PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO



Escolas Internacionais

Referência
072

Conteúdo didático programado e elaborado pela equipe técnico-pedagógica das Escolas Internacionais.

Supervisão geral das equipes técnica e docente de "Methodos Consultoria de Eletrônica Sociedade Civil".

Copyright
International Textbook Company
ICS — International Correspondence Schools
Scranton, Pennsylvania — USA
Copyright
Direitos exclusivos no Brasil para

ESCOLAS INTERNACIONAIS ®
São Paulo, SP — Brasil

Reservados todos os direitos. Proibida a reprodução total ou parcial do texto e das ilustrações por qualquer forma ou meio, sem prévia autorização por escrito dos detentores do copyright. Edições ou reproduções não autorizadas estarão sujeitas às penalidades da Lei.

Impresso no parque gráfico das
Escolas Internacionais do Brasil

PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO

Índice Geral

Introdução. 4
1. Princípios de propagação 5
1.1 - Classificação das ondas 5
1.2 - Reflexão das ondas 11
1.3 - Refração das ondas 13
1.4 - Difração das ondas 18
1.5 - Polarização das ondas 19
1.5.1 - Polarização das ondas de rádio 20
2. Classificação das ondas de rádio 21
3. Propagação das ondas de rádio 24
3.1 - Modos de propagação 25
3.1.1 - Ondas terrestres ou superficiais. 26
3.1.2 - Ondas ionosféricas 27
3.1.3 - Ondas espaciais. 30
Exame. 35

Direitos reservados

Introdução

O objetivo principal desta lição é levar você ao entendimento dos diversos modos de propagação das ondas de rádio, através do desenvolvimento de conceitos relacionados à propagação das ondas de um modo geral.

Na primeira parte você vai estudar os princípios básicos relacionados com a propagação das ondas de uma maneira geral. Inicialmente as ondas são classificadas e, em seguida, são explicados os principais fenômenos físicos que influem na sua propagação, como a reflexão, a refração, a difração e a polarização das ondas.

Na segunda parte você terá a classificação detalhada das ondas de rádio, segundo as faixas de freqüência e as faixas de comprimento de onda, inclusive as designações usuais na prática diária, com exemplos práticos de interesse.

Finalmente, na última parte, nós lhe explicaremos os diversos modos de propagação das ondas de rádio, que são de fundamental importância para a compreensão das radiocomunicações e transmissões feitas principalmente através das ondas médias (OM), das ondas curtas (OC), das ondas da faixa de VHF (rádio FM e TV) e da faixa de UHF (TV), entre outras.

Direitos reservados

1 - Princípios de Propagação

Para que você possa compreender o mecanismo da propagação das ondas de rádio, é necessário que tenha em mente uma série de conceitos básicos a respeito do comportamento das ondas. São esses conceitos básicos que passaremos a ver agora, começando pelo estudo geral das ondas e sua classificação. A seguir, analisaremos, de modo particular e com mais detalhes, o comportamento das ondas eletromagnéticas e os principais conceitos básicos relacionados com sua propagação.

Sabemos que as ondas de rádio são um caso particular de ondas eletromagnéticas, que possuem determinada faixa de freqüências e uma correspondente faixa de comprimentos de onda. Portanto, os conceitos relacionados com o comportamento das ondas eletromagnéticas também são válidos, em sua grande maioria, para o comportamento das ondas de rádio durante a propagação. Assim, durante o estudo da propagação das ondas de rádio, serão de fundamental importância os conceitos relacionados com a reflexão, a refração e a difração das ondas eletromagnéticas, entre outros. Por esta razão, trataremos dos referidos assuntos logo após a classificação das ondas de uma maneira geral.

1.1 - CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS

As ondas, quanto à natureza, podem ser de dois tipos:

a) Ondas mecânicas: São ondas formadas por impulsos mecânicos que se propagam através de vibrações ou oscilações das partículas que formam o meio de propagação. As ondas mecânicas necessitam da presença do meio material para se propagarem. Por este motivo *as ondas mecânicas não se propagam no vácuo.*

As ondas mecânicas transportam certa quantidade de energia mecânica, devido à vibração ou oscilação das partículas que constituem o meio.

São exemplos de ondas mecânicas: ondas sonoras (som), ondas em corda, ondas na superfície da água.

O som é uma onda mecânica e, portanto, não se propaga no vácuo.

b) Ondas eletromagnéticas: São ondas formadas por campos elétricos e campos magnéticos, ambos variáveis com o tempo e com a posição, perpendiculares entre si e à direção de propagação. *As ondas eletromagnéticas não necessitam da presença de um meio material para se propagarem e, portanto, propagam-se no vácuo e fora dele também.*

Nas ondas eletromagnéticas, metade da energia irradiada é transportada por meio do campo elétrico variável (energia elétrica) e a outra metade é transportada por meio do campo magnético variável (energia magnética).

Como exemplos de ondas eletromagnéticas podemos citar as ondas luminosas (luz), ondas de rádio, raios-X, raios-γ etc.

As ondas de rádio são ondas eletromagnéticas e, portanto, propagam-se no vácuo e fora dele também.

Veja algumas provas experimentais de que as ondas transportam energia:

1a.) As ondas sonoras (música, por exemplo) transportam energia mecânica até nossos ouvidos, fazendo com que a membrana do nosso tímpano vibre. Assim, nós escutamos as ondas sonoras.

2a.) Quando o homem foi até a Lua, ele se comunicou com a Terra por meio das ondas de rádio, que atravessaram o vácuo existente no espaço sideral. Neste caso, a energia transportada pelas ondas de rádio está associada ao campo elétrico (energia elétrica) e ao campo magnético (energia magnética), que formam as ondas eletromagnéticas.

3a.) A Terra recebe diariamente grande quantidade de energia do Sol, através de radiações eletromagnéticas visíveis e invisíveis, que atravessam o vácuo e chegam até nós. Também neste caso a energia transmitida pelas ondas eletromagnéticas está associada aos campos elétrico e magnético que formam estas ondas.

As ondas, quanto à *direção de vibração* das partículas do meio e à *direção de propagação* da energia, podem ser classificadas basicamente em:

a) Ondas longitudinais: São as ondas nas quais as partículas do meio material possuem uma direção de vibração que coincide com a direção de propagação da energia. Observe, na figura 1, a representação esquemática que resume o comportamento das ondas longitudinais.

Direitos reservados

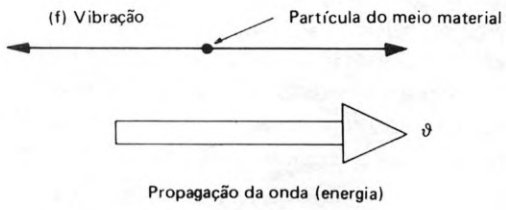


Figura n.º 1 - Representação esquemática do comportamento das ondas longitudinais.

No seu dia-a-dia você observa ondas longitudinais. Por exemplo, quando você ouve o som produzido em líquidos ou gases, esse som nada mais é que ondas sonoras longitudinais. Da mesma forma, quando uma mola está na posição vertical e possui um corpo preso a ela, executando um MHS, o som emitido é o efeito de ondas sonoras longitudinais.

O som nos fluidos é uma onda longitudinal.

b) Ondas Transversais: São as ondas nas quais as partículas do meio material possuem uma direção de vibração perpendicular à direção de propagação da energia. A representação esquemática da figura 2 resume o comportamento das ondas transversais.

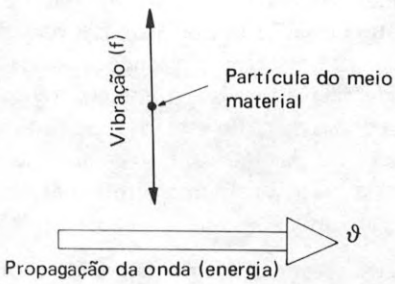


Figura n.º 2 - Representação esquemática do comportamento das ondas transversais.

As ondas eletromagnéticas são consideradas ondas transversais, pois o campo elétrico variável e o campo magnético variável oscilam (vibram) perpendicularmente à direção de propagação da energia. Como sabemos, o sentido e as direções de propagação da energia ficam definidos pelos raios de onda, que são sempre perpendiculares às diversas frentes de onda existentes.

Todas as ondas eletromagnéticas são consideradas ondas transversais e, portanto, as ondas luminosas e as ondas de rádio são ondas transversais.

São exemplos de ondas transversais: as ondas eletromagnéticas, as ondas formadas na superfície da água, as ondas produzidas em cordas ou em molas.

As ondas mecânicas podem ser longitudinais ou transversais.

As ondas, *quanto às frentes de onda,* podem ser classificadas em:

a) Ondas puntiformes: São ondas cujas frentes de onda são representadas por pontos. Exemplo: ondas transversais produzidas em cordas.

A figura 3 ilustra uma corda flexível com uma de suas extremidades presa a uma parede e com a outra extremidade (O) sendo segurada pela mão de uma pessoa. Num determinado instante (t = 0), a mão começa a executar um movimento harmônico simples (MHS), vertical de período T, freqüência f e com uma determinada amplitude máxima. Esse movimento de sobe e desce, provocado no ponto 0 da corda, produz uma perturbação (energia) que se propaga com o passar do tempo para os outros pontos da corda com velocidade (v) constante. Assim, com o decorrer do tempo, todos os outros pontos da corda passarão a oscilar verticalmente com um movimento harmônico simples (MHS).

A figura 3 representa seis instantes sucessivos (de a até f), correspondentes a cada intervalo de tempo igual a $\frac{T}{4}$. Observe como a energia vai propagando-se, atingindo os vários pontos da corda, e também como a amplitude varia com o tempo (t) e com a distância (z), de acordo com uma função matemática senoidal ou co-senoidal.

Observando a figura 3e, notamos que neste instante a extremidade 0 da corda, ou seja, o ponto 0 realizou o seu primeiro ciclo e a energia atingiu o ponto A. Portanto, após o instante t = T, os pontos 0 e A da corda oscilam em fase, isto é, realizam os dois ao mesmo tempo um MHS vertical, de mesma amplitude e mesmo período T. Note ainda que: para t = T temos a distância z = λ, que corresponde à distância horizontal entre os pontos O e A da corda (figura 3e). Conseqüentemente, para $t = \frac{T}{2}$ (fig. 3c), temos a distância $z = \frac{\lambda}{2}$, e assim por diante, sempre com situações análogas.

Direitos reservados

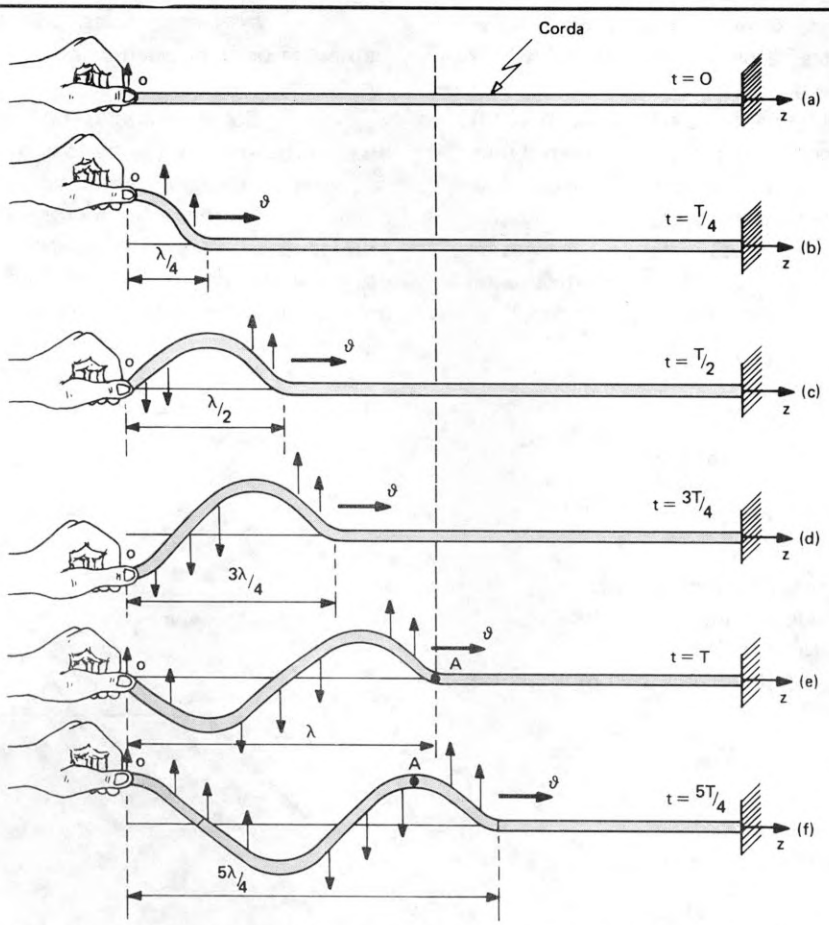


Figura nº 3 - Ondas transversais puntiformes, sendo produzidas numa corda flexível. Com o decorrer do tempo, as partículas (pontos) da corda começam a vibrar perpendicularmente à direção de propagação da energia (eixo z).

A corda adquire um formato sinuoso (onda) entre os pontos O e A, porque cada ponto ou partícula da corda começa seu movimento harmônico atrasado em relação ao ponto O, resultando em elongações diferentes entre os pontos, para cada instante de tempo considerado.

Ondas em cordas são chamadas de puntiformes porque suas frentes de onda são representadas por pontos.

As ondas na superfície da água não são puntiformes, porque as suas frentes de onda podem ser representadas por circunferências (círculos) ou por retas, como veremos posteriormente.

A figura 4a mostra um oscilador mecânico (vibrador) produzindo ondas numa corda flexível presa a uma parede. Na figura 4b temos uma representação esquemática das frentes de onda e do raio de onda, que correspondem às ondas produzidas na corda pelo vibrador.

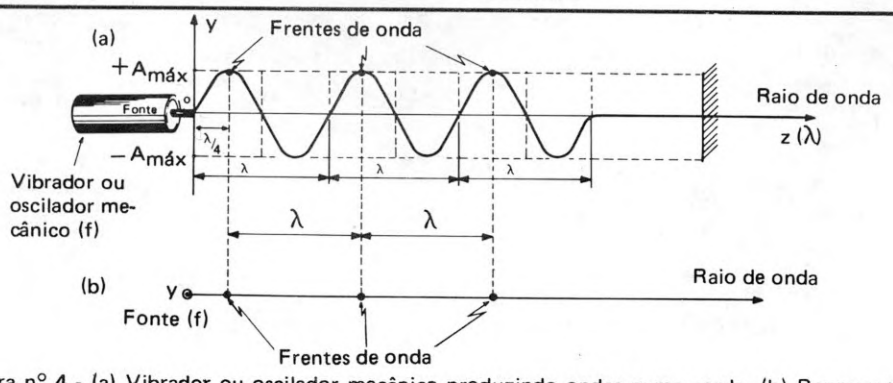


Figura nº 4 - (a) Vibrador ou oscilador mecânico produzindo ondas numa corda. (b) Representação esquemática das frentes de onda (pontos) e do raio de onda.

Direitos reservados

Como sabemos, a distância entre as sucessivas frentes de onda é o comprimento de onda (λ).

Na figura 4a, a elongação na corda (eixo y) varia com a distância (z) e com o tempo (t). No instante de tempo considerado, vemos claramente que a variação da elongação, com a distância (z) dada em comprimentos de onda, obedece a uma função matemática senoidal, pois para $z = 0$ temos $y = 0$. Portanto,

$$y = A_{máx} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot z\right)$$

sendo:
y = elongação na corda (em metros).
$A_{máx}$ = amplitude máxima (em metros).
λ = comprimento de onda.
z = distância genérica dada em comprimentos de onda.

Exemplo

Para uma distância $z = \frac{\lambda}{4}$, temos:

$$y = A_{máx} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4}\right)$$

$$y = A_{máx} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{4}\right)$$

$$y = A_{máx} \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{2}\right)$$

Como $\text{sen} \left(\frac{\pi}{2}\right) = \text{sen } 90^\circ = 1$, resulta:

$$y = A_{máx} \cdot 1$$

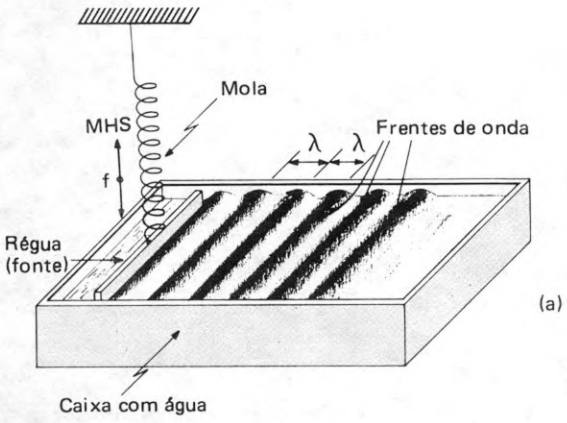
$$\boxed{y = A_{máx}}$$

Portanto, para uma distância $z = \frac{\lambda}{4}$, a amplitude da onda é máxima, conforme podemos verificar na figura 4a. De maneira análoga podem ser conseguidos outros exemplos com facilidade.

b) Ondas retas: São ondas cujas frentes de onda possuem o aspecto de segmentos de reta.

Como exemplo podemos citar as ondas produzidas pelas batidas de uma régua, na superfície da água contida numa caixa.

Na figura 5a, temos uma caixa com água. Observe que, por meio de sucessivas batidas na superfície da água com uma régua, são produzidas ondas retas. Na figura 5b temos uma representação esquemática das frentes de onda e dos raios de onda, que correspondem às ondas retas produzidas na água pelas batidas da régua.



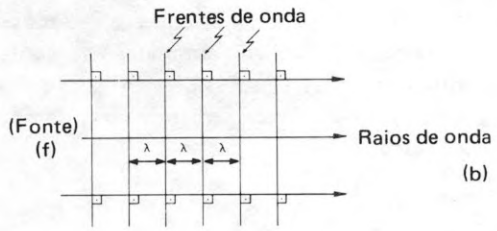


Figura nº 5 - (a) Ondas transversais retas sendo produzidas na superfície da água.
(b) Representação esquemática das frentes de onda (segmentos de reta) e dos raios de onda.

Note que a distância entre as diversas frentes de onda é o comprimento de onda (λ) e que os diversos raios de onda (que são elementos imaginários) são perpendiculares às frentes de onda e paralelos entre si.

Nas ondas retas os raios de onda são raios paralelos.

Direitos reservados

c) Ondas circulares: São ondas cujas frentes de onda possuem o aspecto de circunferências (círculos).

Constituem exemplos de ondas circulares as produzidas na superfície da água, quando uma pedra é atirada no centro de um lago com águas tranqüilas. Ou ainda quando um corpo de dimensões desprezíveis (ponto material) bate periodicamente numa superfície de águas calmas, criando um trem de ondas circulares. Na figura 6, você tem uma representação esquemática das respectivas frentes de onda e raios de onda, que correspondam às ondas circulares de modo geral.

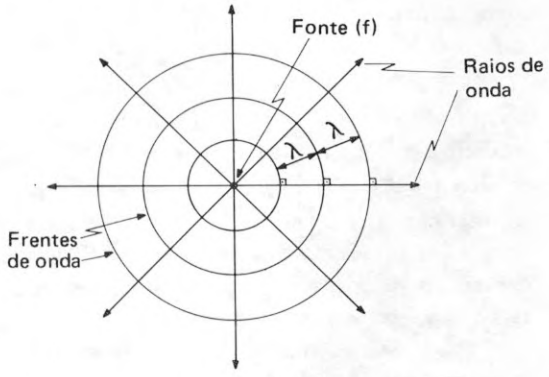


Figura nº 6 - Representação esquemática das frentes de onda (circunferências) e dos raios de onda das ondas circulares.

Note que a distância entre as frentes de onda sucessivas é o comprimento de onda (λ) e que os vários raios de onda são perpendiculares às frentes de onda nos pontos de cruzamento. Neste caso os raios de onda são radiais, indicando que a energia se propaga na direção dos raios das circunferências.

Nas ondas circulares os raios de onda são raios concêntricos.

d) Ondas planas: São aquelas que possuem as frentes de onda com o aspecto de superfícies planas.

Um exemplo nos é dado pela luz solar propagando-se na atmosfera terrestre; ela possui frentes de onda aproximadamente planas. Se o trecho observado é relativamente pequeno, as ondas são consideradas planas, pois a propagação da luz é retilínea.

Para compreender o exposto, recorramos à figura 7, onde temos uma representação esquemática de algumas frentes de onda e de alguns raios de onda de apenas uma parcela de luz solar propagando-se.

Como sabemos, as ondas luminosas são ondas eletromagnéticas. Estamos representando as referidas ondas somente por meio de seus raios de onda e de suas frentes de onda, pois o que nos interessa é estudar a propagação das ondas.

Note que, também neste caso, a distância entre as sucessivas frentes de onda é o comprimento de onda (λ) e que os diversos raios de onda são perpendiculares às frentes de onda (superfícies planas). Neste caso, os raios de onda são paralelos entre si, indicando, como sabemos, a direção e o sentido de propagação da energia.

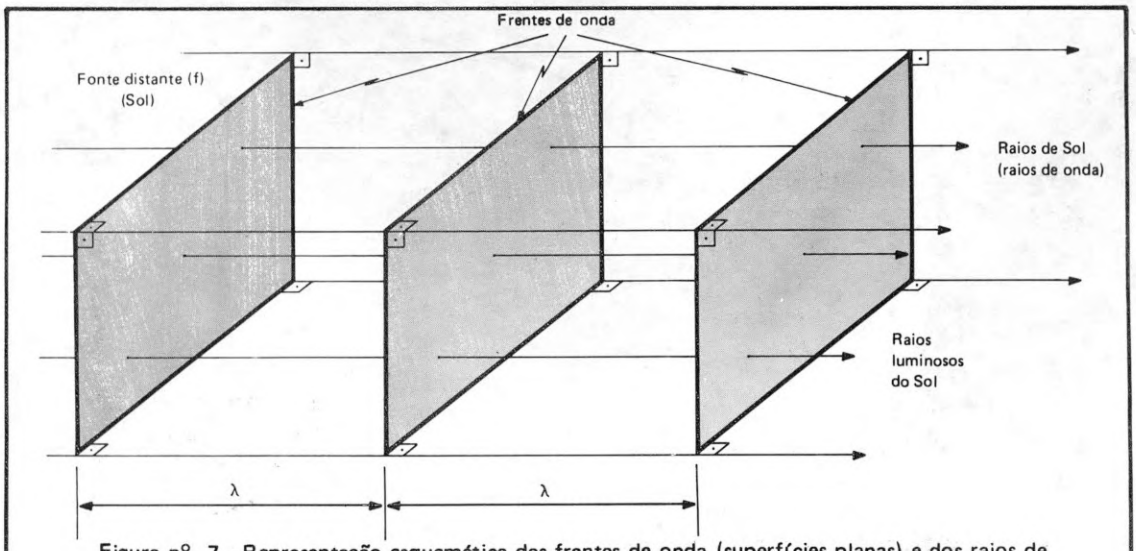


Figura nº 7 - Representação esquemática das frentes de onda (superfícies planas) e dos raios de onda de uma parte da luz solar. O trecho observado é relativamente pequeno e a fonte luminosa (Sol) está distante.

Direitos reservados

No exemplo da figura 7, as frentes de onda são constituídas por superfícies cujos diversos pontos recebem energia simultaneamente. E, assim, os diversos pontos de cada superfície plana oscilam ou vibram em fase. As frentes de onda, neste caso, são consideradas planas, porque a fonte luminosa (Sol) está distante e o trecho considerado na observação é relativamente pequeno. Entretanto, se considerarmos a fonte luminosa (Sol) próxima e/ou ampliarmos o nosso horizonte de observação, chegaremos à conclusão de que as frentes de onda da luz solar são superfícies esféricas, como veremos a seguir.

Nas ondas planas os raios de onda são raios paralelos entre si.

e) Ondas esféricas: São aquelas cujas frentes de onda possuem o aspecto de superfícies esféricas.

Por exemplo, quando um tiro de rojão estoura no ar, a onda sonora que se forma é uma onda esférica; uma fonte luminosa puntiforme (vela acesa numa noite escura, por exemplo) emite ondas luminosas esféricas; uma antena transmissora de rádio irradia ondas eletromagnéticas (ondas de rádio) esféricas; a luz solar observada próxima do Sol possui frentes de onda esféricas.

Para melhor compreender o exposto, observe a figura 8, que é a representação esquemática das ondas esféricas produzidas pela antena transmissora de uma estação de rádio.

Também neste caso a distância entre as sucessivas frentes de onda é o comprimento de onda (λ), e os raios de onda são perpendiculares às frentes de onda (superfícies esféricas). Aqui, os raios de onda são radiais, indicando a direção e o sentido de propagação da energia. Note, no exemplo da figura 8, que as frentes de onda são constituídas por superfícies esféricas cujos pontos recebem energia simultaneamente. Em conseqüência, os pontos de cada superfície esférica, representada na figura, oscilam ou vibram em fase.

Nas ondas esféricas os raios de onda são raios concêntricos.

Portanto, as ondas de modo geral podem propagar-se ao longo de uma reta, numa superfície plana, ou através do espaço.

As ondas, *quanto à dimensão,* podem ser classificadas em:

a) Ondas unidimensionais: São ondas cuja energia se propaga ao longo de uma reta (possui somente uma dimensão).

São exemplos dessas ondas as ondas transversais produzidas em cordas flexíveis ou em molas, e as ondas longitudinais que se produzem em molas. Observe o exemplo da figura 4. Ali a onda transversal produzida na corda pelo vibrador ou oscilador mecânico é uma onda unidimensional, isto é, possui somente uma dimensão, pois a energia mecânica se propaga ao longo de uma reta (eixo z), que coincide com o raio de onda.

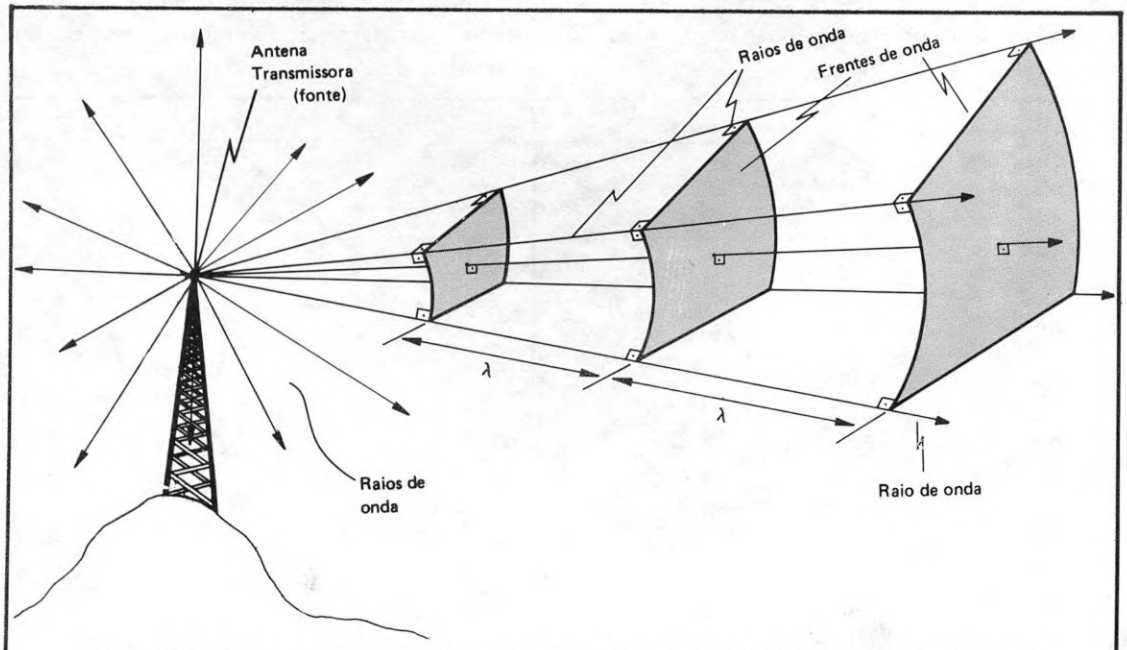


Figura nº 8 - Representação esquemática das frentes de onda (superfícies esféricas) e dos raios de onda de uma parte das ondas de rádio emitidas pela antena transmissora da estação.

Direitos reservados

b) Ondas bidimensionais: São ondas cuja energia se propaga através de uma superfície que possui duas dimensões: comprimento e largura.

Exemplos: Ondas retas produzidas na superfície da água contida numa caixa, e ondas circulares produzidas na superfície da água.

A figura 5 mostra um exemplo de ondas bidimensionais retas, porque elas se propagam pela superfície da água, que possui duas dimensões: comprimento e largura.

A figura 6 representa ondas bidimensionais circulares, que se propagam pela superfície da água de um lago, por exemplo.

c) Ondas tridimensionais: Nestas a energia se propaga através do espaço, o qual apresenta três dimensões: comprimento, largura e altura.

Exemplo: Ondas planas, como a luz solar de maneira aproximada, e ondas esféricas, tais como: a onda sonora do tiro de rojão, as ondas luminosas da vela acesa numa noite escura, as ondas de rádio emitidas pela antena transmissora de uma estação etc.

Na figura 7 temos a representação de ondas tridimensionais planas, porque elas se propagam pelo espaço, que possui três dimensões.

A figura 8 representa ondas tridimensionais esféricas, que são irradiadas por uma fonte puntiforme (antena) e se propagam pelo espaço, como a atmosfera terrestre, por exemplo.

Agora, já temos condições de fazer a classificação completa de qualquer tipo de onda. Vejamos alguns exercícios de fixação.

Exercícios de fixação

1.°) Classifique a onda representada na figura 4.
Solução: Onda mecânica, transversal, puntiforme e unidimensional.
2.°) Classifique as ondas representadas na figura 5.
Solução: Ondas mecânicas, transversais, retas e bidimensionais.

3.°) Classifique as ondas representadas na figura 6, considerando que as ondas se propagam na superfície de um lago.
Solução: Ondas mecânicas, transversais, circulares e bidimensionais.
4.°) Classifique as ondas representadas na figura 7.
Solução: Ondas eletromagnéticas, transversais, planas e tridimensionais.

5.°) Classifique as ondas representadas na figura 8.
Solução: Ondas eletromagnéticas, transversais, esféricas e tridimensionais.
6.°) Classifique as ondas descritas a seguir:
a) Onda sonora de um tiro de rojão que estoura no ar.
Solução: Onda mecânica, longitudinal, esférica e tridimensional.
b) Ondas luminosas de uma vela acesa, numa noite escura.
Solução: Ondas eletromagnéticas, transversais, esféricas e tridimensionais.
c) Várias esferas de aço são colocadas em contato uma com a outra, dentro de um cano. Dá-se um impulso na primeira esfera de aço, numa das extremidades do cano.
Solução: Onda mecânica, longitudinal, puntiforme e unidimensional.

1.2 - REFLEXÃO DAS ONDAS

Reflexão é o fenômeno que ocorre com as ondas, quando atingem a superfície de separação entre dois meios e voltam para o meio de onde se originaram.

É muito fácil de se observar a reflexão de uma onda: Numa corda flexível, por exemplo, quando agitamos a extremidade livre da corda, a onda produzida atinge a outra extremidade fixa e retorna, isto é, reflete-se. No ar, um raio de luz que incide num espelho e retorna. Na água de um tanque, uma onda que bate numa das paredes e retorna. O eco produzido pelo grito de uma pessoa. São todos exemplos de ondas refletidas.

Na figura 9(a) você pode ver uma onda (pulso) produzida na corda e que se propaga com velocidade v constante na direção da parede. Esta onda se chama *onda incidente.*

A figura 9(b) mostra a mesma onda (pulso) depois de refletida na parede. Esta onda se chama *onda refletida.* Note que, devido ao princípio da ação e reação entre a corda e a parede, houve uma inversão de fase na onda.

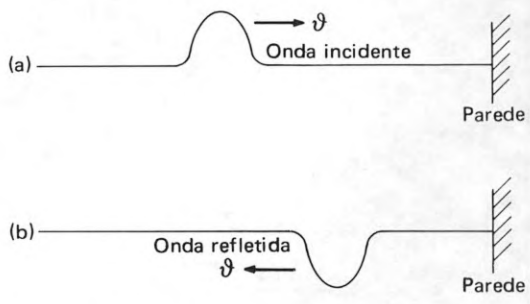


Figura n.° 9 - (a) Onda incidente propagando-se pela corda. (b) Onda refletida propagando-se em sentido contrário e com a fase invertida.

Direitos reservados

Se, ao invés de presa à parede, a extremidade da corda for "livre", de modo que possa executar um movimento vertical, não haverá reação sobre a corda e, neste caso, a extremidade da corda sobe e desce, e a onda se reflete, mas sem apresentar inversão de fase.

As ondas de maneira geral, ao se refletirem, não apresentam nenhuma alteração: na freqüência (f), na velocidade de propagação (v) e nem no comprimento de onda (λ).

Portanto, as ondas refletidas possuem a mesma freqüência, a mesma velocidade de propagação e o mesmo comprimento de onda das ondas incidentes.

Para estudar a reflexão de ondas bidimensionais e tridimensionais, utilizaremos seus respectivos raios de onda, vistos anteriormente, e que caracterizam os vários tipos de onda, juntamente com suas respectivas frentes de onda.

A freqüência, a velocidade de propagação e o comprimento de onda das ondas incidentes são iguais para as ondas refletidas, e a fase pode variar ou não.

Considere a figura 10. Ali temos um raio de onda incidente (I) no ponto de incidência (P) de uma superfície refletora de ondas. Conseqüentemente, temos também o correspondente raio de onda refletido (R) pela superfície. Suponha também uma reta N normal (perpendicular) à superfície refletora, no ponto P de incidência.

O ângulo formado entre o raio de onda incidente (I) e a reta normal (N) é chamado de *ângulo de incidência* (i), e o ângulo formado entre o raio de onda refletido (R) e a reta normal (N) é chamado de *ângulo de reflexão* (r).

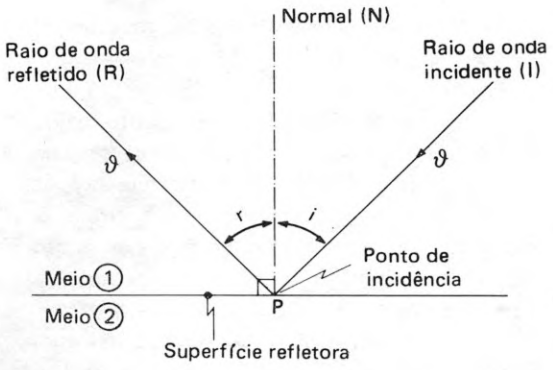


Figura nº 10 Representação de um raio de onda incidente e do raio de onda refletido por uma superfície refletora.

Nesta altura do estudo, já podemos enunciar as *Leis da Reflexão:*

Primeira Lei: O raio de onda incidente (I), o raio de onda refletido (R) e a reta normal (N) no ponto de incidência (P) são coplanares. Isto significa que os raios I e R e a reta N estão num mesmo plano.

Segunda Lei: O ângulo de incidência (i) é sempre igual ao ângulo de reflexão (r). Assim temos:

$$i = r$$

Por exemplo, se o ângulo de incidência (i) for igual a zero, o ângulo de reflexão (r) também será igual a zero e, portanto, os raios I e R terão direções iguais e sentidos opostos, e ambos coincidirão com a direção da reta normal (N).

Já vimos que os raios de onda são sempre perpendiculares às frentes de onda. Assim, a representação esquemática das ondas de rádio, das ondas luminosas, das ondas sonoras ou das ondas na superfície da água, quando sofrem reflexão, é a da figura 11.

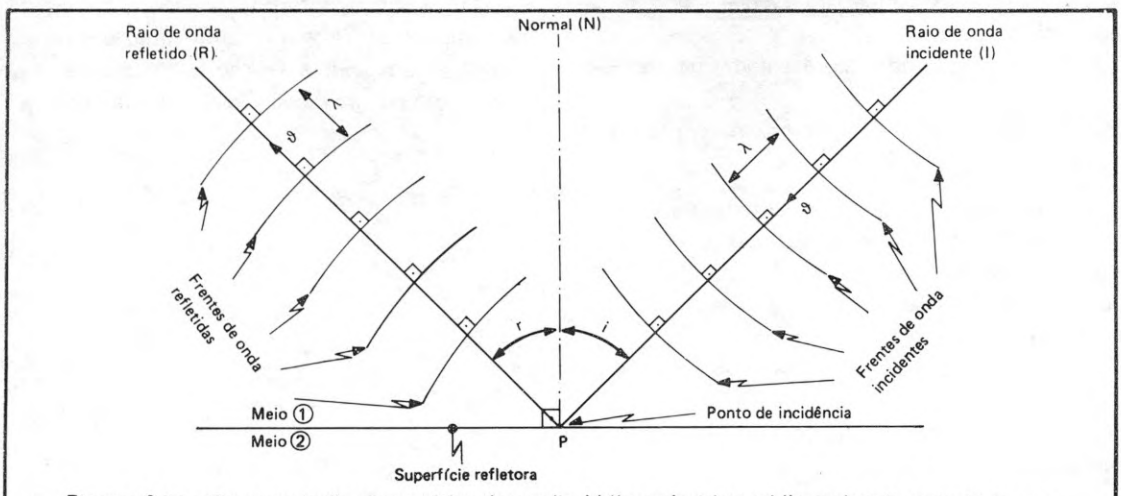


Figura nº 11 - Representação esquemática das ondas bidimensionais e tridimensionais, quando ocorre o fenômeno da reflexão.

Direitos reservados

Pela expressão $\lambda = \frac{v}{f}$ podemos verificar claramente que, como na reflexão das ondas a velocidade de propagação (v) não muda e a freqüência (f) também não muda, pois só depende da fonte geradora de ondas, então o comprimento de onda (λ) permanece o mesmo. Este fato está ilustrado também na figura 11.

Na reflexão das ondas bidimensionais e tridimensionais, o ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão.

1.3 - REFRAÇÃO DAS ONDAS

Refração é o fenômeno que ocorre com as ondas quando passam de um meio de propagação para outro e têm a velocidade ou a direção de propagação alteradas.

O conceito de refração das ondas é muito importante para o estudo da propagação das ondas de rádio, que veremos mais adiante nesta lição.

Já vimos que a freqüência das ondas depende somente da fonte geradora de ondas e, portanto, quando uma onda sofre uma refração, sua freqüência não se altera.

Pela expressão $\lambda = \frac{v}{f}$ podemos concluir facilmente que, como na refração das ondas a freqüência (f) não muda e a velocidade de propagação (v) muda, então o comprimento de onda (λ) também muda.

Como sempre, vamos começar com exemplos mais simples, para depois analisar os outros exemplos que, conseqüentemente, também se tornarão simples e fáceis de compreender.

Na figura 12, você vê duas cordas flexíveis, uma fina (corda 1) e outra grossa (corda 2). As duas cordas estão presas entre si e a corda grossa está fixa a uma parede.

A figura 12(a) mostra uma onda incidente que, gerada na corda 1 (meio 1), se propaga com velocidade v_1 e comprimento de onda λ_1, na direção da corda 2 (meio 2).

Na figura 12(b), a onda já refratou para a corda 2 (meio 2) e agora se propaga com velocidade v_2 e comprimento de onda λ_2.

Ao passar da corda fina (meio 1) para a corda grossa (meio 2), dizemos que a onda sofreu uma refração, pois houve uma mudança de meio e de velocidade de propagação.

Na corda fina a velocidade de propagação da onda é maior do que na corda grossa. Assim, temos que a velocidade v_1 é maior do que a velocidade v_2.

Lembrando que $\lambda = \frac{v}{f}$ e que na refração das ondas a freqüência (f) não muda (constante), podemos concluir facilmente que o comprimento de onda λ_1 é maior do que o comprimento de onda λ_2, conforme podemos observar na figura 12.

Portanto, quando uma onda refrata de uma corda fina para uma corda grossa, sua freqüência permanece a mesma, mas sua velocidade de propagação e seu comprimento de onda diminuem.

Note que na refração não temos variações de fase, pois a onda na corda grossa está em fase com a onda na corda fina. Isto significa que a fase da onda incidente é igual à fase da onda refratada.

Na refração a freqüência e a fase das ondas não mudam. Contudo, a velocidade de propagação e o comprimento de onda se alteram.

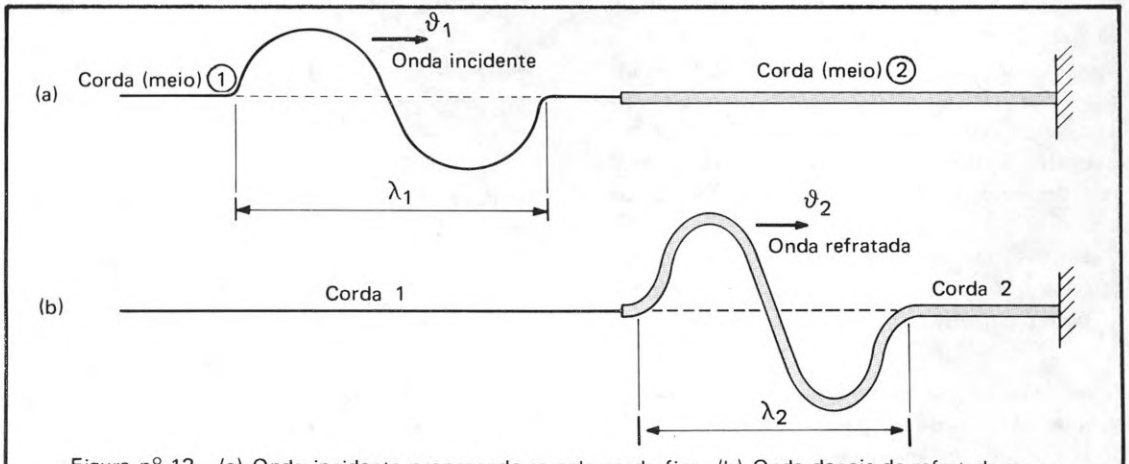


Figura n.º 12 - (a) Onda incidente propagando-se pela corda fina. (b) Onda depois de refratada para a corda grossa.

Direitos reservados

O exemplo das cordas trata da refração de uma onda unidimensional. Vejamos, agora, outro exemplo que trata da refração da luz que, como sabemos, é constituída de ondas tridimensionais. Para tanto, vamos recorrer à figura 13, onde vemos um copo transparente com água e um lápis com uma parte mergulhada na água.

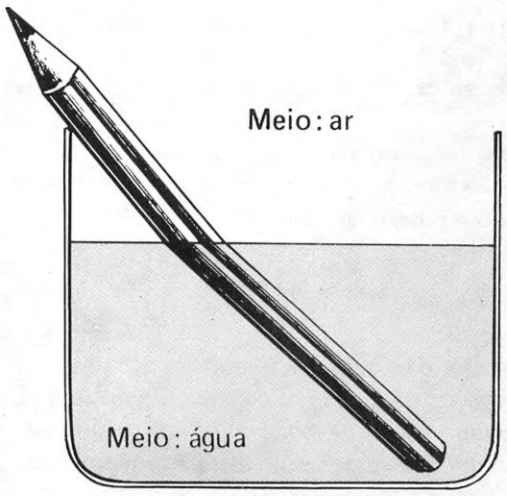


Figura nº 13 - O lápis parece quebrado devido à refração da luz.

Observe que a parte do lápis que está fora d'água, isto é, no ar, é vista normalmente, ao passo que a parte submersa na água é vista aparentemente deslocada da outra, dando a impressão de que o lápis está quebrado, a partir do ponto em que penetra na água. Isto acontece devido ao fenômeno da refração da luz, que ocorre quando os raios de luz (raios de onda) passam de um meio para outro.

Vamos pensar da seguinte forma: se nós vemos o lápis é porque os raios de luz se refletem nele e chegam até nossos olhos. A parte do lápis que está no ar, isto é, fora da água, é vista normalmente, porque não há mudança de meio e, portanto, não ocorre refração dos raios de luz. Quanto à parte submersa do lápis, os raios de luz que nela se refletem caminham inicialmente na água e, depois, no ar, isto é, mudam de meio de propagação. Desta forma, ocorre a refração dos raios de luz que, quando mudam de meio, mudam de direção, passando de uma reta para outra e sofrendo um desvio em suas trajetórias retilíneas, a partir da superfície de separação entre os dois meios. Por este motivo temos a ilusão de que o lápis está quebrado.

A refração da luz é um fenômeno que ocorre quando os raios de luz passam de um meio para outro, mudando sua direção e velocidade de propagação.

Podemos definir, para cada meio material, um índice de refração absoluto (n), como sendo:

$$n = \frac{c}{v}$$

em que:
n = índice de refração absoluto do meio.
c = velocidade da luz no vácuo.
v = velocidade de propagação no meio considerado.

O índice de refração absoluto é a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade de propagação das ondas no meio considerado.

O índice de refração absoluto (n) depende do meio onde ocorre a propagação das ondas e, portanto, depende da densidade do meio material considerado. No caso particular das ondas luminosas, o índice de refração n depende também da cor da luz monocromática.

Como sabemos, c = 300 000 km/s. E como a velocidade de propagação v é sempre menor do que c, o índice de refração n de um meio material é sempre maior do que 1 (um). Quanto mais denso for o meio onde as ondas se propagam, menor será a velocidade de propagação (v) e, portanto, maior será o índice de refração n deste meio.

Quanto mais denso for o meio, maior será o índice de refração absoluto deste meio.

Veremos, mais adiante, que a densidade das diferentes subcamadas da atmosfera terrestre influi consideravelmente na propagação das ondas de rádio.

Exemplos

a) Para um meio material como o ar, temos:

$$v \cong c = 300\,000 \text{ km/s} \Rightarrow n \cong 1$$

b) Para um meio não material como o vácuo, temos:

$$v = c = 300\,000 \text{ km/s} \Rightarrow n = 1$$

Observe que n não possui unidade, pois representa um número puro, isto é, n é um adimensional, pois se trata de uma relação entre duas velocidades, ou seja, duas grandezas da mesma espécie.

Direitos reservados

Portanto, podemos comparar um meio de propagação com outro através do índice de refração n de cada meio. Quando um determinado meio de propagação possui maior índice de refração n do que outro, dizemos que o referido meio é mais refringente.

O meio de propagação que possui maior índice de refração é o meio mais refringente e o mais denso.

Exercício de fixação

Um submarino está submerso e emite ondas de rádio para se comunicar. Supondo o índice de refração absoluto da água igual a $\frac{4}{3}$, determinar a velocidade de propagação das ondas de rádio na água.

Solução

$c = 300\,000$ km/s

$n = \frac{4}{3}$

$v = ?$

$n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n}$

$$v = \frac{300\,000}{\frac{4}{3}} = 300\,000 \times \frac{3}{4}$$

$$v = \frac{900\,000}{4} = 225\,000 \text{ km/s}$$

$$\boxed{v = 225\,000 \text{ km/s}}$$

Vamos estudar a refração das ondas eletromagnéticas, utilizando seus raios de onda e frentes de ondas.

Veja a figura 14. Aí temos uma superfície de separação entre dois meios diferentes ou de densidades diferentes, cujos índices de refração absolutos são n_1 e n_2. Um raio de onda está atravessando obliquamente a superfície de separação, do meio (2) para o meio (1) e, como você pode observar, sofre refração. Veja também o raio de onda incidente (I) no ponto P da superfície, o correspondente raio de onda refratado (R) e suponha uma reta N normal à superfície no ponto P de incidência.

O ângulo formado entre o raio de onda incidente (I) e a reta normal (N) é chamado de *ângulo de incidência* (i_2), e o ângulo entre o raio de onda refratado (R) e a normal (N) é chamado de *ângulo de refração* (i_1). Assim, de acordo com as *Leis da Refração*, temos:

Primeira Lei: Os raios de onda incidente (I) e refratado (R) e a reta normal (N) são coplanares, isto é, estão num mesmo plano.

Segunda Lei: Se aumentarmos o ângulo de incidência i_2, o ângulo de refração i_1 também aumentará. Os cientistas verificaram que o aumento de i_2 não é proporcional ao aumento de i_1, mas o seno de i_2 é proporcional ao seno de i_1. Portanto, temos:

$$\boxed{n_2 \cdot \operatorname{sen} i_2 = n_1 \cdot \operatorname{sen} i_1}$$

ou:

$$\boxed{\frac{\operatorname{sen} i_2}{\operatorname{sen} i_1} = \frac{n_1}{n_2}}$$

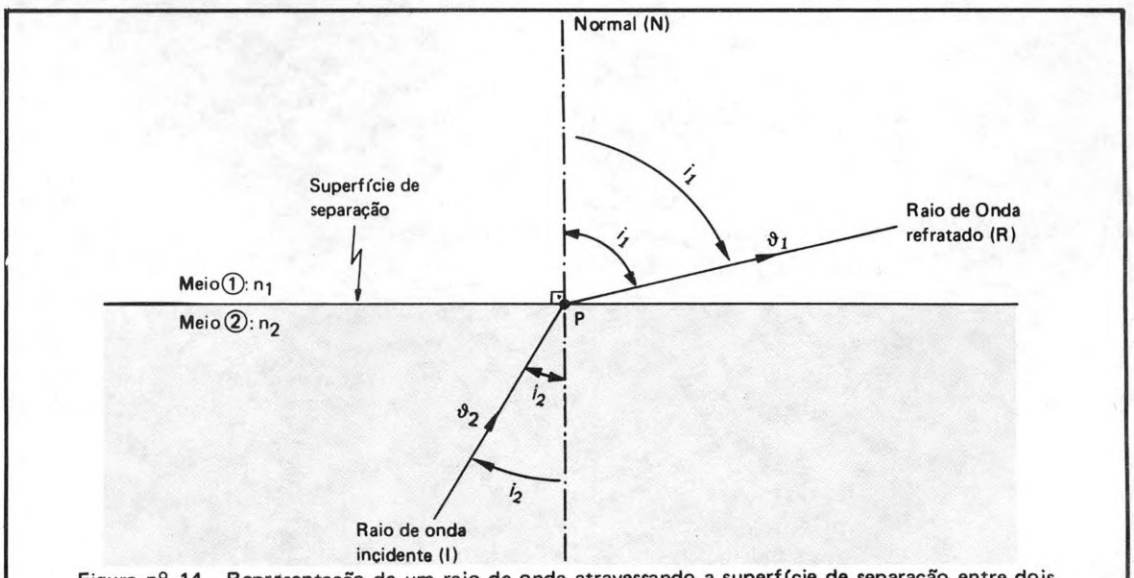


Figura nº 14 - Representação de um raio de onda atravessando a superfície de separação entre dois meios diferentes, sofrendo refração.

Direitos reservados

em que:
n_2 = índice de refração absoluto do meio (2).
n_1 = índice de refração absoluto do meio (1).
i_2 = ângulo de incidência.
i_1 = ângulo de refração.

Note que o raio de onda pode atravessar a superfície de separação do meio (1) para o meio (2) e, neste caso, o raio de onda seguirá o mesmo caminho, mas em sentido contrário. Com isso, o ângulo de incidência será i_1 e o ângulo de refração será i_2.

Exemplo

Suponha que, de acordo com a figura 14, um raio de onda passe da água ($n_2 = \frac{4}{3}$) para o ar ($n_1 \cong 1$). Sabendo que o ângulo de incidência (i_2) é igual a 30°, determine o valor do ângulo de refração (i_1).

Solução

$$n_2 = \frac{4}{3}$$

$$n_1 \cong 1$$

$$i_2 = 30^\circ$$

$$i_1 = ?$$

$$n_2 \cdot \text{sen } i_2 = n_1 \cdot \text{sen } i_1$$

$$\frac{4}{3} \cdot \text{sen } 30^\circ = 1 \cdot \text{sen } i_1$$

$$\frac{4}{3} \cdot \frac{1}{2} = \text{sen } i_1$$

$$\text{sen } i_1 = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}$$

$$i_1 = \text{arc sen} \frac{2}{3} \cong \text{arc sen } 0{,}6667$$

$$\boxed{i_1 \cong 42^\circ}$$

Podemos concluir que, quando o raio de onda passa de um meio mais denso (água, por exemplo) para um meio menos denso (ar, por exemplo), o raio se afasta da reta normal. Inversamente, quando o raio de onda passa de um meio menos denso para um meio mais denso, o raio aproxima-se da reta normal. Este fenômeno ocorre também entre subcamadas de ar da atmosfera que possuem densidades diferentes, provocando vários desvios nos raios de onda das ondas de rádio, durante a propagação. Estes vários desvios que as ondas de rádio sofrem durante a propagação é o que chamamos de *refrações múltiplas.*

Quando um raio de onda incide perpendicularmente ($i_2 = 0$) à superfície de separação entre dois meios, o raio de onda refrata-se sem sofrer qualquer desvio ($i_1 = 0$), isto é, o raio de onda não muda de direção.

Quando um raio de onda passa de um meio mais denso para um meio menos denso, o raio afasta-se da reta normal.

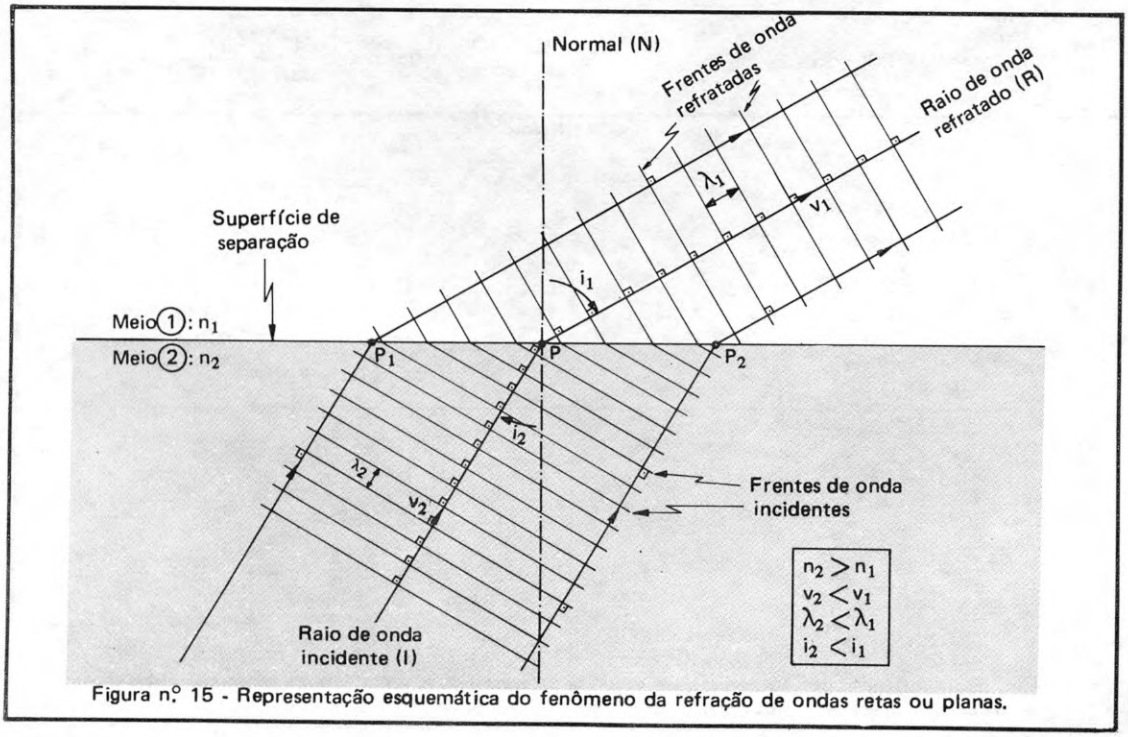


Figura nº 15 - Representação esquemática do fenômeno da refração de ondas retas ou planas.

Direitos reservados

Como vimos anteriormente, os raios de onda são sempre perpendiculares às frentes de onda. Assim, para facilitar a compreensão da refração das frentes de onda durante a propagação, vamos recorrer à figura 15, que representa esquematicamente ondas retas ou planas refratando-se na superfície de separação entre dois meios de densidades diferentes. Note como há uma mudança no comprimento de onda, a partir da superfície de separação.

Na figura 15 o meio (2) possui índice de refração (n_2) maior do que o meio (1) e, portanto, a densidade do meio (2) é maior do que a densidade do meio (1). Assim, a velocidade de propagação das ondas do meio (2) é menor do que no meio (1) e o comprimento de onda no meio (2) é menor do que no meio (1).

Na refração a freqüência (f) das ondas não se altera e assim, de acordo com as *Leis da Refração,* temos:

$$\frac{\text{sen } i_2}{\text{sen } i_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

em que:

v_2 = velocidade de propagação das ondas no meio (2).
v_1 = velocidade de propagação das ondas no meio (1).
λ_2 = comprimento de onda no meio (2).
λ_1 = comprimento de onda no meio (1).
n_2 = índice de refração absoluto do meio (2).
n_1 = índice de refração absoluto do meio (1).
i_2 = ângulo de incidência.
i_1 = ângulo de refração.

Quando as ondas passam de um meio mais denso (n_2) para um meio menos denso (n_1), isto é, $n_2 > n_1$, as ondas *ganham velocidade* e temos:

$v_1 > v_2 \rightarrow \lambda_1 > \lambda_2 \rightarrow i_1 > i_2$

Exemplo:

Ondas de rádio propagando-se da água para o ar, sendo:
meio (2): água $\left(n_2 = \frac{4}{3}\right)$
meio (1): ar ($n_1 \cong 1$)

Inversamente, quando as ondas passam de um meio menos denso (n_1) para um meio mais denso (n_2), isto é, $n_1 < n_2$, as ondas *perdem velocidade* e temos:

$v_2 < v_1 \rightarrow \lambda_2 < \lambda_1 \rightarrow i_2 < i_1$

Exemplo:

Ondas de rádio propagando-se do ar, meio (1), para a água, meio (2).

Exercício de fixação

Com relação à figura 15, suponha que uma onda eletromagnética de 10 MHz produzida na água, meio (2), refrate para o ar, meio (1). A velocidade da onda na água é 225 000 km/s e no ar é aproximadamente 300 000 km/s. Supondo que o ângulo de incidência é de 45°, determine:

a) o comprimento de onda (λ_2) na água.
b) a freqüência de onda (f_1) da onda no ar.
c) o ângulo de refração (i_1).
d) o comprimento de onda (λ_1) no ar.

Solução

$f_2 = 10 \text{ MHz} = 10 \times 10^6 \text{ Hz}$
$i_2 = 45°$
$v_2 = 225\,000 \text{ km/s} = 2{,}25 \times 10^8 \text{ m/s}$
$v_1 = 300\,000 \text{ km/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

a) $\lambda_2 = \frac{v_2}{f_2} = \frac{2{,}25 \times 10^8}{10 \times 10^6} = \frac{2{,}25 \times 10^8}{10^7}$

$\lambda_2 = 2{,}25 \times 10^8 \times 10^{-7} = 2{,}25 \times 10^1 = 22{,}5 \text{ m}$

$$\boxed{\lambda_2 = 22{,}5 \text{ m}}$$

b) Na refração das ondas, a freqüência não muda. Portanto:

$f = f_2 = f_1 = 10 \times 10^6 \text{ Hz} = 10 \text{ MHz}$

$$\boxed{f = 10 \text{ MHz}}$$

c) $\frac{\text{sen } i_2}{\text{sen } i_1} = \frac{v_2}{v_1}$

$\frac{\text{sen } 45°}{\text{sen } i_1} = \frac{2{,}25 \times 10^8}{3 \times 10^8} = 0{,}75$

$\text{sen } i_1 = \frac{\text{sen } 45°}{0{,}75} = \frac{0{,}7071}{0{,}75} = 0{,}9428$

$i_1 = \text{arc sen } 0{,}9428$

$$\boxed{i_1 \cong 70°}$$

d) $\lambda_1 = \frac{v_1}{f_1} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^6} = \frac{3 \times 10^8}{10^7}$

$\lambda_1 = 3 \times 10^8 \times 10^{-7} = 3 \times 10^1 = 30 \text{ m}$

$$\boxed{\lambda_1 = 30 \text{m}}$$

Direitos reservados

1.4 - DIFRAÇÃO DAS ONDAS

Considere um obstáculo ou uma abertura colocada na direção de propagação das ondas retas ou planas, representadas nas figuras 16(a) e 16(b) por seus raios de onda e frentes de onda. Os raios de onda incidentes são paralelos e quando atingem o obstáculo (figura 16a) ou a abertura d (figura 16b), em parte eles continuam paralelos, enquanto outra parte muda de direção. Estes raios de onda que mudam de direção se tornam radiais e contornam a extremidade do obstáculo ou da abertura d.

As frentes de onda incidentes são retas ou planas, mas, quando atingem o obstáculo ou a abertura d, tornam-se circulares ou esféricas. Este fenômeno chama-se *difração.*

Difração é o fenômeno que consiste em uma onda contornar obstáculos.

Note que o comprimento de onda (λ) das ondas incidentes é igual ao comprimento de onda das ondas difratadas. Isto significa que na difração o comprimento de onda não se altera.

Para que haja difração, a dimensão d do obstáculo ou da abertura (fenda) deve ser menor ou aproximadamente igual ao comprimento de onda (λ) das ondas incidentes. A experiência mostra que, mantendo-se o comprimento de onda constante, a difração se torna tanto mais acentuada, quanto menor é a abertura d do obstáculo (veja figura 16b). E mantendo-se a abertura d fixa, à medida que o comprimento das ondas incidentes diminui, cada vez menos acentuada se torna a difração.

A difração é um fenômeno que pode ocorrer com qualquer tipo de onda bidimensional ou tridimensional, como por exemplo as ondas luminosas, as ondas sonoras, as ondas de rádio e as ondas na superfície da água.

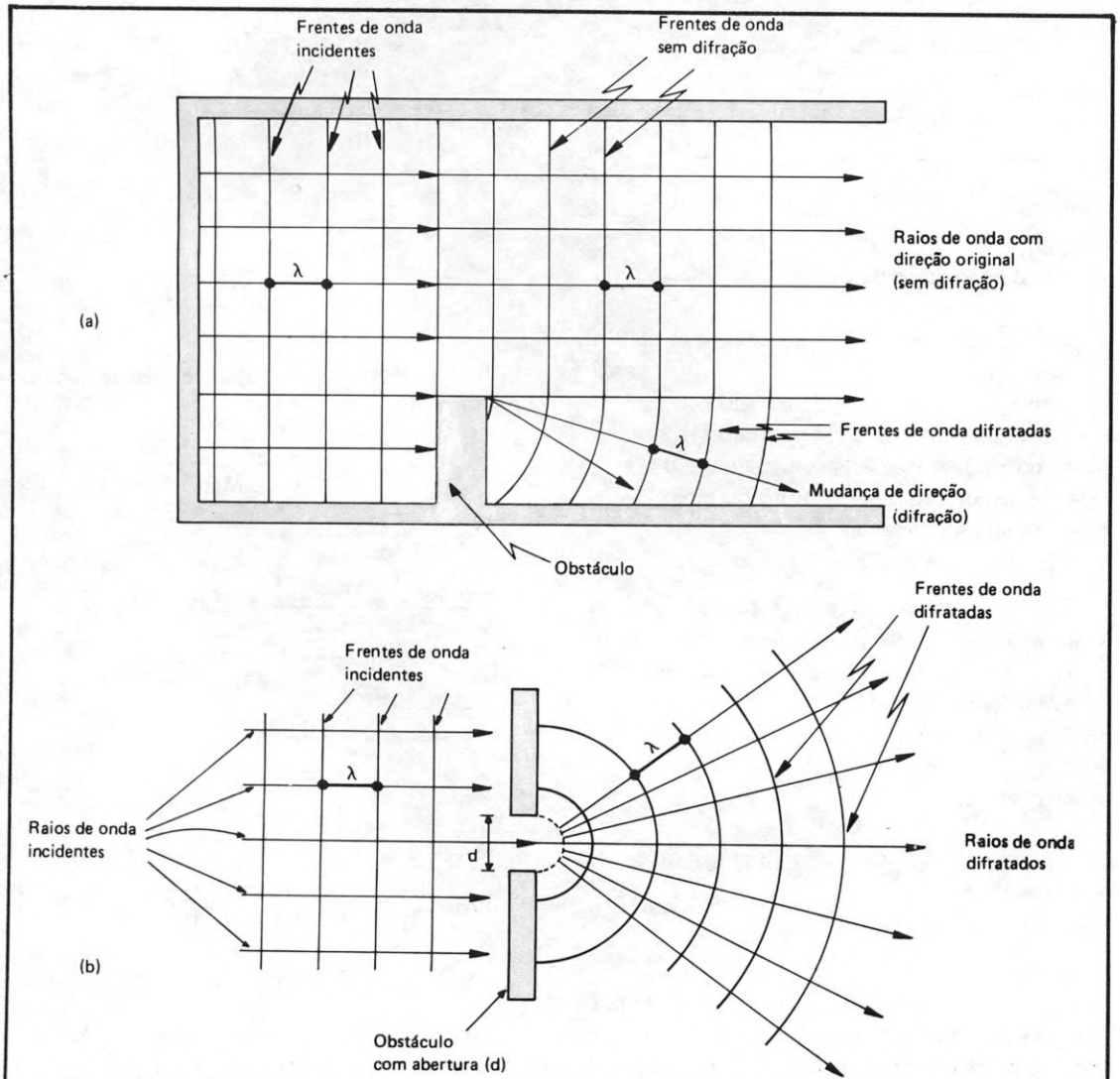


Figura nº 16 - Representação do fenômeno da difração de ondas retas ou planas. (a) Difração parcial num obstáculo. (b) Difração total num obstáculo com abertura d.

Direitos reservados

Na difração o comprimento de onda, a freqüência e a velocidade de propagação das ondas não se alteram.

1.5 - POLARIZAÇÃO DAS ONDAS

Sabemos que as ondas cuja direção de vibração é perpendicular à direção de propagação da energia são ondas transversais, e que as ondas cuja direção de vibração coincide com a direção de propagação da energia são ondas longitudinais. Com isso, podemos compreender facilmente o que é polarização de uma onda.

Uma onda está polarizada quando todos os pontos da onda ou partículas do meio material vibram ou oscilam num único plano. Portanto, a polarização das ondas somente é possível em ondas transversais, como as ondas em cordas, ondas luminosas (luz) e ondas de rádio, por exemplo. Os dispositivos nos quais ocorre a polarização das ondas são conhecidos como polarizadores.

Uma onda é polarizada quando todos os pontos atingidos pela onda vibram num mesmo plano.

Na figura 17 temos a representação das ondas: não polarizada (a), polarizada verticalmente (b) e polarizada horizontalmente (c).

Vejamos um exemplo de polarização de ondas em cordas. A figura 18 ilustra uma corda com uma extremidade presa à parede e com a outra extremidade sendo agitada em diversas direções e sentidos. A partir desta agitação, os pontos da extremidade da corda vibram em diversas direções e sentidos, resultando numa onda não polarizada, como você observa na figura. Mas esta onda pode ser polarizada por uma placa com fenda (polarizador). Como a fenda está na direção vertical, a onda resultante depois do polarizador é uma onda polarizada verticalmente, pois os pontos neste trecho da corda vibram somente na direção vertical (plano vertical).

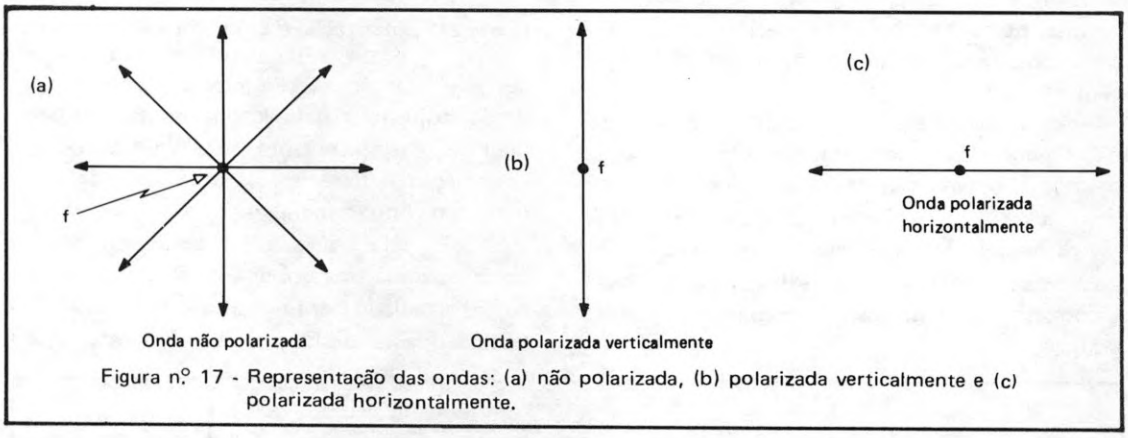


Figura nº 17 - Representação das ondas: (a) não polarizada, (b) polarizada verticalmente e (c) polarizada horizontalmente.

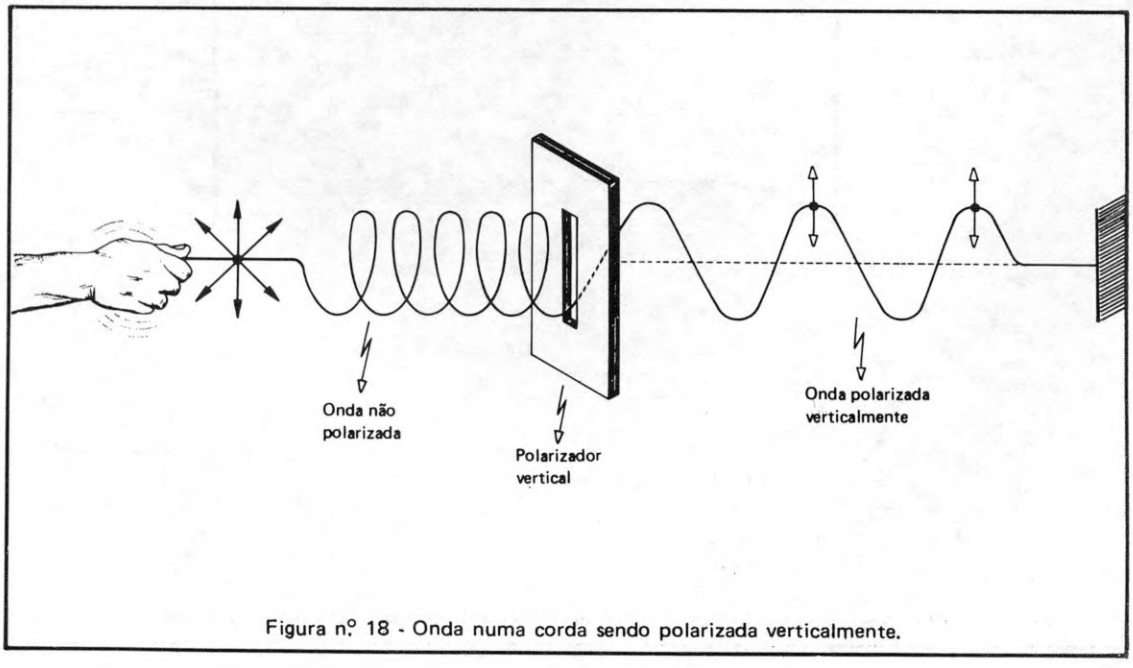


Figura nº 18 - Onda numa corda sendo polarizada verticalmente.

Direitos reservados

Outro exemplo de polarização de ondas é a polarização das ondas luminosas (luz).

A experiência mostra que a luz pode ser polarizada quando atravessa certas placas chamadas polaróides. Isto é uma evidência de que a luz é uma onda exclusivamente transversal, como já vimos.

Cada molécula (ou átomo) de uma fonte de luz pode ser considerada uma fonte de luz elementar. As partículas eletrizadas da molécula ou do átomo conseguem adquirir energia (térmica, por exemplo) e irradiam essa energia sob a forma de ondas eletromagnéticas. Tudo indica que as ondas eletromagnéticas emitidas por uma molécula ou um átomo qualquer, devido à vibração de seus elétrons, por exemplo, sejam polarizadas. Como a fonte de luz contém um número muito grande de moléculas ou átomos orientados ao acaso, a luz emitida pela fonte é uma mistura de ondas polarizadas em diferentes direções. Então, dizemos que a luz emitida é uma onda não polarizada. Podemos concluir, então, que para polarizar uma onda luminosa, por exemplo, basta selecionar as vibrações polarizadas num determinado plano e eliminar as demais.

Normalmente, a luz que recebemos não é uma onda polarizada, e sim uma mistura de ondas polarizadas em várias direções. Por isso, nos trabalhos fotográficos são utilizados filtros polaróides, que selecionam as vibrações polarizadas, diminuindo os reflexos indesejáveis e tornando mais nítidas certas partes da fotografia.

1.5.1 - POLARIZAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO

Já estudamos que as ondas de rádio são ondas eletromagnéticas e que, como tal, possuem dois campos distintos variáveis no tempo e no espaço, que são: o campo elétrico (E) e o campo magnético (B). Os dois campos podem ser representados por ondas senoidais ou co-senoidais e são ponto a ponto perpendiculares entre si, isto é, as ondas correspondentes aos dois campos estão situadas em dois planos que são perpendiculares um ao outro.

O plano que contém a onda senoidal ou co-senoidal do campo elétrico (E) determina a polarização da onda de rádio. Isto significa que a direção das linhas de força do campo elétrico (E) determina a polarização da onda. Como sabemos, uma antena transmissora emite ondas de rádio, quando alimentada por um transmissor de rádio que opera numa determinada freqüência. Assim, a posição de uma antena transmissora simples, constituída por um pedaço de condutor elevado no espaço, determina a polarização da onda de rádio emitida.

Uma antena transmissora na posição vertical em relação à terra irradia uma onda de rádio polarizada verticalmente, enquanto uma antena transmissora na posição horizontal em relação à terra irradia uma onda de rádio polarizada horizontalmente.

Na figura 19(a) temos a representação da onda correspondente ao campo elétrico (E) irradiado por uma antena na posição vertical e que se desloca num plano vertical, da

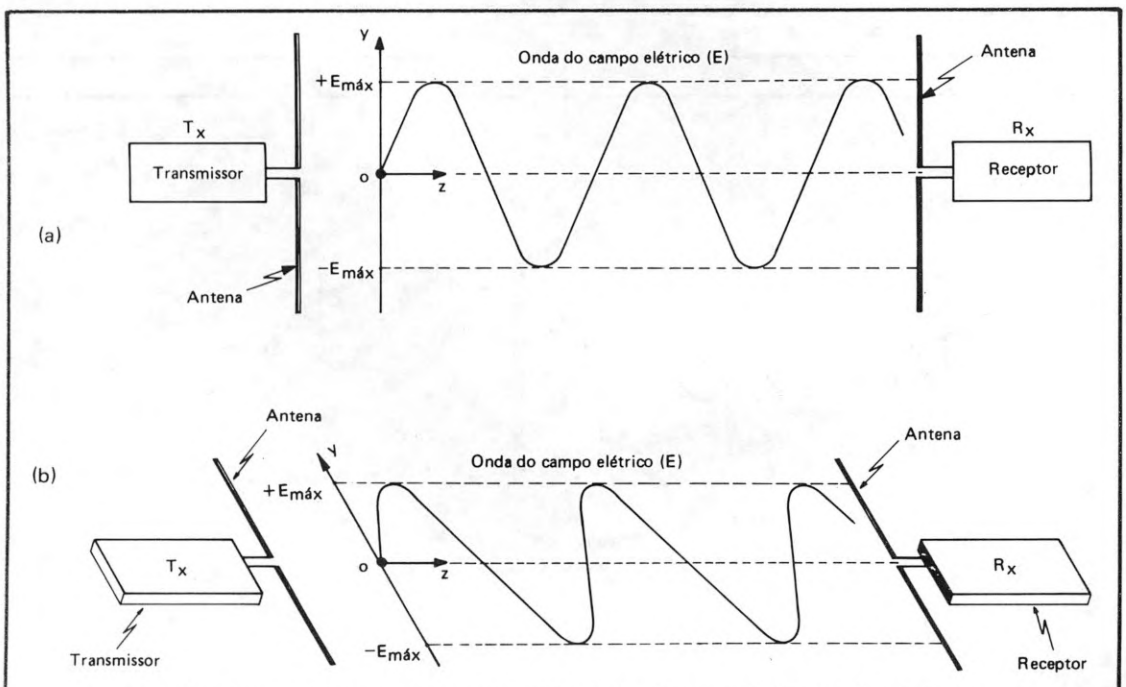


Figura nº 19 - Polarização das ondas de rádio: (a) Polarização vertical. (b) Polarização horizontal.

Direitos reservados

antena do transmissor até a antena do receptor. Na figura 19(b) temos a representação da onda correspondente ao campo elétrico (E) irradiado por uma antena na posição horizontal e que se desloca num plano horizontal da antena do transmissor até a antena do receptor.

A primeira onda está polarizada verticalmente e a segunda está polarizada horizontalmente.

A polarização de uma onda de rádio fica determinada pela direção das linhas de força do campo elétrico e, portanto, depende da posição da antena transmissora.

2 - Classificação das Ondas de Rádio

As ondas de rádio, que representam apenas uma parte das ondas eletromagnéticas, podem ser classificadas, de acordo com a freqüência, em várias faixas, denominadas de faixas de freqüência. A cada faixa de freqüência corresponde uma classe de freqüência, que na prática é utilizada de forma abreviada.

Na Tabela nº 1 apresentamos as denominações das várias classes de freqüência e de suas respectivas abreviações utilizadas na prática diária.

Na Tabela nº 2 apresentamos os valores das faixas de freqüência para cada uma das várias classes de freqüência, bem como as respectivas faixas de comprimento de onda e subdivisões métricas, que são designações a respeito do comprimento de onda.

Cada faixa de freqüência é também chamada de banda de freqüência. Portanto, na Tabela nº 2 podemos dizer que estão contidas as bandas de freqüência das ondas de rádio e suas designações em termos de freqüência e de comprimento de onda.

Muitos autores consideram, ainda, mais uma classe de freqüência, cuja faixa ou banda de freqüência se estende desde 300 GHz até 3 000 GHz e cuja faixa de comprimento de onda se estende de 1 mm até 0,1 mm. Em termos de comprimento de onda, estas ondas são chamadas de decimilimétricas.

Abreviação (Sigla)	Origem	Significado
V.L.F.	Very Low Frequency	Freqüência Muito Baixa
L.F.	Low Frequency	Baixa Freqüência
M.F.	Medium Frequency	Média Freqüência
H.F.	High Frequency	Alta Freqüência
V.H.F.	Very High Frequency	Freqüência Muito Alta
U.H.F.	Ultra High Frequency	Freqüência Ultra-Alta
S.H.F.	Super High Frequency	Freqüência Super-Alta
E.H.F.	Extremely High Frequency	Freqüencia Extremamente Alta

Tabela nº 1 - Classes de freqüência.

Sigla	Faixas de freqüência	Faixas de compr. de onda	Subdivisão métrica
V.L.F.	3 a 30 KHz	100 km a 10 km	miriamétrica
L.F.	30 a 300 KHz	10 km a 1 km	quilométrica
M.F.	300 a 3000 KHz	1000m a 100m	hectométrica
H.F.	3 a 30 MHz	100m a 10m	decamétrica
V.H.F.	30 a 300 MHz	10m a 1m	métrica
U.H.F.	300 a 3000 MHz	100cm a 10cm	decimétrica
*S.H.F.	3 a 30 GHz	10cm a 1cm	centimétrica
*E.H.F.	30 a 300 GHz	10mm a 1mm	milimétrica

* Usualmente conhecidas como microondas.

Tabela nº 2 - Classificação das ondas de rádio de acordo com a freqüência.

Direitos reservados

Note que para classificar as ondas de rádio recorremos às noções de freqüência e de comprimento de onda. As definições apresentadas são aceitas internacionalmente e correspondem às normas internacionais adotadas em Genebra, a partir do ano de 1 961.

As ondas de rádio possuem comprimentos de onda superiores a 0,1 mm.

Devido às características de propagação, que veremos mais adiante, as faixas de freqüência das ondas de rádio são destinadas a serviços diferentes. Por exemplo, algumas ondas de rádio com determinadas freqüências propagam-se a distâncias maiores do que outras e, portanto, devem ser utilizadas por serviços que necessitem de um longo alcance.

Para serviços tais como o de uma estação de rádio que transmite somente para a população de uma única cidade e vizinhanças próximas, é suficiente a atuação da estação numa distância menor.

O conjunto de todas as freqüências relativas às ondas eletromagnéticas é denominado de espectro de freqüências das ondas eletromagnéticas, ou somente de espectro eletromagnético.

O conjunto de todas as freqüências relativas às ondas de rádio é denominado de espectro de freqüências das ondas de rádio ou somente de espectro das ondas de rádio.

Dentro do amplo espectro de freqüências das ondas de rádio (Tabela nº 2), podemos imaginar e concluir que cada faixa ou banda de freqüências possui o seu espectro de freqüência. Deste modo, para uma boa e racional utilização do espectro de freqüências de cada faixa ou banda, existe um estudo permanente de âmbito internacional que regulamenta a utilização do espectro de cada faixa ou banda, subdividindo-a em faixas ou bandas menores, que são destinadas a cada um dos mais variados tipos de serviços, como por exemplo: radiodifusão, radioamadores, TV, radar, telefone por microondas, polícia, comunicações marítimas e aéreas etc.

Um grande esforço é feito no sentido de se usar o estritamente necessário, de forma a não congestionar o espectro de cada faixa ou banda. Imagine se todos quisessem transmitir numa mesma freqüência ou na freqüência que mais lhe conviesse; é evidente que ninguém conseguiria se comunicar, pois haveria muita interferência mútua e um desentendimento generalizado.

Um exemplo disto são as interferências que certos radioamadores provocam na recepção de TV, devido às instalações malfeitas das antenas que eles possuem, e também devido à qualidade duvidosa do equipamento que utilizam. Este tipo de interferência é conhecido como TVI (interferência na TV).

Por essa razão é que existem os órgãos responsáveis, que têm a finalidade de distribuir as faixas menores de freqüência aos mais variados tipos de serviços e, ao mesmo tempo, controlar e fiscalizar os serviços que estão autorizados a transmitir. No Brasil, temos o DENTEL — Departamento Nacional de Telecomunicações —, destinado a autorizar, controlar e fiscalizar os serviços prestados, dentre outras atribuições.

Vejamos então, como exemplo, algumas faixas ou bandas menores que pertencem ao espectro de freqüências de cada faixa ou banda da Tabela nº 2.

É comum encontrarmos, na prática, outros termos que não constam na Tabela nº 2 e que possuem relação com os comprimentos de onda das ondas de rádio. Estes termos se referem às faixas ou bandas menores. São usados com mais freqüência e até mesmo popularmente, e nos interessam de modo particular. Os termos e as faixas são:

Ondas longas (OL): Faixa cujas freqüências se estendem desde cerca de 150 kHz até 285 kHz, e os respectivos comprimentos de onda, desde cerca de 2 000 metros até 1 053 metros, aproximadamente. A sigla desta faixa em inglês é LW (Long Wave) e esta faixa pertence à faixa de LF (baixa freqüência), de acordo com a Tabela nº 2. É usada para comunicação a longas distâncias em funcionamento contínuo.

Ondas médias (OM): Faixa cujas freqüências se estendem desde cerca de 535 kHz até 1 605 kHz, e os respectivos comprimentos de onda, desde cerca de 560 metros até 187 metros, aproximadamente. A sigla desta faixa em inglês é MW (Medium Wave) e esta faixa pertence à faixa de MF (média freqüência), de acordo com a Tabela nº 2. A faixa de OM é usada pelas emissoras de radiodifusão, que transmitem seus programas em AM (amplitude modulada) e que são bastante conhecidas por todos.

Ondas curtas (OC): Faixa cujas freqüências se estendem desde cerca de 2 MHz até 30 MHz, e os respectivos comprimentos de onda, desde cerca de 150 metros até 10 metros, aproximadamente. A sigla da faixa de ondas

Direitos reservados

curtas (OC) em inglês é SW (Short Wave) e, de acordo com a Tabela nº 2, a parte inicial desta faixa pertence à faixa de MF (média freqüência), sendo que a parte restante pertence à faixa de HF (alta freqüência).

Podemos concluir, então, que a classificação da Tabela nº 2 não é tão rígida quanto parece.

A faixa de OC é usada para comunicação a longas distâncias e a distâncias moderadas. Esta faixa é usada por emissoras de radiodifusão, que transmitem seus programas em AM (amplitude modulada) e são conhecidas como emissoras de ondas curtas, ou seja, emissoras que transmitem seus programas em ondas curtas.

As ondas médias (OM) possuem comprimento de onda entre 560 e 187 metros, aproximadamente, e as ondas curtas (OC) possuem comprimento de onda entre 150 e 10 metros, aproximadamente.

As emissoras que transmitem seus programas em ondas médias são conhecidas como emissoras de ondas médias (OM). É comum uma emissora de radiodifusão transmitir seus programas em ondas médias (OM), que atingem regiões menos distantes, e também em ondas curtas (OC), que atingem regiões mais distantes.

Na prática, a faixa de ondas curtas (OC) é subdividida em várias faixas menores, também chamadas de faixas de onda. Estas faixas de onda menores são designadas de acordo com seus respectivos comprimentos de onda em metros (m). Esses comprimentos de onda são uma média aritmética entre os comprimentos de onda dos extremos de cada faixa, e já foram padronizados ou convencionados, como você verá mais adiante, através de um exemplo.

As faixas menores de ondas curtas podem aparecer também nos manuais dos rádios, com as designações: ondas curtas 1 (OC1 ou SW1), ondas curtas 2 (OC2 ou SW2), ondas curtas 3 (OC3 ou SW3), e assim por diante, dependendo do número de faixas de onda do receptor de rádio. Estas designações podem ser atribuídas a cada faixa, desde que juntamente com cada uma delas sejam fornecidos os respectivos comprimentos de onda referentes à cada faixa de onda. As faixas de onda de um rádio são também chamadas de faixas de sintonia, cujas respectivas freqüências aparecem impressas nas escalas dos mostradores dos receptores de rádio. No caso dos rádios que possuem faixas de ondas curtas (OC ou SW), aparecem também os respectivos comprimentos de onda em metros (m). Os rádios que possuem várias faixas de onda são denominados de rádios multifaixas.

Exemplo prático

O radiorreceptor portátil da Philco, modelo B506, possui as seguintes faixas de sintonia:

Ondas médias (OM) — de 520 kHz até 1 650 kHz.

Ondas curtas 1 (OC1) — de 2,05 MHz até 3,45 MHz (faixas de 120 m e 90 m).

Ondas curtas 2 (OC2) — de 4,4 MHz até 6,3 MHz (faixas de 60 m e 49 m).

Ondas curtas 3 (OC3) — de 9,2 MHz até 10,0 MHz (faixa de 31 m).

Ondas curtas 4 (OC4) — de 11,0 MHz até 12,3 MHz (faixa de 25 m).

Ondas curtas 5 (OC5) — 14,6 MHz até 15,5 MHz (faixa de 19 m).

Este radiorreceptor é transistorizado e possui 6 (seis) faixas de onda: OM, OC1, OC2, OC3, OC4 e OC5. Portanto, é um radiorreceptor multifaixas.

Vejamos um exemplo de como se determina, aproximadamente, o comprimento de onda correspondente a uma determinada faixa de onda que pertence à faixa de ondas curtas (OC). Para isso, vamos considerar a faixa de ondas curtas 4 (OC4), cujos extremos da correspondente faixa de freqüências são: 11,0 MHz e 12,3 MHz.

Para facilitar chamaremos de f_i o extremo inferior da faixa de freqüência e de f_s, o extremo superior. Assim, temos:

$f_i = 11{,}0$ MHz
$f_s = 12{,}3$ MHz

O comprimento de onda λ_i referente à freqüência f_i vale:

$$\lambda_i = \frac{v}{f_i} = \frac{3 \times 10^8}{11 \times 10^6} = \frac{3}{11} \times 10^8 \times 10^{-6}$$

Direitos reservados

$$\lambda_i = \frac{3}{11} \times 10^2 = 0{,}2727 \times 10^2 \text{ m}$$

$$\boxed{\lambda_i = 27{,}27 \text{ m}}$$

O comprimento de onda λ_s referente à freqüência f_s vale:

$$\lambda_s = \frac{v}{f_s} = \frac{3 \times 10^8}{12{,}3 \times 10^6} = \frac{3}{12{,}3} \times 10^8 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_s = \frac{3}{12{,}3} \times 10^2 = 0{,}2439 \times 10^2 \text{ m}$$

$$\boxed{\lambda_s = 24{,}39 \text{ m}}$$

Fazendo a média aritmética entre λ_i e λ_s, teremos o valor aproximado do comprimento de onda λ, representativo da faixa considerada (OC4). Portanto, temos:

$$\lambda = \frac{\lambda_i + \lambda_s}{2} = \frac{27{,}27 + 24{,}39}{2}$$

$$\lambda = \frac{51{,}66}{2} = 25{,}83 \text{ m}$$

$$\boxed{\lambda \cong 25 \text{ m}}$$

Daí a denominação de faixa de 25 m para a referida faixa de ondas curtas que, neste exemplo, é chamada de OC4, mas que noutro rádio poderá ter outro número, dependendo do número de faixas de ondas curtas (OC) que o outro rádio possuir.

A faixa de ondas curtas também é utilizada pelas estações de radioamadores (PY) espalhadas por todos os países da Terra e que se comunicam por meio de várias faixas de onda. Como exemplo podemos citar as seguintes faixas:

a) Faixa de 80 m, cujas freqüências estão compreendidas entre 3,5 e 3,8 MHz.

b) Faixa de 40 m, cujas freqüências estão compreendidas entre 7,0 e 7,3 MHz.

c) Faixa de 20 m, cujas freqüências estão compreendidas entre 14,0 e 14,35 MHz.

d) Faixa de 15 m, cujas freqüências estão compreendidas entre 21,0 e 21,45 MHz.

e) Faixa de 10 m, cujas freqüências estão compreendidas entre 28,0 e 29,7 MHz.

A faixa de ondas curtas também é utilizada pelos radioamadores da chamada "faixa do cidadão" (PX), que se comunicam por meio da faixa de 11 metros, cujas freqüências estão situadas por volta de 27 MHz.

As ondas de rádio são designadas também pelos seus respectivos comprimentos de onda.

Os radioamadores comunicam-se utilizando transceptores, que são aparelhos de rádio capazes de transmitir e de receber ondas de rádio, ou seja, funcionam como transmissores e como receptores das ondas de rádio.

Continuando nossa análise com relação à Tabela nº 2, chegamos às bandas ou faixas de freqüências de VHF e UHF, que são usadas para comunicação a curta distância.

Uma parte da banda de VHF é utilizada pelas emissoras de radiodifusão, que transmitem seus programas em FM (freqüência modulada) e que também são bastante populares hoje em dia. A faixa de freqüências destas emissoras estende-se desde 88 MHz até 108 MHz.

A banda de VHF é utilizada também pelas emissoras de televisão e por transceptores de rádio que operam em FM, e que se comunicam por meio da faixa de 2 metros, cujas freqüências estão situadas por volta de 146 MHz.

A banda de UHF é utilizada para a retransmissão dos sinais das emissoras de televisão (repetidoras), sendo também utilizada para outros serviços, como o de radar, por exemplo.

As bandas de SHF e EHF são utilizadas para comunicação a curta, média e longa distância (satélites). São usualmente conhecidas como microondas, devido ao tamanho reduzido de seus comprimentos de onda (10 cm a 1 mm). Um exemplo de utilização destas bandas é na transmissão de sinais de TV ou de telefone através de microondas, seja por meio de torres ou via satélite.

3 - Propagação das Ondas de Rádio

Neste capítulo trataremos da maneira como a energia eletromagnética das ondas de rádio se propaga pelo espaço. A transmissão da energia eletromagnética das ondas de rádio é feita por meio de antenas, que são dispositivos capazes de emitir ou de receber a energia das ondas de rádio.

Direitos reservados

A energia das ondas de rádio, de modo geral, pode propagar-se através do vácuo, do ar, da água, da superfície terrestre etc. Portanto, a energia das ondas de rádio propaga-se também através das diversas camadas e subcamadas gasosas, de diferentes densidades, que envolvem a superfície da Terra. Essas camadas e subcamadas gasosas são classificadas de acordo com a altitude (distância) em relação à superfície terrestre. Assim, à medida que nos afastamos da superfície terrestre, temos diversas camadas e subcamadas com diferentes densidades e com diferentes características elétricas e magnéticas, que influem sobremaneira na propagação das ondas de rádio.

As características do meio onde as ondas de rádio se propagam influem consideravelmente na propagação da energia eletromagnética das ondas.

Durante o estudo da propagação das ondas de rádio, vamos admitir que cada meio de propagação possua uma espécie de "condutividade" que caracteriza certa facilidade para que a energia eletromagnética se propague. Vamos representar as ondas de rádio somente por seus respectivos raios de onda.

3.1 - MODOS DE PROPAGAÇÃO

A energia eletromagnética irradiada ou emitida pela antena de um transmissor de rádio pode ser recebida por uma antena receptora, localizada num ponto de recepção qualquer, através de um ou de mais de um dos seguintes modos de propagação:

1 - Onda direta.
2 - Onda refletida.
3 - Onda terrestre ou superficial.
4 - Onda troposférica.
5 - Onda ionosférica.

A figura 20 ilustra os modos de propagação das ondas de rádio que acabamos de apresentar.

As ondas direta(1), refletida(2) e troposférica (4) formam a chamada *onda espacial.*

Os modos de propagação das ondas de rádio estão relacionados com as bandas ou faixas de freqüências das referidas ondas (Tabela nº 2) e com a distância entre a antena transmissora e a antena receptora, que define o alcance das ondas e, portanto, da energia eletromagnética.

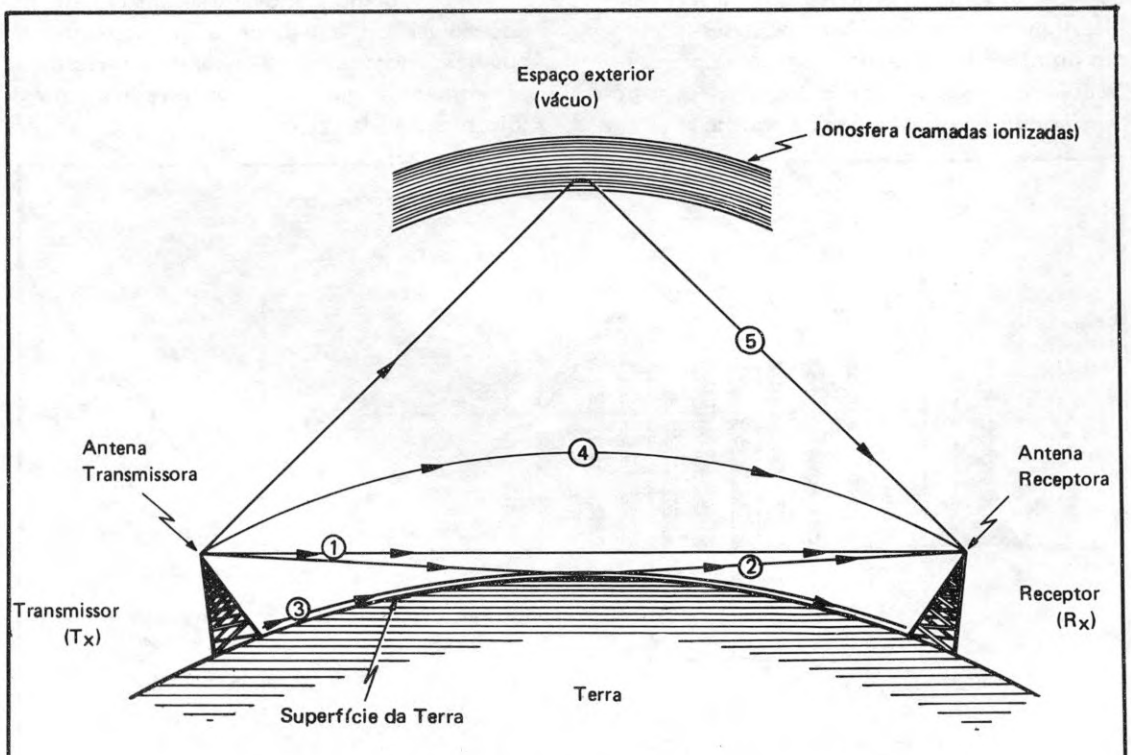


Figura nº 20 - Modos de propagação das ondas de rádio.

Direitos reservados

A propagação por meio das ondas direta (1), refletida (2) e troposférica (4), que compreendem as ondas especiais, é conseguida com freqüências superiores a 30 MHz, sendo que o alcance usual destas ondas é de aproximadamente 50 km. Exemplo: bandas ou faixas de VHF (rádio FM e TV), de UHF (TV e radar, por exemplo), de SHF (microondas e radar, por exemplo) e de EHF (microondas, por exemplo).

A propagação por meio das ondas ionosféricas (5) é conseguida com freqüências situadas entre aproximadamente 3 MHz e 30 MHz, e o alcance usual destas ondas é maior do que 100 km, sendo utilizadas para longas distâncias. Exemplo: Na banda ou faixa de HF existem as emissoras de ondas curtas (OC) que transmitem nas faixas entre 100 m e 10 m; e as estações de radioamadores (PY), com suas respectivas faixas.

A propagação por meio das ondas terrestres ou superficiais (3) é conseguida com freqüências situadas entre 300 KHz e 3 MHz aproximadamente, sendo o alcance usual destas ondas de cerca de 80 km. Exemplo: Na banda ou faixa de MF, existem as emissoras de ondas médias (OM) e também as emissoras de ondas curtas (OC), cuja faixa é de 120 m.

A propagação por meio das ondas terrestres ou superficiais (3) consegue-se ainda com freqüências inferiores a 300 KHz, sendo estas ondas rasteiras utilizadas para comunicações de longo alcance (longa distância). Exemplo: transmissores que têm suas bases localizadas próximas às costas do oceanos, empregando freqüências entre 18 KHz e 300 KHz, com potências muito elevadas. Estas freqüências fazem parte das faixas de LF e VLF.

A distância de propagação das ondas de rádio (alcance) está relacionada com a freqüência e com os modos de propagação das mesmas.

Podemos dizer que, de acordo com a freqüência das ondas de rádio, sempre haverá um dos modos de propagação apresentados, que será o modo dominante.

3.1.1 - ONDAS TERRESTRES OU SUPERFICIAIS

Quando as ondas de rádio são emitidas por uma antena transmissora vertical, uma parte destas ondas desloca-se praticamente em contato com a superfície da Terra, formando as chamadas *ondas terrestres ou superfíciais.*

Estas ondas de rádio recebem tal denominação porque viajam paralelamente à superfície terrestre. Contudo, elas podem propagar-se também pela superfície dos oceanos (água salgada), por exemplo. A figura 21 representa uma onda de rádio terrestre ou superficial propagando-se na direção e sentido de seu raio de onda (eixo z), a partir de uma antena transmissora vertical.

Como a antena transmissora está na posição vertical, a onda de rádio resultante está polarizada verticalmente. A antena vertical representada na figura 21 é uma torre fixa sobre o solo, mas isolada deste.

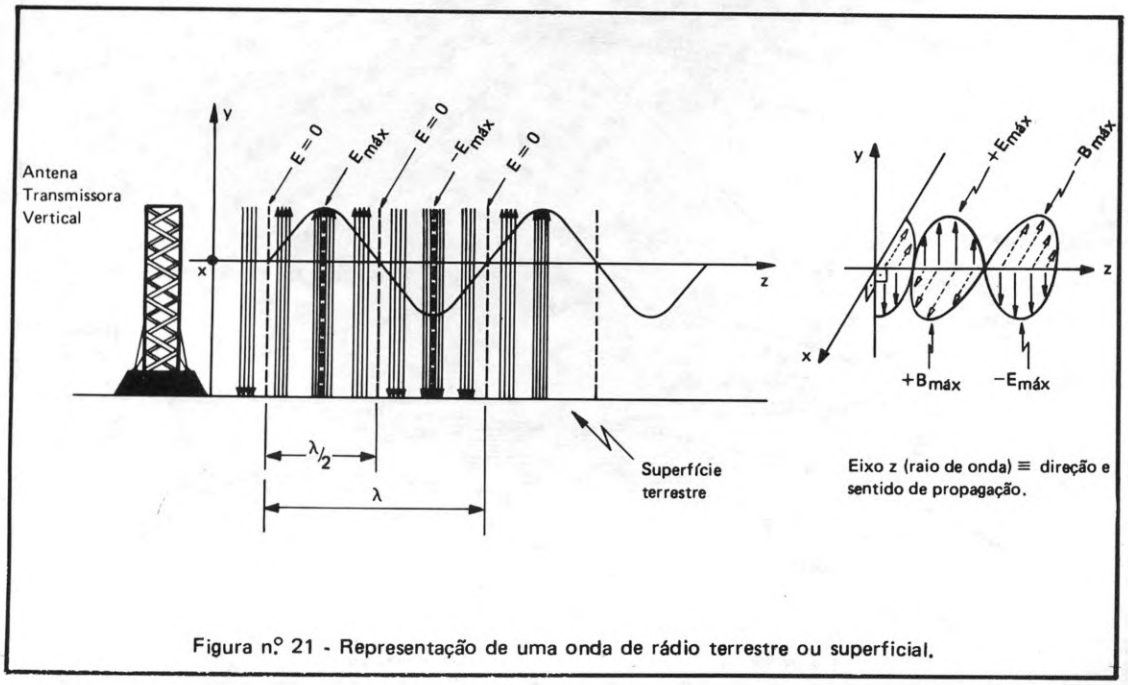


Figura nº 21 - Representação de uma onda de rádio terrestre ou superficial.

Direitos reservados

Este modo de propagação é o modo dominante em freqüências abaixo de 3 MHz, ou seja, nas bandas ou faixas de VLF, LF e MF.

A propagação das ondas terrestres ou superficiais é feita sobre a superfície do solo. A transmissão das emissoras em ondas médias (OM) é realizada por meio deste modo de propagação.

À medida que as ondas superficiais se afastam da antena transmissora, uma parte da energia eletromagnética das ondas é absorvida pela superfície da Terra ou pela superfície do meio onde elas se propagam. Esta perda de energia é causada por correntes elétricas parasitas, que são constantemente induzidas na superfície do meio considerado. Como sabemos, as ondas de rádio são ondas eletromagnéticas que possuem dois campos variáveis, o elétrico (E) e o magnético (H); o campo magnético variável se situa próximo do solo ou de outra superfície qualquer, sendo então o responsável pela indução das correntes elétricas parasitas.

O solo terrestre ou a água salgada (ou doce), por exemplo, possuem uma determinada condutividade.

Quanto maior for a condutividade da superfície do meio considerado, menor será a perda de energia eletromagnética das ondas de rádio em propagação, pois as correntes elétricas parasitas serão induzidas com maior facilidade neste meio, gastando menos energia. Um exemplo de superfície de boa condutividade são as superfícies dos oceanos: a condutividade da água salgada é cerca de 5 000 vezes maior do que a condutividade do solo terrestre seco. Por este motivo, os transmissores de baixa freqüência e de alta potência localizam-se o mais perto possível das costas dos oceanos.

As perdas das ondas superficiais dependem basicamente da condutividade do meio, da freqüência das ondas e da distância em relação à antena transmissora. Assim, as perdas de energia destas ondas aumentam quando a freqüência das ondas se torna mais elevada: acima de 3 MHz aproximadamente, as perdas atingem um valor tal que a distância de propagação se reduz a apenas alguns quilômetros. No entanto, sobre a superfície dos oceanos as comunicações a média e alta freqüência, entre os navios e as costas, são possíveis com distâncias de até 150 ou 300 km, porque as perdas de energia são inferiores. Portanto, sobre a superfície terrestre, o modo de propagação usando ondas superficiais ou terrestres só é usado para serviços locais.

3.1.2 - ONDAS IONOSFÉRICAS

As ondas de rádio que se propagam para cima e na direção do espaço exterior são chamadas de ondas ionosféricas, porque estas ondas têm a possibilidade de retornar à superfície da Terra ao encontrarem as camadas ionizadas da atmosfera, que constituem a chamada ionosfera.

O comportamento das ondas ionosféricas é diferente do comportamento das ondas terrestres ou superficiais. Uma parte das ondas incidentes na ionosfera se refrata várias vezes nessa camada, encurvando-se, de modo que essas ondas retornam à Terra. Assim, um receptor ou uma antena receptora que esteja localizada nas proximidades das ondas refratadas pela ionosfera receberá sinais intensos, mesmo que a localização da antena do receptor esteja a várias centenas de quilômetros além do alcance usual das ondas terrestres ou superficiais.

O raio da Terra é aproximadamente igual a 6 380 km. A atmosfera é a região gasosa que envolve a Terra e que possui uma altitude máxima de duas ou três vezes o raio da Terra, isto é, de 12 760 a 19 140 km, aproximadamente.

A ionosfera é uma parte da atmosfera rarefeita, cuja altitude varia desde cerca de 60 km até 560 km. É composta por várias camadas.

As ondas ionosféricas propagam-se para cima e na direção do espaço exterior, mas retornam à terra ao se refratarem nas camadas da ionosfera.

Vamos conhecer melhor a ionosfera. A ionosfera possui um número muito grande de elétrons livres e de íons positivos, e é por isso que dizemos que as camadas da ionosfera são camadas ionizadas. Assim, podemos definir uma densidade de elétrons livres para cada camada ionizada, ou mesmo uma densidade de ionização para cada camada, já que as camadas da ionosfera se alteram constantemente, dependendo das condições meteorológicas.

A ionização das camadas da ionosfera é produzida pela luz ultravioleta e por outras radiações emitidas pelo Sol. Assim, a rotação da Terra em torno de seu eixo (dia ou noite), o movimento da Terra em relação ao Sol (estação do ano) e as tempestades solares são fatores que influem no número de elétrons livres e de íons positivos presentes na ionosfera, alterando o número de camadas e a densidade de ionização de cada camada da ionosfera. Estes

Direitos reservados

fatores afetam a qualidade e a distância (alcance) das radiocomunicações realizadas através das ondas ionosféricas.

A ionosfera é uma camada de ar rarefeito situada acima da superfície da Terra, que se ioniza devido à luz ultravioleta e a outras radiações emitidas pelo Sol.

A densidade de ionização varia com a altitude e é por isso que podemos supor a ionosfera constituída por várias camadas. Esta suposição é feita para fins explicativos, já que a ionosfera se altera constantemente e não existem linhas demarcatórias rígidas entre as diversas camadas.

Já vimos que a ionosfera é uma região ou camada ionizada, que pode ser considerada como sendo formada por diferentes camadas, com diferentes densidades de ionização que variam com a altitude.

Na ionosfera, o número de elétrons livres e de íons positivos aumenta com a altitude, até atingir o máximo. Portanto, a concentração de elétrons livres, que caracteriza a densidade de ionização, aumenta com a altitude. E a cada densidade de ionização corresponde um determinado índice de refração (n), já estudado anteriormente nesta lição. Assim, quando as ondas ionosféricas em propagação incidem nas camadas ionizadas da ionosfera, podem penetrar nestas camadas e sofrer múltiplas refrações, que dependem dos índices de refração (n) de cada camada. Em outras palavras, cada camada da ionosfera possui um índice de refração (n), levando as ondas de rádio a modificarem suas trajetórias. O efeito destas camadas ionizadas é semelhante ao de um espelho côncavo que encurva os raios de onda (raios luminosos, por exemplo), ou seja, é semelhante ao efeito de um espelho que reflete os raios de onda, como os raios de luz. Portanto, levando em conta certos aspectos da ionosfera, a refração e a reflexão dos raios de onda possuem praticamente o mesmo significado. Um exemplo disto é quando um raio de onda incide perpendicularmente numa camada ionizada e é refletido ao longo do mesmo trajeto.

A figura 22(a) ilustra as camadas da ionosfera durante o dia e a figura 22(b) ilustra as camadas da ionosfera durante a noite. Estas camadas são indicadas por letras do alfabeto. A camada mais baixa é a camada D, e as superiores são as camadas E e F.

A ionosfera é composta pelas seguintes camadas:

a) Camada D: Encontra-se a uma altitude compreendida entre 60 km e 85 km, aproximadamente. A densidade de ionização é baixa e tem pouca influência sobre a propagação das ondas de rádio, a não ser para absorver energia eletromagnética (perdas), quando as ondas passam através desta camada. Sua densidade de ionização depende da hora do dia e da altura do Sol. A camada D existe apenas durante o dia e reflete as ondas da faixa de VLF e de LF,

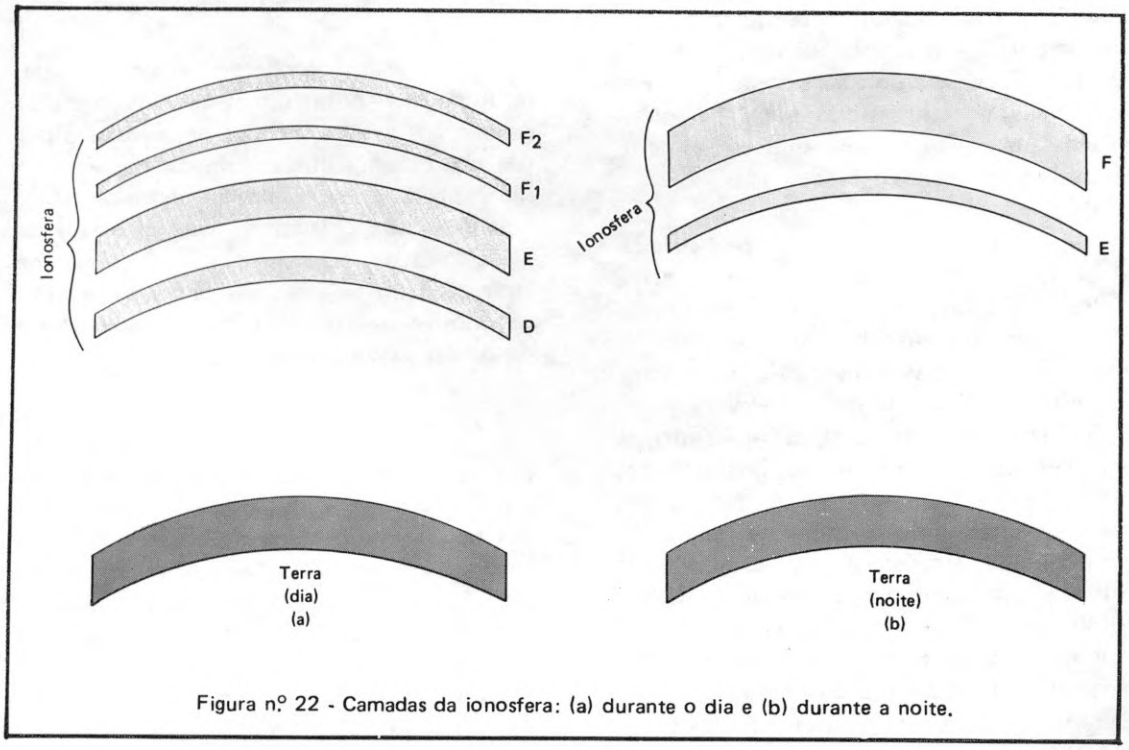


Figura nº 22 - Camadas da ionosfera: (a) durante o dia e (b) durante a noite.

Direitos reservados

absorvendo as ondas da faixa de MF e, parcialmente, as ondas da faixa de HF (ondas curtas). Portanto, a presença desta camada diminui a energia eletromagnética das ondas que são absorvidas, ou seja, atenua a intensidade do campo das ondas de rádio que são absorvidas por esta camada durante o dia.

b) Camada E: Encontra-se a uma altitude compreendida entre 85 km e 145 km, aproximadamente. É bem definida e a sua densidade de ionização máxima ocorre a 115 km, aproximadamente. Esta camada é maior durante o dia e menor durante a noite, sendo que sua máxima densidade de ionização ocorre ao meio-dia. Portanto, ao meio-dia esta camada às vezes consegue refratar ondas com freqüências maiores do que 20 MHz, refletindo-as, em seguida, de volta à superfície da Terra. Isto se torna importante para as transmissões diurnas com alcances superiores a 2 500 km.

A camada E, durante o dia, refrata e reflete as ondas de rádio da faixa de HF (ondas curtas) até uma distância de aproximadamente 1 600 km e, durante a noite, refrata e reflete as ondas de MF (ondas médias) até uma distância de aproximadamente 160 km.

c) Camada F: Encontra-se a uma altitude compreendida entre 145 km e 560 km, aproximadamente. À noite temos somente uma camada F, mas de dia, e de modo particular quando o Sol se encontra alto, esta camada se divide em duas, denominadas de camadas F_1 e F_2 (veja figura 22).

A camada F_1 está localizada entre 145 km e 250 km de altitude, aproximadamente. Esta camada existe somente durante o dia, refratando e refletindo principalmente as ondas da faixa de HF (ondas curtas).

A camada F_2 está localizada entre 250 km e 560 km de altitude, aproximadamente, e possui sua maior densidade de ionização durante a tarde. Esta camada é, praticamente, a camada refletora mais importante para as comunicações em HF (ondas curtas) a longas distâncias. A sua altura varia durante o dia, dependendo ainda das estações do ano e do ciclo das manchas solares (tempestades solares). Durante a noite, ou mais precisamente pouco depois do pôr-do-sol, as camadas F_2 e F_1 se fundem, formando a camada F, que atinge uma altitude superior a 500 km.

As ondas de rádio que se propagam através da ionosfera são chamadas de ondas ionosféricas. A transmissão das emissoras em ondas curtas (OC) é realizada por meio deste modo de propagação.

De acordo com a densidade de ionização de cada camada e com o ângulo de incidência dos raios de onda, existe uma chamada *freqüência crítica* (f_c) para as ondas de rádio, acima da qual os raios de onda não mais são refletidos pela ionosfera. Estes raios de onda podem atravessar toda a ionosfera e perder-se no espaço sideral. Podem ainda refratar-se nas camadas da ionosfera e não se refletirem, acompanhando a curvatura da Terra por meio destas camadas, e não mais regressarem à sua superfície (veja figura 23).

A capacidade que a ionosfera possui de fazer retornar uma onda de rádio à superfície da Terra depende da densidade de ionização de cada camada, da freqüência da onda e do ângulo de incidência do raio de onda.

Como vimos, as radiocomunicações através da ionosfera dependem de muitos fatores, como por exemplo da hora, do dia, do mês, das estações do ano, do ciclo de manchas solares, da freqüência, do ângulo de incidência etc. Portanto, *a freqüência crítica não é constante, mas varia de acordo com o local e com as condições meteorológicas.* Por este motivo existem nomogramas e tabelas de freqüências que predizem as máximas freqüências utilizáveis (MUF) e as mínimas freqüências utilizáveis (LUF) para cada hora do dia e em cada localidade onde se realizam transmissões. Estes nomogramas e tabelas de freqüências são elaborados com dados obtidos por meio de balões-sonda, satélites e por meio das estações meteorológicas espalhadas por toda a terra.

O modo de propagação por meio das ondas ionosféricas é o modo dominante para freqüências da faixa de HF (ondas curtas).

A figura 23 ilustra um exemplo de propagação por meio de ondas ionosféricas e por meio de ondas terrestres. Compare estes dois modos de propagação.

As ondas ionosféricas podem refratar-se e refletir-se várias vezes entre as camadas da ionosfera e a superfície da Terra, em pontos situados entre o transmissor (T_x) e o receptor (R_x). No exemplo da figura 23, a onda ionosférica parte do ponto A (T_x), refrata-se e reflete-se nas camadas da ionosfera, atingindo uma pequena área representada pelo ponto B, onde se supõe existir receptores (R_x) na superfície da Terra. A mesma onda é, em seguida, refletida

Direitos reservados

pela superfície terrestre, retornando à ionosfera, onde se refrata e se reflete, voltando novamente a atingir uma pequena área em torno do ponto C (R_x), e assim por diante. As várias refrações são chamadas de refrações múltiplas e as várias reflexões são chamadas de reflexões múltiplas. Neste exemplo, a onda realiza vários "saltos", mas às vezes pode ocorrer apenas um, tudo dependendo da energia eletromagnética da onda.

É comum que uma onda possua energia suficiente para executar vários "saltos", aumentando notadamente o alcance das transmissões. Devido a este efeito, conhecido como transmissão por saltos múltiplos, é possível a radiocomunicação ao redor do mundo e além dos oceanos, utilizando-se potências médias.

Observe ainda a figura 23. A área entre os pontos B e C, por exemplo, é denominada de zona de salto. A área entre os pontos A e E recebe transmissões por meio de ondas terrestres ou superficiais. Nenhum dos receptores localizados na área entre os pontos E e B receberá transmissões do ponto A (T_x), porque nem as ondas ionosféricas e nem as ondas terrestres ou superficiais atingirão tal área. Esta área ou região da superfície da Terra recebe o nome de *zona de silêncio.*

Entretanto, devido a outros possíveis ângulos de incidência das ondas ionosféricas, a área entre os pontos B e C poderá receber transmissões do ponto A (T_x), com o modo de propagação via ondas ionosféricas.

Com a utilização das ondas ionosféricas é possível a radiocomunicação ao redor do mundo (longas distâncias).

3.1.3 - ONDAS ESPACIAIS

Como sabemos, as ondas espaciais englobam as ondas diretas, as ondas refletidas e as ondas troposféricas.

De acordo com a freqüência de transmissão não se utiliza o modo de propagação por meio de ondas terrestres ou superficiais, devido ao aumento da atenuação da intensidade das ondas na superfície terrestre (perdas) com o aumento da freqüência. Também não se utiliza o modo de propagação por meio das ondas ionosféricas, porque, com o aumento da freqüência de transmissão, estas ondas penetram nas camadas da ionosfera e se perdem pelo espaço sideral. Portanto, com o aumento da freqüência de transmissão, tem-se a opção de utilizar o modo de propagação por meio de ondas espaciais, ou seja, a transmissão da energia eletromagnética das ondas por linha reta, também conhecida como transmissão por linha de visão direta.

A comunicação feita por meio das ondas espaciais utiliza-se de freqüências das faixas de VHF, UHF, SHF e EHF, que são as freqüências mais elevadas das ondas de rádio. As ondas espaciais são utilizadas para pequenas distâncias, nas quais não existem praticamente obstáculos significativos ao longo da trajetória.

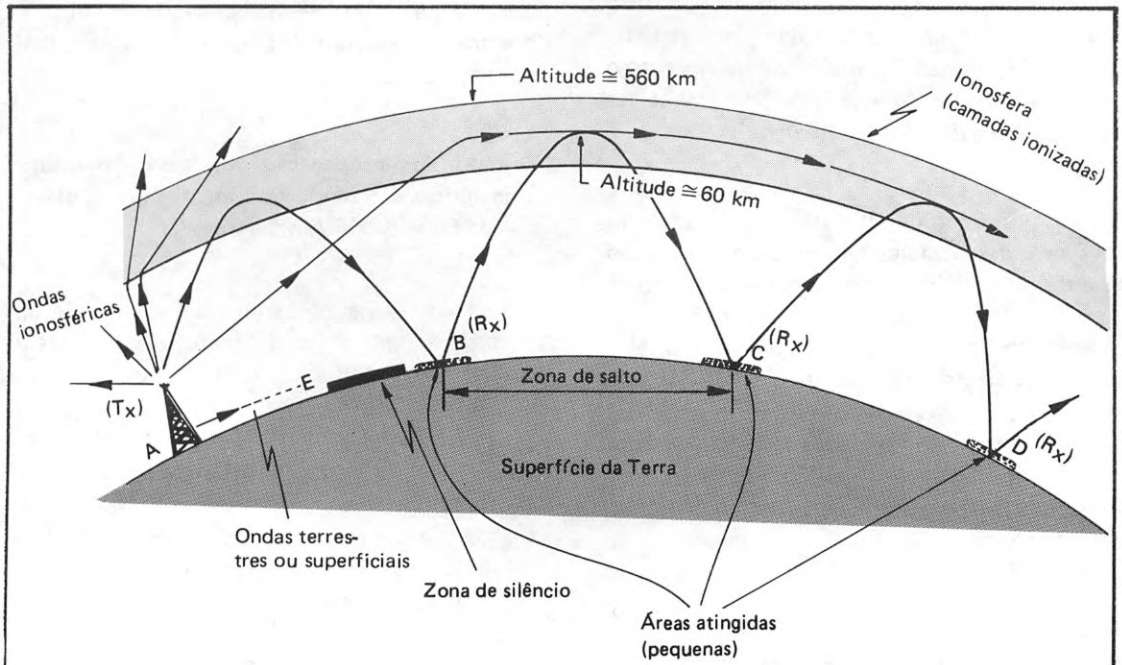


Figura nº 23 - Propagação por meio de ondas ionosféricas, na qual ocorrem múltiplas refrações e reflexões, e propagação por meio de ondas terrestres ou superficiais.

Direitos reservados

Para compreendermos melhor a propagação das ondas de freqüência elevada, é conveniente termos em mente que, quanto maior for a freqüência das ondas de rádio, maior será a semelhança entre a propagação dos raios destas ondas e a propagação dos raios de luz (linha reta).

A figura 24 ilustra uma antena transmissora irradiando ondas que seguem trajetórias retilíneas até as antenas receptoras.

sofrem os fenômenos da refração e da difração, tornando-se encurvadas em direção à superfície terrestre.

Na figura 25 temos uma comparação entre o trajeto retilíneo e o trajeto curvo das ondas espaciais.

Se o trajeto fosse retilíneo, teríamos uma limitação pela linha de visão direta da transmissão, ou seja, a distância entre a antena transmissora e a receptora em linha reta, que

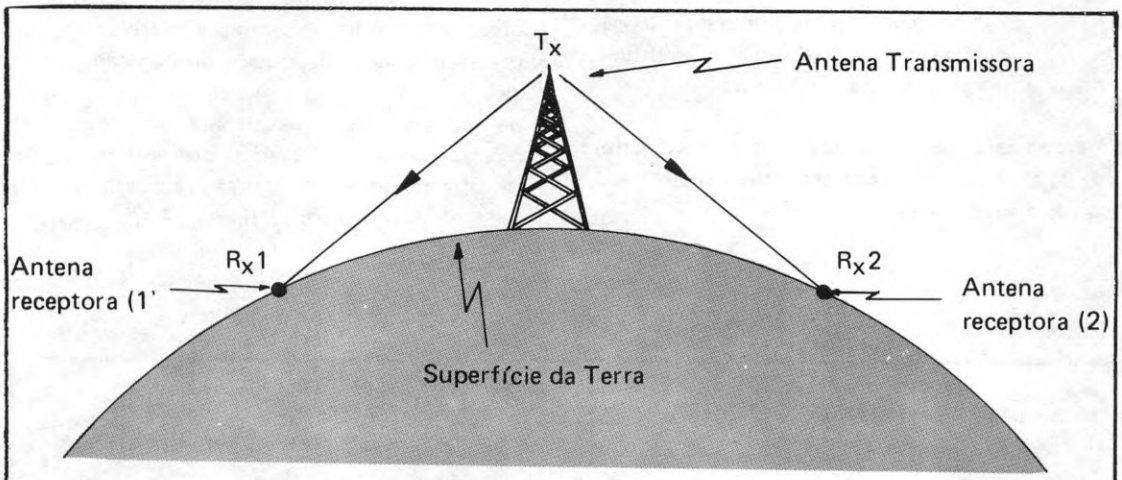


Figura nº 24 - Antena transmissora, irradiando ondas diretas para as antenas receptoras.

As ondas irradiadas diretamente para as antenas de recepção costumam ser chamadas de ondas diretas. Isto é uma simplificação, pois não é o que ocorre realmente. Na verdade, as ondas de rádio são encurvadas devido aos diferentes índices de refração (n) das camadas da troposfera, e também devido à difração das referidas ondas, que fazem com que estas ondas acompanhem até certa distância a curvatura da Terra. Portanto, na verdade as ondas espaciais

define o chamado horizonte de rádio, ficaria limitada, fixa. Como o trajeto na realidade é curvo, a energia das ondas propaga-se para além do horizonte de rádio. Portanto, a área atingida pelas transmissões de uma emissora de rádio FM (VHF) ultrapassa a distância referente ao horizonte de rádio, devido aos fenômenos de refração e de difração que provocam um encurvamento nos raios de onda, cuja tendência é acompanhar a curvatura do globo terrestre.

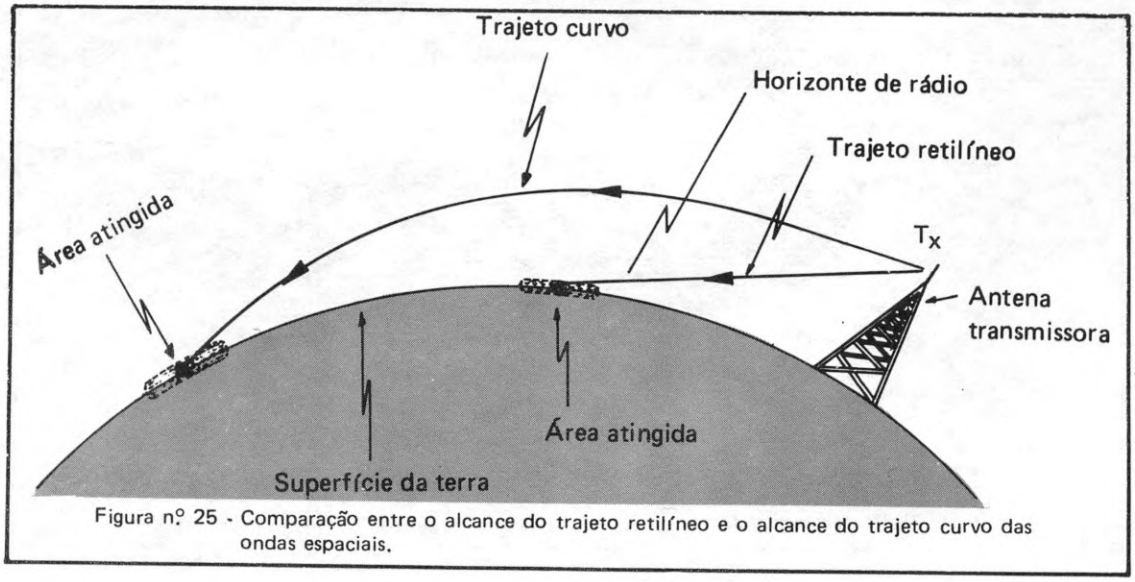


Figura nº 25 - Comparação entre o alcance do trajeto retilíneo e o alcance do trajeto curvo das ondas espaciais.

Direitos reservados

A troposfera é uma camada gasosa da atmosfera que envolve toda a superfície terrestre e cuja altitude está compreendida entre 1 km e 11 km, aproximadamente. O índice de refração (n) nas camadas da troposfera diminui com a altitude. É por isso que os raios de onda têm sua trajetória encurvada, tornando maior o alcance das ondas. Neste caso, também existem múltiplas refrações nas camadas da troposfera, daí resultando o encurvamento dos raios de onda.

Na troposfera predominam o oxigênio, o nitrogênio, o gás carbônico e, eventualmente, vapores de água são encontrados.

A troposfera é uma camada gasosa da atmosfera, cuja altitude está compreendida entre 1 km e 11 km, aproximadamente.

As ondas que se propagam por meio da troposfera são chamadas de ondas troposféricas. Estas ondas têm importância prática em radiocomunicações das faixas de VHF, UHF, SHF e EHF; mas, principalmente, na faixa de VHF (rádio FM e TV).

A figura 26 ilustra a representação de uma onda troposférica propagando-se entre uma antena transmissora (T_x) e uma antena receptora (R_x).

Se a distância entre a antena transmissora e a antena receptora é relativamente pequena, podemos dizer que a propagação se realiza por linha de visão direta, ou seja, por meio de ondas diretas ou visuais. Mas, além das ondas diretas, existem também as ondas refletidas pelo solo, sendo que ambas são recebidas pela antena, conforme ilustra a figura 27.

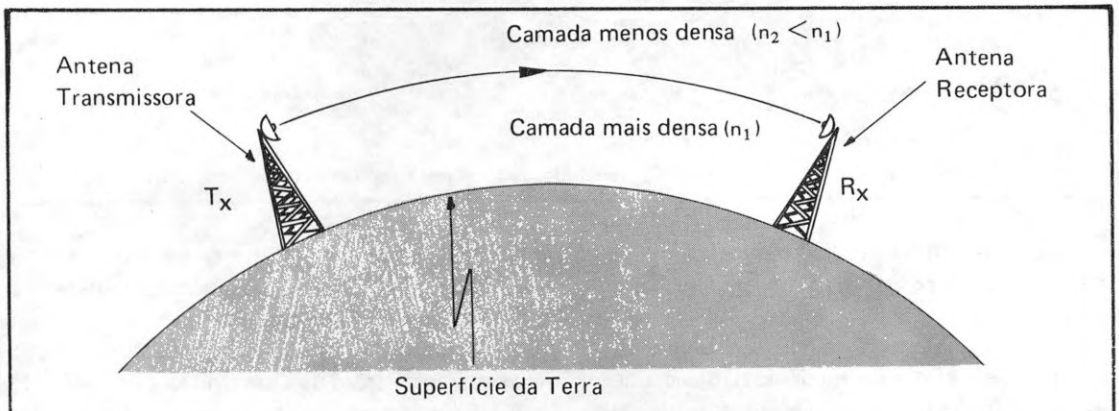


Figura nº 26 - Representação da propagação de uma onda troposférica.

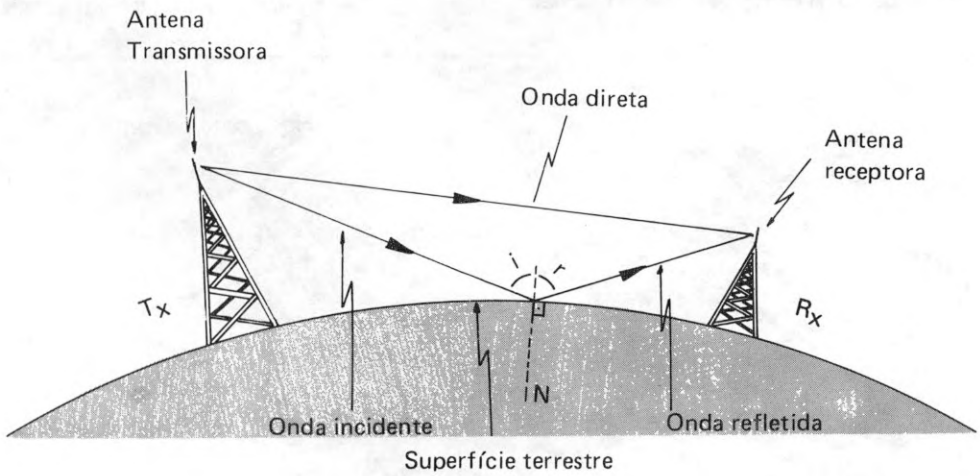


Figura nº 27 - Representação da onda direta e da onda refletida sendo recebidas pela antena.

Direitos reservados

A onda refletida pelo solo ou por um obstáculo qualquer pode, eventualmente, cancelar, somente enfraquecer, ou mesmo reforçar a intensidade do campo resultante na antena receptora, pois, como já estudamos durante a reflexão das ondas, a fase das mesmas pode mudar.

À resultante da onda direta, da onda refletida e da onda troposférica dá-se o nome de onda espacial.

Nas ondas de freqüência elevada, principalmente as das faixas de VHF e UHF, quando a antena transmissora e a antena receptora estão elevadas em relação ao solo, é preciso considerar as ondas espaciais, constituídas pelas ondas diretas, pelas ondas refletidas e pelas ondas troposféricas. O campo resultante na antena é a soma dos três campos parciais, podendo-se desprezar as ondas ionosféricas e as ondas terrestres ou superficiais.

O modo de propagação por meio das ondas espaciais (direta, refletida e troposférica) é o modo dominante para freqüências das faixas de VHF e UHF, principalmente.

Direitos reservados