completamente os sistemas desenvolvidos para atuar nos oceanos.

A **onda acústica** é uma forma de energia mecânica, que se propaga pelo movimento de partículas ou moléculas. Entretanto, uma onda sonora não transporta matéria, mas sim energia. Se imaginarmos um diafragma imerso em água, como o representado pela figura 34.31, ao qual é imprimida, mecânica ou eletricamente, uma vibração, observa-se a formação de regiões de compressão e rarefação, na medida em que o diafragma oscila entre suas posições extremas. As partículas comprimidas, agindo sucessivamente sobre as camadas adjacentes, propagam esse efeito, fazendo com que ele se afaste da fonte de perturbação.

**Figura 34.31 - Representação das Ondas Acústicas**



Se considerarmos uma molécula individual na água, quando a primeira perturbação a atinge, ela se move primeiro numa direção e depois em sentido oposto. Ela, de fato, tende a manter a sua posição média de repouso, vibrando em torno dela à semelhança das moléculas do diafragma. Evidentemente, outras causas, tais como as correntes, poderão provocar uma variação dessa posição média; as vibrações causadas pelo diafragma, entretanto, não o farão.

A vibração molecular ocorre na direção de propagação da onda, motivo pelo qual as ondas acústicas são chamadas de ondas longitudinais. No entanto, nem todas as ondas mecânicas são longitudinais, como é o caso, por exemplo, das ondas superficiais, na interface água/ar. Neste caso, as moléculas se movem perpendicularmente à direção de propagação. Como no caso das ondas EM, não há movimento vibratório resultante na direção de propagação das ondas; apenas o efeito e a energia se propagam.

A velocidade de propagação das ondas sonoras é muito menor do que a velocidade da luz. Elas viajam na água com uma velocidade de 1.500 m/seg, mais ou menos 3%, dependendo da temperatura, salinidade e pressão. Este valor é cerca de duzentas mil vezes menor que a velocidade de propagação das ondas EM.<sup>2</sup>

O comprimento de onda de uma onda sonora guarda com a freqüência o mesmo tipo de relação já apresentado para as ondas eletromagnéticas:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Onde  $v$  é a velocidade do som na água.

Como a velocidade do som na água varia mais que a velocidade da luz, os comprimentos de uma onda sonora serão, correspondentemente, mais variáveis. Do mesmo modo, devido à menor velocidade do som, o comprimento da onda sonora é muito menor do que o de uma onda EM de mesma freqüência. Por exemplo, para uma freqüência de 10.000 Hz, uma onda sonora terá o comprimento de 15 cm, enquanto o da onda EM será de 30 km.

A medida do grau de compressão ou rarefação de uma onda sonora é a pressão, normalmente tomada em microbares (1 microbar = 1 din/cm<sup>2</sup> = 14.5 x 10<sup>-6</sup> psi).

Uma representação pressão x distância ao longo de uma onda sonora teria a mesma forma senoidal das ondas eletromagnéticas.

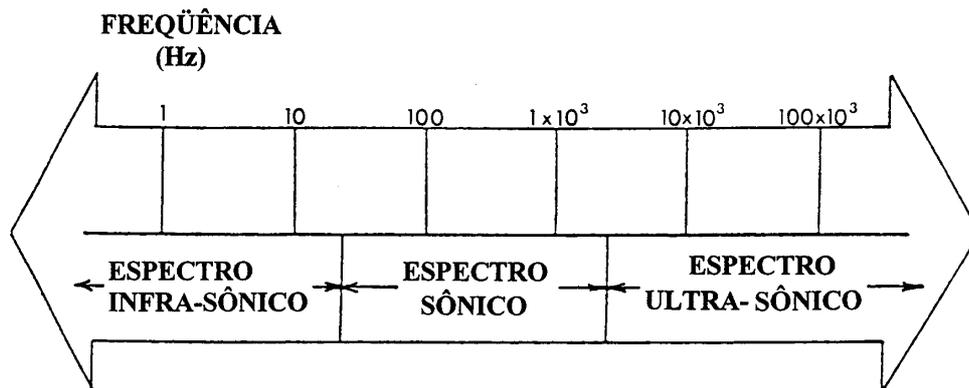
## 34.7 O ESPECTRO ACÚSTICO

A figura 34.32 apresenta o **espectro** acústico, que se estende de zero até cerca de 100 kHz. Existem três divisões principais dentro dessa faixa:

A região de 0–20 Hz é chamada de infra-sônica ou subsônica; de 20–20.000 Hz tem-se a região sônica; acima de 20.000 Hz, a região ultra-sônica. As freqüências sônicas são aquelas que o ouvido humano pode detectar. Na prática, poucos indivíduos podem alcançar qualquer dos extremos dessa faixa.

<sup>2</sup> A velocidade de propagação do som no ar é de cerca de 330 m/seg; no aço, alcança 6.000 m/seg. A resistência acústica da água é de 1.5 x 10<sup>5</sup> g/cm<sup>2</sup> . seg, enquanto que a do ar é muito mais baixa (42 g/cm<sup>2</sup> . seg).

Figura 34.32 - O Espectro Acústico



Os ecobatímetros e sonares empregados na navegação utilizam, em sua maioria, a faixa mais elevada do espectro sônico (de 12 kHz para cima) e o espectro ultra-sônico (especialmente a faixa de 50 a 200 kHz).

É na região sônica que, em sua maioria, os sonares navais – ativos e passivos – operam. Em geral, os passivos na parte inferior (20 – 5.000 Hz) e os ativos na parte superior (1 kHz – 20 kHz). Existe alguma superposição, uma vez que é possível projetar sonares que podem operar em ambos os modos e na mesma frequência.

## 34.8 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS X ONDAS ACÚSTICAS

Podemos, neste ponto, alinhar algumas semelhanças e diferenças entre as ondas EM e as sonoras. Ambas envolvem a propagação de efeitos mensuráveis e sua energia, através de um meio. Esses efeitos – pressão, campo elétrico e campo magnético – variam de forma senoidal. Tanto as ondas EM como as sonoras caracterizam-se por uma frequência e um comprimento de onda, que se relacionam de forma inversa com uma constante de proporcionalidade igual à velocidade de propagação do efeito considerado:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Talvez a maior diferença entre elas seja o fato de que as ondas EM se propagam no vácuo e as sonoras não. Entretanto, num meio como os oceanos, as ondas sonoras apresentam ótimas condições de propagação. Uma outra diferença significativa é a que existe entre as velocidades de propagação da onda EM e da sonora (como vimos, as ondas eletromagnéticas propagam-se com uma velocidade cerca de 200.000 vezes maior). Poderíamos, ainda, citar as seguintes diferenças:

- As ondas sonoras são longitudinais, ao passo que as EM são transversais;
- a onda EM tem sempre dois efeitos mensuráveis presentes: os campos elétrico e magnético;
- para uma dada frequência, os comprimentos da onda sonora são muito menores que os das ondas EM; e
- a velocidade do som e, conseqüentemente, os comprimentos de ondas sonoras são mais variáveis do que nas ondas EM.

## 34.9 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ACÚSTICAS

Os efeitos que afetam a propagação das ondas acústicas e interessam diretamente ao desempenho dos sistemas e sensores utilizados em navegação são:

- **Dispersão;**
- **absorção;**
- **reflexão;** e
- **refração.**

Tanto as ondas EM como as sonoras estão sujeitas a esses efeitos ou fenômenos. Dependendo da natureza e das fronteiras do meio e da frequência da onda, alguns desses fenômenos predominam sobre os outros.

### a. DISPERSÃO

A atenuação da propagação de uma onda se processa de duas formas: por **dispersão** e por absorção. A energia disponível para a obtenção de um eco decresce com a distância, porque o impulso se **dispersa** à medida que se afasta da fonte. A queda de intensidade da energia irradiada é proporcional ao quadrado da distância percorrida. Se considerarmos que a energia refletida que produz um eco percorre a distância nos **dois sentidos**, vemos que a intensidade do sinal varia na **razão inversa da quarta potência da distância**. Assim, a intensidade do som é rapidamente atenuada na água. Por isso, usam-se feixes direcionais nos ecobatímetros e sonares.

### b. ABSORÇÃO

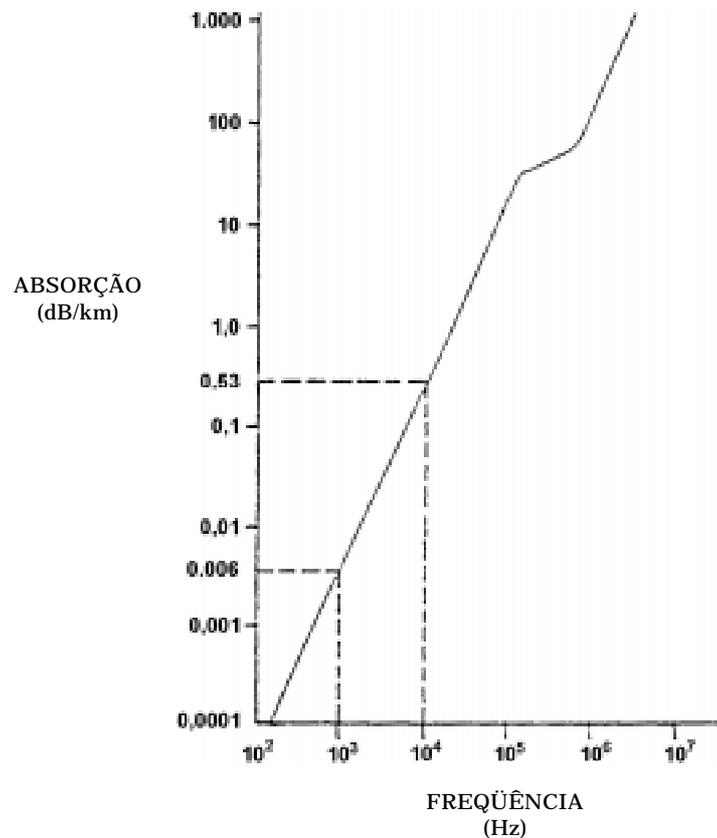
A propagação de ondas através de qualquer meio diferente do vácuo é sempre acompanhada de perdas causadas pela **absorção de potência pelas partículas do meio**. Assim, apenas as ondas EM, ao se propagarem pelo vácuo, não são atenuadas pela absorção.

As **ondas sonoras** perdem uma pequena parcela de energia para cada partícula do meio. Esta energia perdida para o meio pode ser considerada como uma **dissipação de calor**, da qual resultará um crescimento do movimento aleatório das partículas ambientais. Embora vários fatores, como a salinidade e o espalhamento, influenciem a absorção das ondas sonoras ao se propagarem no mar, o fator predominante é a frequência. A figura 34.33 apresenta uma curva de variação da absorção pelo oceano, em função da frequência. Pode ser identificado na curva o **aumento substancial da absorção com o aumento da frequência**, razão pela qual as **frequências elevadas não são utilizadas em sistemas-sonar de longo alcance**. Quanto menor a frequência, menor a absorção e o ecobatímetro, ou sonar, de navegação que opera em baixa frequência terá maior alcance.

### c. REFLEXÃO

A reflexão das ondas acústicas é fator indispensável para o funcionamento dos sensores ativos, como o ecobatímetro e o sonar “doppler”. Além do próprio alvo, devem ser consideradas, no estudo da reflexão das ondas sonoras, as superfícies que limitam a sua propagação, no caso, a superfície e o fundo do mar. Dependendo da profundidade, características do fundo e potências envolvidas, as ondas sonoras podem sofrer várias reflexões entre a superfície e o fundo.

**Figura 34.33 - Absorção X Frequência**



A presença de corpos estranhos no meio, tais como partículas em suspensão, algas, peixes, bolhas, etc., causa um espalhamento da energia sonora. A quantidade de energia espalhada é função do tamanho, densidade e concentração das partículas, bem como da frequência da onda sonora. A parcela da energia sonora espalhada que retorna à fonte, toma o nome de **reverberação**.

A reverberação decorrente da reflexão das ondas sonoras nesses corpos estranhos ao meio é a chamada **reverberação de volume ou de meio**. Este tipo ocorre, principalmente, a distâncias relativamente grandes, pois é causada, na sua maior parte, pelas camadas mais profundas. A **reverberação de volume** independe das condições de vento, estado do mar ou sua estrutura térmica.

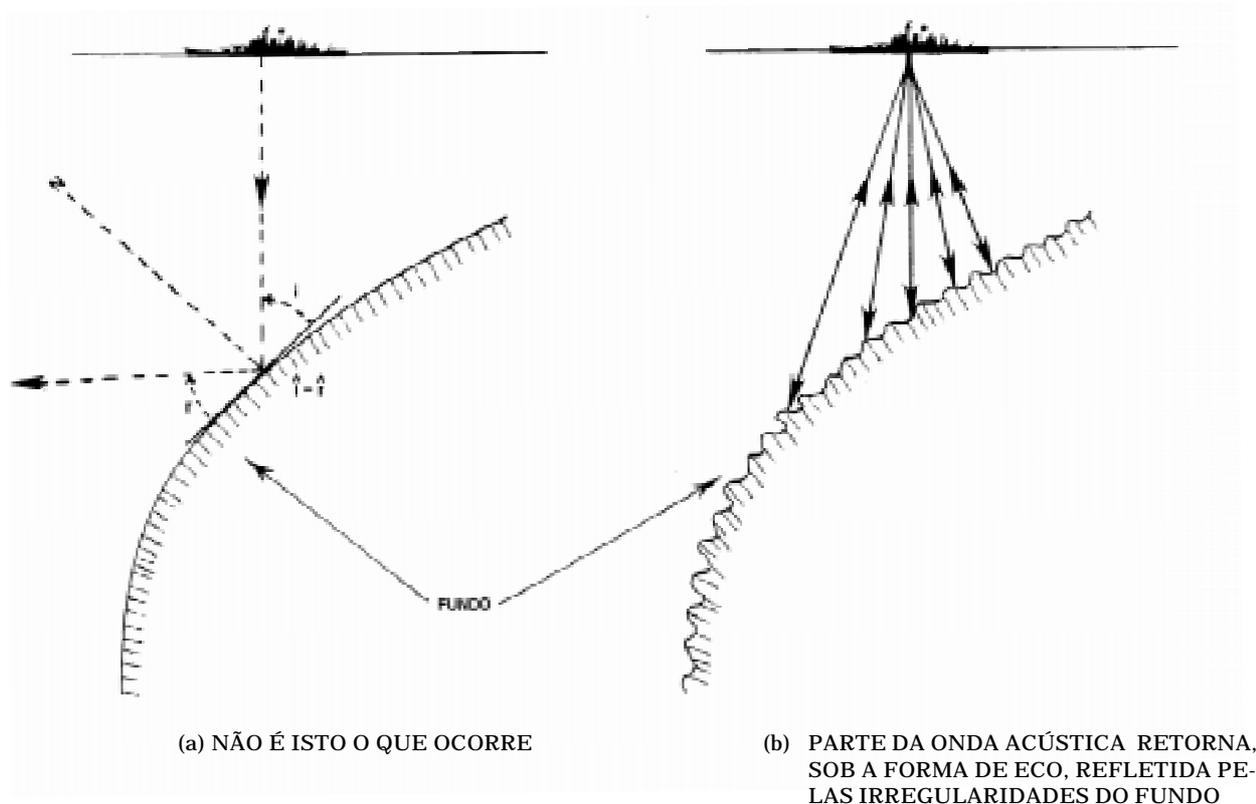
O outro tipo a considerar é a **reverberação de limite**. Entenda-se aqui por limite as barreiras físicas que confinam a propagação do som na água: o fundo e a superfície do mar. As **reverberações de superfície** diminuem com a distância (inversamente proporcional ao cubo da distância) e aumentam com o estado do mar, não só pela maior quantidade de bolhas na superfície como, também, pela reflexão desordenada dos raios sonoros que chegam a ela, fazendo com que grande quantidade deles retorne à fonte.

A **reverberação de fundo** sofre influência da natureza e irregularidades do fundo e do próprio comprimento de onda. Além da absorção pelo fundo de uma considerável parcela de energia, dependendo das suas características e do ângulo de incidência da frente de onda, poderá ocorrer, ou não, um deslocamento de fase no fundo. A reverberação de fundo assume importância quando operando em águas rasas (menos de 200 metros). Um fundo de pedra, coral ou conchas é uma fonte potencial de reverbe-

ração, ao passo que a areia funciona como um bom refletor, permitindo que a maior parte da energia siga a sua trajetória. Um fundo de lama não causará reverberação digna de nota, porém atuará como absorvente de energia sonora.

Na reflexão das ondas acústicas no fundo, o ângulo de incidência ( $i$ ) é igual ao ângulo de reflexão ( $r$ ). Então, poderia ocorrer com o feixe transmitido por um ecobatímetro o mostrado na figura 34.34a. No entanto, em virtude das irregularidades do fundo, parte do feixe retorna ao transdutor, sob a forma de eco, conforme ilustrado na figura 34.34b.

**Figura 34.34 - Reflexão das Ondas Acústicas no Fundo**



Como vimos, na propagação das ondas acústicas na água, observam-se reflexões do som por obstáculos existentes no meio líquido, menores que o comprimento da onda sonora. Este fenômeno é denominado **“scattering”** (dispersão ou espalhamento). Os pequenos obstáculos funcionam como se fossem fontes puntiformes geradoras de som, irradiando ecos para todas as direções (ondas esféricas).

Outros obstáculos são os peixes, pois suas bexigas natatórias, cheias de ar, refletem as ondas sonoras. O eco de um cardume muito denso, próximo do transdutor e longe do fundo, pode obstruir completamente o eco do fundo, mascarando a indicação do ecobatímetro. Entretanto, geralmente, mesmo com a presença de cardumes pode-se identificar o eco do fundo.

Na entrada da plataforma continental, normalmente entre 400 e 1.000 metros de profundidade, costuma aparecer uma camada de origem biológica, denominada **“deep scattering layer”** – DSL (camada de dispersão profunda), que reflete o feixe sonoro transmitido por um ecobatímetro, podendo causar indicações erradas de profundidade. A DSL é observada em todos os oceanos, exceto nas altas Latitudes do Ártico e da Antártica.

A DSL é formada por zooplânctons, principalmente copépodos e eufausídeos. As DSL migram, seguindo uma linha de isoluminosidade, buscando uma luminosidade ótima (são repelidas por uma luminosidade forte e atraídas por uma luminosidade fraca). De noite, estão mais próximas da superfície; durante o dia, deslocam-se para profundidades maiores (400 a 600 metros). Sabemos que quanto mais baixa a frequência da onda sonora, maior o comprimento de onda e, assim, maiores devem ser os obstáculos (zooplânctons) para refletirem o som. Desta forma, frequências mais baixas conseguem penetrar na DSL e indicar corretamente o fundo.

#### d. REFRAÇÃO DAS ONDAS ACÚSTICAS

Sempre que uma frente de onda – seja ela EM ou sonora – se propaga por um meio onde ocorre uma variação de densidade, haverá um encurvamento do feixe. Dos dois meios considerados – atmosfera e oceano – o segundo é o mais variável. Assim, a refração das ondas sonoras assumem papel importante na propagação nesse meio. Em última análise, a causa da refração é a variação da velocidade de propagação. A velocidade do som é função da temperatura, salinidade e pressão da água do mar, guardando proporção direta com a variação de qualquer desses fatores. À medida que o som se propaga em um determinado meio, sofre encurvamentos na direção das regiões em que a velocidade é menor (Lei de Snell: os senos dos ângulos de incidência e de refração são proporcionais, respectivamente, às velocidades de propagação nos meios considerados).

As maiores variações de temperatura ocorrem nas profundidades menores, até cerca de 1.000 metros. Nesta faixa, a velocidade do som varia quase proporcionalmente à temperatura. Abaixo dessa profundidade, a temperatura é quase constante, e as variações são causadas, principalmente, pela pressão. A combinação desses efeitos faz, geralmente, que um raio sonoro seja inicialmente encurvado para baixo, em direção às maiores profundidades, até um ponto em que essa tendência se inverte e o raio começa a se encurvar para cima. Se a profundidade local for suficiente, o raio poderá sofrer refrações sucessivas nas regiões profundas e na superfície, guardando certa semelhança com as reflexões sucessivas entre os limites – fundo e superfície. A grande diferença entre os dois fenômenos é que, no caso da **refração**, desenvolve-se um efeito de focalização dos raios sonoros, à medida em que eles se aproximam da superfície. Esse efeito, chamado de **convergência**, cria uma região, de forma anular, que circunda a fonte, chamada **zona de convergência**, onde a intensidade sonora é maior do que nas regiões vizinhas (figura 34.35).

A trajetória de um feixe sonoro ao se deslocar na massa líquida irá depender das propriedades da área considerada (temperatura, salinidade e pressão) e do seu perfil de velocidade do som. Essa trajetória pode variar desde uma simples linha reta até configurações bastante complexas. Poderemos, para facilidade de raciocínio, imaginar que a massa líquida é composta de uma série de camadas superpostas, nas quais a temperatura, pressão e salinidade, e, conseqüentemente, a velocidade do som, são constantes. Teremos, assim, uma série de pequenas separações que, justapostas, formariam o encurvamento final do feixe (figura 34.36). Esta figura mostra um perfil de temperatura negativo, com o conseqüente encurvamento do feixe para baixo. Caso se tratasse de um perfil positivo, o encurvamento ocorreria em sentido contrário, isto é, para cima. O traçado apresentado é, na realidade, mera aplicação da Lei de Snell, que estabelece uma relação matemática entre a velocidade do som ( $V$ ), nas regiões limítrofes das camadas vizinhas, e o ângulo formado pelo feixe sonoro com aquela linha hipotética.

Figura 34.35 - Diagrama Típico de Trajetórias Sonoras

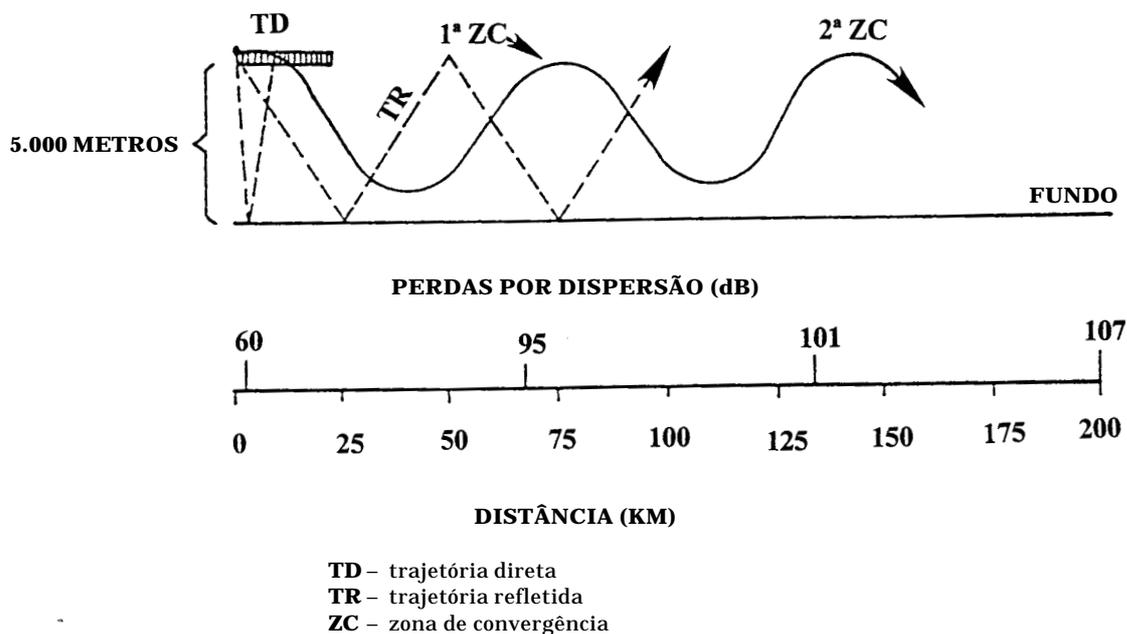
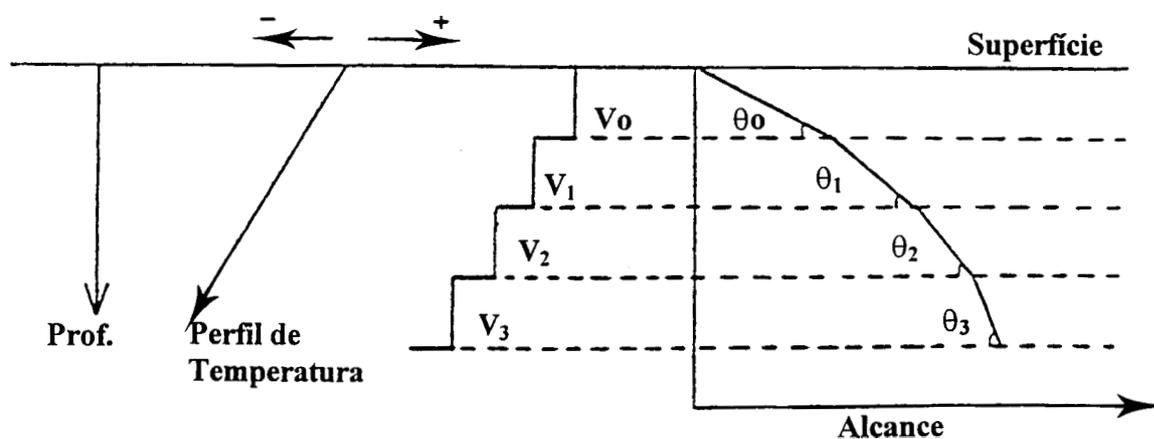


Figura 34.36 - Propagação em Camadas

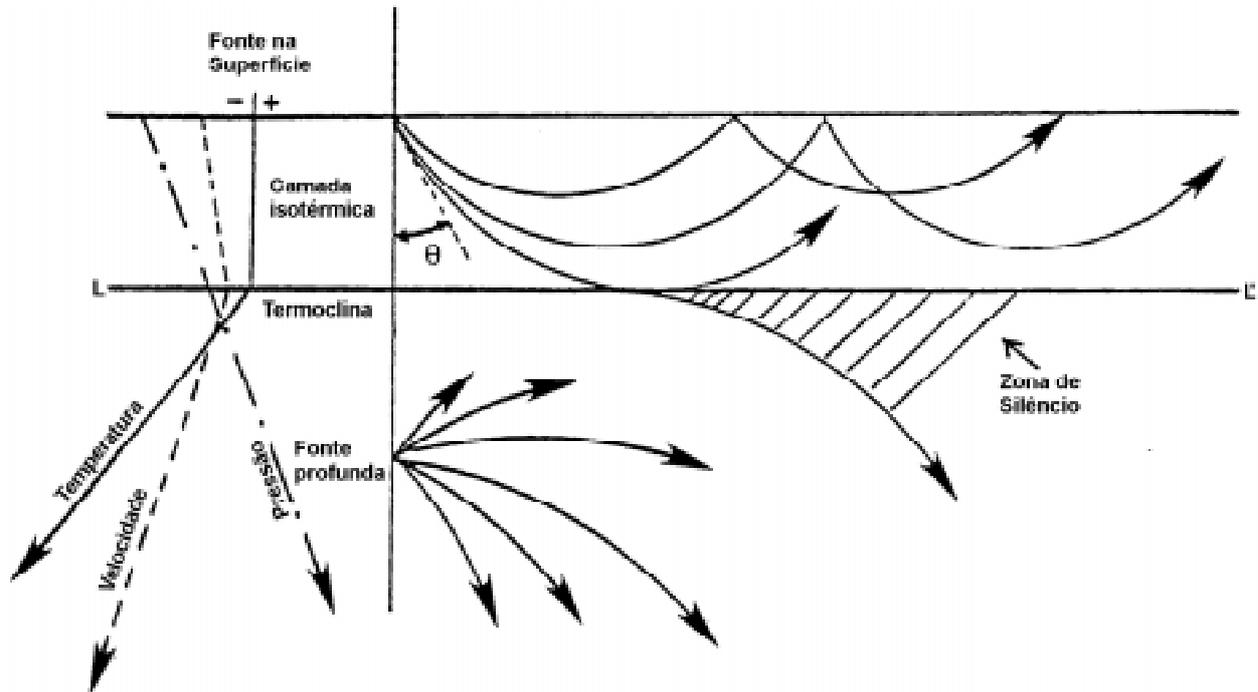


A figura 34.37 ilustra a discussão que será conduzida ao longo dos parágrafos seguintes. À esquerda da figura estão representados três perfis em relação à profundidade. Um deles, mostrado em linha cheia, é o gradiente de temperatura. Pode-se observar que a **temperatura é constante na camada mais próxima da superfície**. Esta temperatura constante, ou situação isotérmica, é causada pela ação misturadora dos ventos e ondas, sendo comum ao longo da maior parte dos oceanos. Abaixo dessa camada superficial, pode ser observada uma queda, aproximadamente constante, da temperatura.

O gradiente de pressão está representado pela linha interrompida (mista). A **pressão cresce constantemente com a profundidade**.

A combinação desses dois gradientes – temperatura e pressão – está representada pela linha tracejada, que representa o perfil de velocidade do som na água. Na

Figura 34.37 - Trajetórias Sonoras



camada superficial, a temperatura constante e o aumento de pressão causam um gradiente de velocidade ligeiramente positivo. Abaixo da camada isotérmica predomina o efeito da temperatura, produzindo um gradiente de velocidade resultante negativo (deixamos de considerar o efeito da salinidade, que é, normalmente, menos significativo). A linha LL', que separa a camada isotérmica da região abaixo dela, é chamada **termoclina**. No limite LL' (que, na realidade, não é uma linha definida), há uma inversão do gradiente de velocidade, passando de positivo a negativo.

A figura mostra o comportamento de raios emitidos por duas fontes sonoras, uma próxima da superfície e outra em profundidade maior. Podemos observar o comportamento de vários raios que se originam das duas fontes. Todos os raios emitidos pela fonte da superfície apresentam, inicialmente, enquanto percorrem a camada isotérmica, um raio de curvatura ascendente decorrente do gradiente ligeiramente positivo de velocidade. Os raios de menor inclinação com relação à vertical, ao atingirem o limite (LL'), ingressam na termoclina, onde seus raios de curvatura passam a ser descendentes devido ao gradiente negativo. As ondas acústicas emitidas por um ecobatímetro na vertical (isto é,  $\alpha = 0^\circ$ ) passam pela termoclina, sem refração notável.

Um raio de grande importância, pelas conseqüências que advêm do seu comportamento, é o que tangencia a fronteira LL'. Esse raio divide-se em dois, com parte da energia refratando de volta à superfície e parte penetrando na termoclina e dirigindo-se às águas mais profundas. Todos os raios com inclinação maior do que este serão refratados de volta à superfície, continuando com seu raio de curvatura ascendente, ao passo que os demais, com inclinação menor, penetrarão na termoclina e sofrerão a refração que os encurvará para baixo. Constata-se, portanto, uma **zona de silêncio**, na qual a presença de energia sonora é muito pequena. A profundidade na qual ocorre essa bifurcação do feixe sonoro é chamada de **profundidade de camada**, que se caracteriza pela presença de gradientes positivos ou isotérmicos, seguidos de um gradiente negativo. Os submarinos podem escapar à detecção navegando imediatamente abaixo da profundidade de camada.

Outro aspecto a observar é a possibilidade de que os raios de grande inclinação, portanto com curvaturas ascendentes, sejam aprisionados na camada isotérmica por reflexões sucessivas na superfície, formando os chamados **duto de superfície**. Quando tal fenômeno ocorre, as perdas por dispersão são menores, pois a dispersão passa a ser cilíndrica, proporcionando grandes alcances a pequenas profundidades (cota periscópica).

Um outro fenômeno decorrente da refração causada pela presença sucessiva de diferentes gradientes de velocidade é a formação de canais sonoros, que ocorrem a grandes profundidades, quando a um gradiente negativo se segue um isotérmico ou positivo. Este fenômeno é raro a pequenas profundidades. A existência desses canais tem grande significação para detecção a longas distâncias, havendo notícia de que já foram detectados sons de baixa frequência a distâncias de 10.000 milhas da fonte, graças às pequenas perdas por absorção e ao confinamento do feixe, proporcionando excelentes condições de propagação. O sistema SOFAR (“Sound Fixing and Ranging”) funciona baseado nesse fenômeno.

## 34.10 NOÇÕES SOBRE ECOBATÍMETROS E TRANSDUTORES

### a. ECOBATÍMETRO

O instrumento de propagação sonora mais simples e mais utilizado é o ecobatímetro. Um dispositivo do aparelho mede o tempo decorrido entre a emissão de um impulso sonoro e a recepção do seu eco, após refletir-se no fundo. Conhecendo-se esse tempo (cuja metade corresponderá ao tempo necessário para o impulso atingir o fundo) e assumindo-se uma velocidade média de propagação do impulso (em geral de 1.500m/s), obtém-se a profundidade local, diretamente mostrada de forma visual ou digital, ou, ainda, indicada em papel especial de registro (ou em um mostrador LCD), que apresenta o perfil do fundo.

A topografia submarina e a natureza do fundo exercem importante influência sobre o desempenho de um ecobatímetro. A propagação do som (e, conseqüentemente, a qualidade de recepção) dependerá da profundidade local, dos sedimentos que cobrem o leito submarino e do estado do mar. Os fundos de lama, por exemplo, refletem muito mal o som, enquanto os fundos de areia absorvem muito pouco a onda sonora, constituindo-se em ótimos elementos de reflexão. Em um mar muito agitado, a propagação também se efetuará de forma deficiente, não se podendo tirar partido de todas as possibilidades do aparelho. A energia sonora emitida por um ecobatímetro chegará ao fundo e nele estará sujeita à absorção e à difusão. Embora atenuada, a energia refletir-se-á no fundo, como eco, daí retornando à superfície, para refratar-se novamente para baixo.

Os transdutores dos ecobatímetros emitem o som em uma frequência controlada, através dos efeitos de piezoelectricidade ou de magnetostricção. No primeiro caso, uma lâmina de cristal é posta em vibração sob a ação de um campo elétrico alternativo. Na magnetostricção, uma corrente alternada circulando em um solenóide faz variar continuamente o comprimento de uma barra metálica, produzindo os pulsos acústicos.

Em consonância com o que foi visto no item anterior, podemos concluir que, sendo o coeficiente de absorção proporcional ao quadrado da frequência, essa relação torna-se importante para a escolha das frequências usadas na propagação sonora.

Considerando exclusivamente a eficiência da transmissão, é evidente que, quanto mais baixa a frequência, melhor, pois o coeficiente de absorção também será pequeno. No entanto, às vezes é necessário concentrar a energia acústica em um feixe estreito, que permita uma recepção com maior discriminação, facilitando a obtenção de um contorno submarino mais definido. Nesse caso, a exigência de direcionalidade favorece o uso de frequências mais altas. O problema é resolvido através de um compromisso, na escolha de frequências mais baixas ou mais altas, de acordo com o uso que se deseja fazer do ecobatímetro e dos resultados que se necessita alcançar.

## b. TRANSDUTORES

O **transdutor** é um componente básico de um sistema ou equipamento de navegação que emprega ondas acústicas, tal como o ecobatímetro ou o sonar “doppler”. O **transdutor** (também denominado de **sensor**) converte um pulso de energia elétrica em energia sonora, e vice-versa. Outros dispositivos semelhantes são o **projektor** (ou **oscilador**), que apenas transmite uma onda acústica (isto é, somente transforma energia elétrica em energia sonora), e o **hidrofone**, que é passivo (ou seja, só transforma energia sonora em energia elétrica, sendo usado unicamente para recepção). O **transdutor** executa as duas funções: transforma energia elétrica em energia sonora, que é transmitida através da água, e converte o eco recebido em energia elétrica.

A transformação de energia elétrica em energia sonora, e vice-versa, pode ser obtida por **magnetostricção** e por **piezoeletricidade**. Os **transdutores magnetostritivos** baseiam-se nas propriedades de certos metais (como o níquel) de variarem seu comprimento (vibrarem) com a variação do campo magnético que os envolvem. Os **transdutores piezoelétricos** baseiam-se na propriedade de certos materiais cerâmicos (como o titanato de bário e o zirconato de chumbo) de variarem suas dimensões quando é aplicada uma diferença de potencial entre seus extremos. O titanato de bário é usado normalmente em transdutores de baixa frequência, enquanto o zirconato de chumbo em transdutores de alta frequência. Estes dois efeitos (magnetostricção e piezoeletricidade) também são “revertidos”, isto é, também transformam ondas sonoras em ondas elétricas.

Os **transdutores magnetostritivos** são de baixa impedância (cerca de 70  $\Omega$ ); pode-se, portanto, utilizar um cabo bem longo entre ele e o registrador/indicador do equipamento. Os **transdutores piezoelétricos** são de alta impedância (cerca de 1.500  $\Omega$ ), não se podendo usar, então, cabos muito longos, em virtude da perda de corrente. A solução é utilizar um transformador de impedância na saída do transdutor, baixando a impedância para valores próximos ao do transdutor magnetostritivo.

No que concerne ao rendimento, um transdutor magnetostritivo tem uma eficiência de 30%, enquanto que um piezoelétrico tem o dobro de eficiência (60%). Isto significa que, se for aplicada uma potência elétrica em um transdutor magnetostritivo, ele só transmitirá 30% desta energia, sob forma de onda sonora, para o meio aquático. O transdutor piezoelétrico converterá 60%. Esta diferença não seria muito significativa, pois poder-se-ia aplicar ao transdutor magnetostritivo o dobro da potência, para obter a mesma saída. A diferença notável está no custo, pois o transdutor cerâmico (piezoelétrico) é muito mais barato que o magnetostritivo.

Para minimizar as perdas por dispersão que ocorreriam no caso de fontes pontiformes, que transmitiriam ondas sonoras esféricas, os transdutores usam feixes direcionais (feixes cônicos), com uma pequena abertura (largura), obtendo, assim, a desejada

concentração de energia. Tal como no caso das antenas de irradiação de ondas EM, a largura do feixe de um transdutor (“beam width”) é medida entre pontos de meia potência (-3dB), onde metade da energia transmitida é recebida.

O transdutor deve ser instalado em um local sem turbulência, onde a água deve fluir naturalmente, sem obstáculos nas proximidades. Ademais, deve ficar afastado dos hélices, para evitar turbulência e ruídos. O nível de ruído (NL – “noise level”) cresce muito com a velocidade do navio, aumentando com a 3ª potência do crescimento da velocidade. Por exemplo, se a velocidade dobra, o NL aumenta de  $2^3 = 8$  vezes. Além disso, deve ficar, também, afastado da proa, onde há turbulência e bolhas de ar que refletem toda energia transmitida. Normalmente, a posição ideal situa-se a 1/3 do comprimento do navio, a partir da proa. Nesta situação, o transdutor estará num ponto de alta pressão da onda de proa (“bow wave”) produzida pelo deslocamento do navio, porém já fora da área onde existem turbulência e bolhas de ar.

Como visto, a velocidade de propagação do som na água varia, no máximo, de cerca de 3% a 4%, conforme as características do meio (temperatura, pressão e salinidade). No entanto, os ecobatímetros de navegação são ajustados para uma velocidade de propagação de 1.500 m/s. As pequenas diferenças não trazem erros significativos nas profundidades indicadas. Apenas os ecobatímetros científicos (hidrográficos e oceanográficos) permitem um controle de velocidade, de modo a ajustar o equipamento para a velocidade real de propagação do som numa determinada massa d'água.