

Componente de Física

Unidade 2 – Comunicações

O **som** propaga-se através de ondas sonoras ou acústicas, ondas essas que necessitam de um suporte material para se propagarem, ao contrário do que acontece com as ondas electromagnéticas, radiação, que se podem propagar no vazio.

A velocidade do som varia de meio material para meio material e é dada como a rapidez com que as ondas sonoras se propagam. No ar, a velocidade do som é cerca de 340 m s^{-1} . Claro que a temperatura do ar e a humidade relativa também influenciam esta rapidez.

O som apresenta algumas **propriedades**:

- **Altura**, que depende da frequência de vibração*, a qual permite distinguir sons graves (de baixa frequência) de sons agudos (de alta frequência);
- **Intensidade**, que apresenta dois aspectos – a intensidade do som** e a intensidade auditiva***;
- **Timbre**, que permite distinguir dois sons com a mesma altura e a mesma intensidade mas emitidos por diferentes fontes sonoras, dependendo pois da forma da onda sonora.

* - Número de vibrações efectuadas por unidade de tempo

** - Energia transferida pela onda sonora por unidade de tempo e por unidade de superfície perpendicular à direcção de propagação, $I = \frac{(E / \Delta t)}{S} = \frac{P}{S}$

*** - Sensação sonora detectada pelo ouvido humano, a qual permite distinguir sons fracos (de pequena amplitude) e sons fortes (grande amplitude)

2.1 Comunicação de informação a curtas distâncias

A informação chega até nós de duas formas: directa ou indirectamente.

De forma directa chega até nós via aparelhos de rádio e televisão, telefone ou Internet.

De forma indirecta chega até nós via gravação em disco ou fita magnética, os quais são meios capazes de os armazenar.

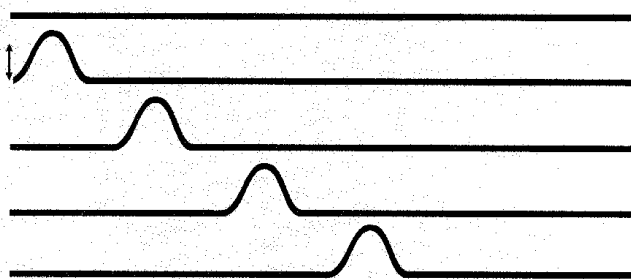
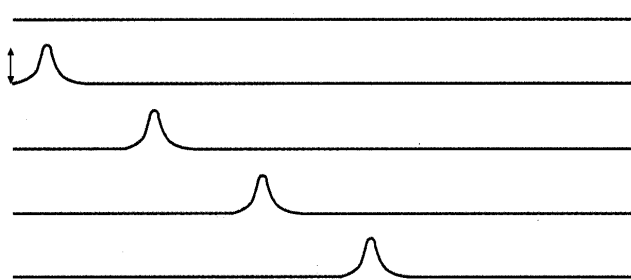
Todas as formas de comunicação envolvem a utilização de **sinais**.

2.1.1 Transmissão de sinais

Para comunicar é necessário ter uma perturbação que se propague.

Um sinal é uma alteração de uma propriedade física de um meio, logo um sinal é uma perturbação.

Considera a figura seguinte, a qual representa a produção de uma perturbação na extremidade de uma corda esticada, através de um movimento rápido da mão para cima e para baixo, um **pulso**, e a sua propagação ao longo da corda, ao longo do tempo.



Um pulso é um sinal de curta duração, i.e., é um sinal que é definido somente em intervalos de tempo curtos ou em instantes isolados.

A perturbação é transversal à sua direcção de propagação.

Quando o pulso se propaga ao longo da corda, esta permanece no mesmo sítio, existindo apenas o deslocamento da perturbação ao longo da corda.

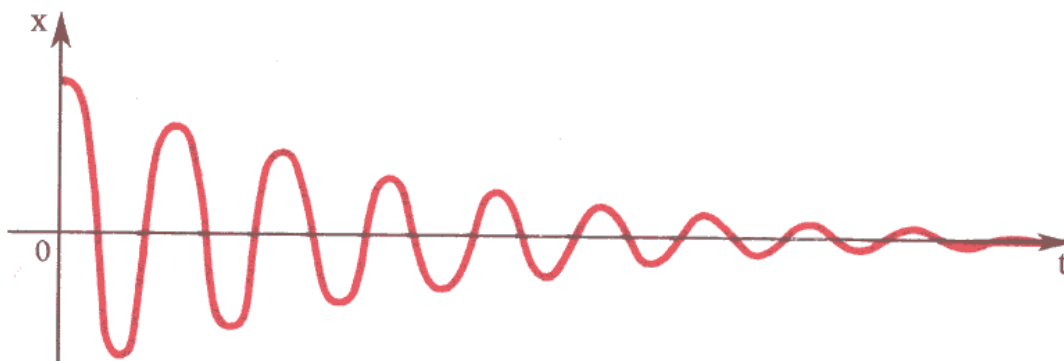
Quando a corda está esticada, as partículas que a constituem ocupam posições de equilíbrio.

A criação de um pulso traduz uma **perturbação desta situação de equilíbrio** pois, numa certa região da corda passamos a ter partículas que são afastadas das suas posições de equilíbrio, comunicando-se a perturbação às partículas vizinhas, avançando esta ao longo da corda e ao longo do tempo.

Então, o pulso que num dado instante se situa numa dada zona da corda, num instante posterior encontra-se noutra local. A perturbação é sinónimo de afastamento da posição de equilíbrio o que nos leva a concluir que, para além de energia cinética, o pulso tem energia potencial, existindo transferência de energia ao longo da corda.

Idealmente, a forma da perturbação mantém-se durante a propagação.

Na realidade, contudo, ocorre dissipação de energia e a perturbação vai diminuindo a sua velocidade de propagação e vai amortecendo.



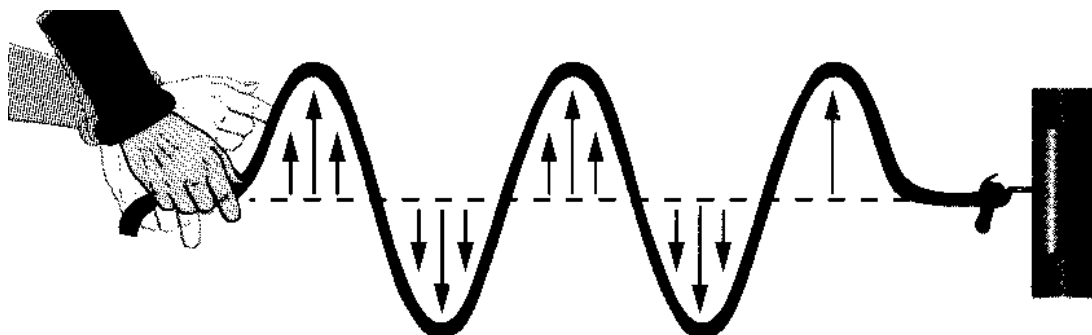
Assim, a propagação de uma perturbação é designada por **onda**. Uma onda transporta energia mas não transporta matéria.

A propagação de um pulso é uma onda solitária.

Se o sinal fosse definido para qualquer instante, tendo por isso um intervalo longo de definição, este seria de longa duração.

As ondas persistentes, sinais de longa duração, são geradas por fontes emissoras de pulsos consecutivos.

Um modo simples de produzir ondas persistentes numa corda consiste em oscilar a extremidade livre da corda para cima e para baixo, gerando pulsos iguais e sucessivos. À medida que a onda se propaga, cada partícula da corda move-se para cima e para baixo alternadamente.

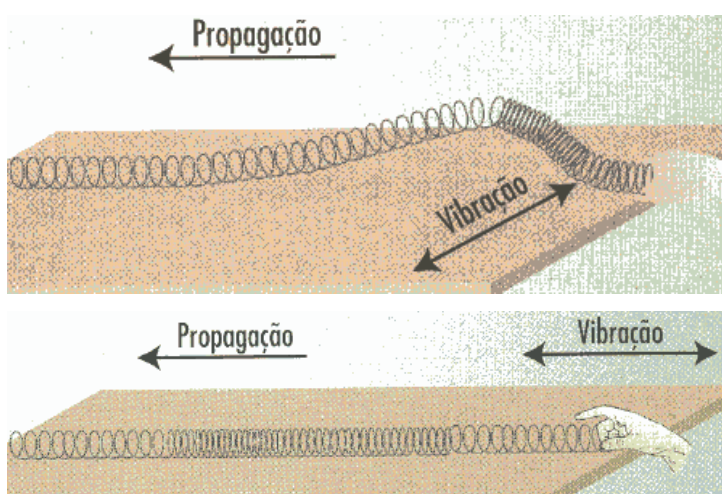


Um barco que passa perto de uma criança que toma banho num lago produz uma ondulação periódica.



Tal faz com que a criança, não saindo do mesmo local, passe a oscilar para cima e para baixo, movimentando-se as ondas transversalmente a ela.

A figura seguinte mostra a diferença entre uma **onda transversal** e uma **onda longitudinal**.



A direcção de propagação da onda é perpendicular à direcção da vibração, i.e., da perturbação imposta.

A direcção de propagação da onda é a mesma que a da vibração, i.e., da perturbação imposta.

As ondas electromagnéticas são ondas transversais. As ondas sonoras, que são ondas mecânicas, são ondas longitudinais.

Qualquer que seja o tipo de onda que se tenha, existe sempre um certo intervalo de tempo que medeia o instante em que o sinal (perturbação) é produzido e o instante em que este é recebido. Sabendo quanto vale esse intervalo de tempo, Δt , e conhecendo a distância entre o emissor e o receptor, d , podemos calcular a velocidade de propagação da onda. Assim:

$$\|\vec{v}\| = \frac{d}{\Delta t}$$

e indica a rapidez com que a onda se propaga no espaço.

A velocidade de propagação de uma onda depende, em geral, do meio onde se propaga.

O quadro 1 mostra isso mesmo.

Onda	Meio	Velocidade (m/s)
luz	vazio, ar	$3,0 \times 10^8$
luz	vidro	$2,0 \times 10^8$
som	ar seco (PTN) / ar (25°C, 1 atm)	331/340
som	hidrogénio	1270
som	dióxido de carbono	258
som	Água (8°C)	1435
som	aço (15°C)	4980
sísmica	continentes	6000
sísmica	crusta oceânica	7000

Quadro 1 – Velocidades de propagação de vários tipos de ondas

A propagação de ondas sonoras ocorre tanto no ar como noutros meios, quer sólidos, quer líquidos, quer gasosos. As ondas sonoras não se podem propagar no vazio, o que se comprova colocando uma campainha eléctrica no interior de uma campânula com uma bomba de vazio. À medida que se extrai o ar, diminuindo a pressão do ar no interior da campânula, a intensidade do som decresce progressivamente até se extinguir.

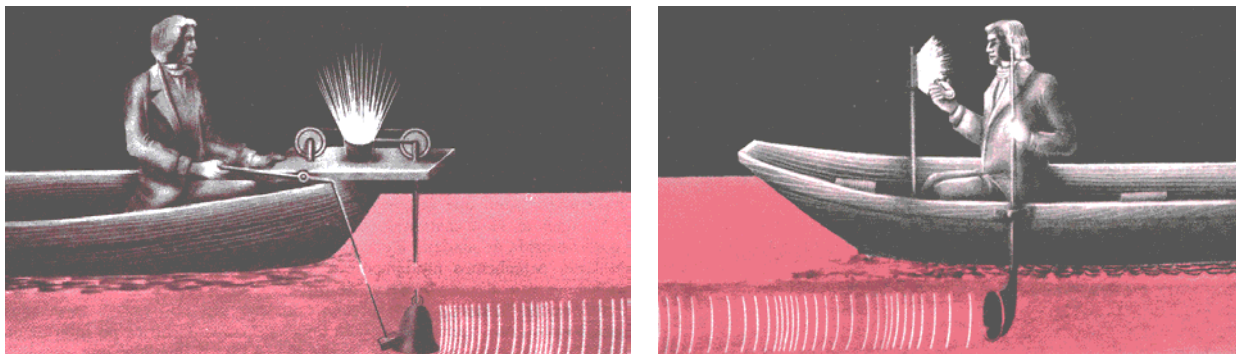
A velocidade do som no ar não depende da densidade deste, sendo aproximadamente igual à velocidade média do movimento térmico das moléculas, que é proporcional à raiz quadrada da temperatura absoluta, i.e., $v \propto \sqrt{T}$.

Mas, quanto maior for a massa das moléculas de um gás, menor é a velocidade de propagação do som nele.

Nos meios líquidos a velocidade de propagação do som é superior à que se verifica nos meios gasosos e nos meios sólidos superior à que se verifica nos meios líquidos.

Na água, a velocidade do som é superior à que se verifica no ar. Tal foi medido, pela primeira vez, em 1827, no lago de Genebra. Numa embarcação procedeu-se à inflamação de uma porção de pólvora e, ao mesmo tempo, bateu-se num sino mergulhado na água. Numa outra embarcação, à distância de 14 km, o som transmitido

no seio da água foi interceptado por um tubo acústico também submerso, como mostra a figura seguinte.



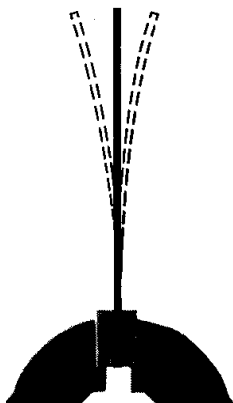
A velocidade de propagação do som na água foi calculada a partir da diferença nos instantes entre a fulguração da pólvora e a chegada do som.

No aço a velocidade de propagação do som é ainda maior. Se encostarmos o ouvido a uma extremidade de um carril e alguém bater na outra extremidade do mesmo, ouviremos duas pancadas: a primeira chega através do carril e a segunda pelo ar.

Onda periódica: características e periodicidade no tempo e no espaço

As ondas à superfície da água ou numa corda são visíveis. Contudo, em meios transparentes, como o ar, as ondas deixam de se ver, podendo, em certas condições, tornar-se audíveis.

Consideremos uma lâmina metálica, presa no torno de uma bancada, posta em vibração, i.e., afastando a sua extremidade livre da sua posição de equilíbrio, conforme mostra a figura seguinte.

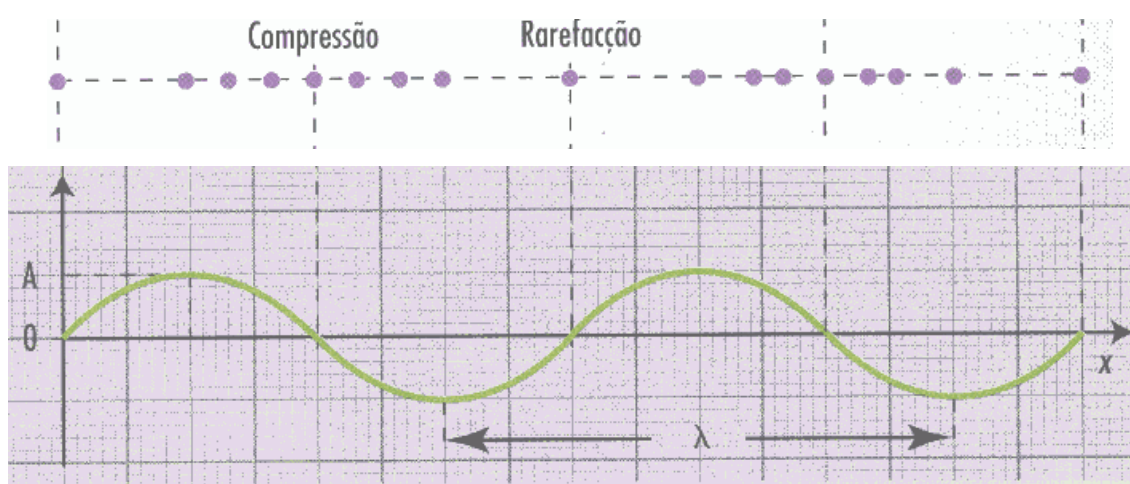


Ela comprime o ar por um dos seus lados, ao passo que do lado oposto o ar é rarefeito, tal que estas compressões e rarefações se sucedem alternadamente e se propagam nos dois sentidos, constituindo uma onda longitudinal elástica que produz no ar variações periódicas de pressão, i.e., uma **onda periódica**.

Atingindo os nossos ouvidos, origina neles sensações sonoras.

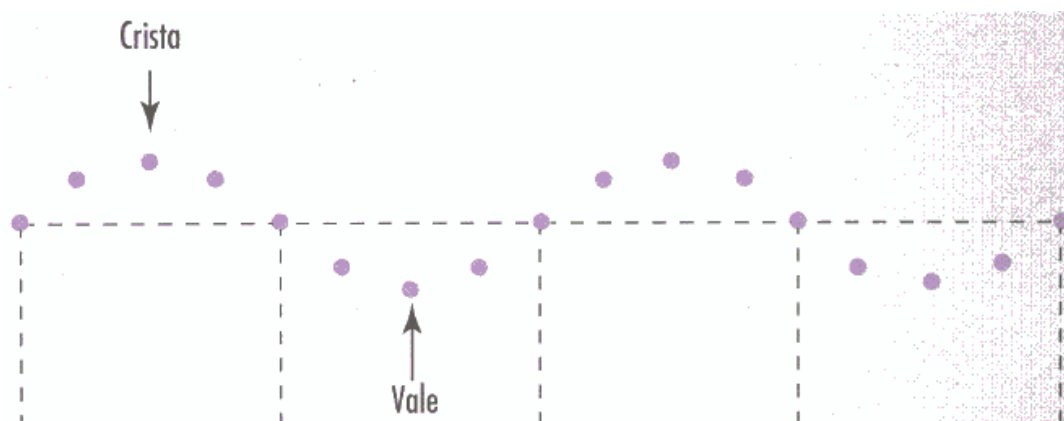
Trata-se de uma **onda periódica** uma vez que a fonte ou origem da perturbação tem **movimento periódico**.

Então, as partículas do ar circundante vão começar a entrar em vibração com um certo atraso relativamente à fonte e, dado que a perturbação se propaga no meio que é o ar com uma determinada velocidade, num dado instante genérico, as partículas do ar circundante, que se encontram distanciadas da fonte segundo um mesmo eixo, e segundo uma mesma orientação, por exemplo a orientação positiva de um eixo $0x$, ocupam as posições indicadas na figura seguinte,



a qual pode ser traduzível através de um **gráfico das elongações das partículas**, em função das suas distâncias à origem da perturbação, no qual ao valor máximo do módulo da elongação de cada partícula chamamos **amplitude da onda**, A .

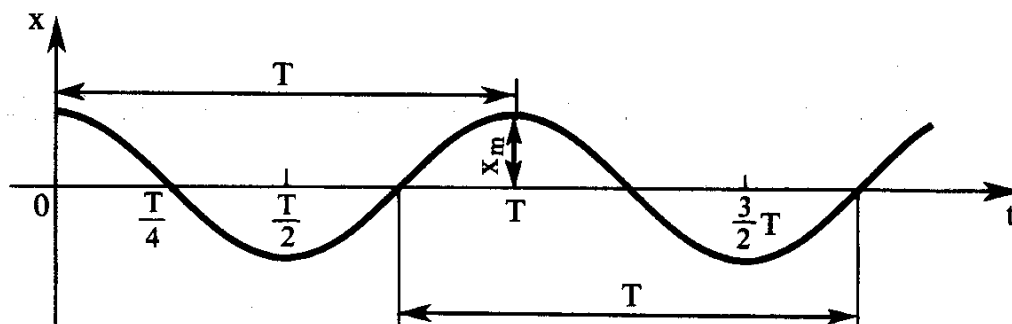
Se se tratar de uma onda transversal, como a que é obtida por meio de uma perturbação periódica numa corda, temos:



De qualquer maneira, uma onda periódica é aquela que resulta da propagação de pulsos iguais emitidos em intervalos de tempo iguais.

Assim:

- o **período de uma onda** (T) é o intervalo de tempo entre a emissão de dois pulsos, e só depende do período de oscilação da fonte emissora;



- o **comprimento de onda** (λ) é a distância que a onda avança ao fim de um período, e depende do meio de propagação;
- a **amplitude de uma onda** (A) depende da amplitude da fonte emissora;
- a **frequência da onda** (f) é o número de oscilações por unidade de tempo, e depende da frequência da fonte emissora.

Para o ouvido humano, o domínio das frequências audíveis é variável e situa-se, em média, entre os 17 e os 20000 Hz, o que equivale a um intervalo de comprimentos de onda situados de 20 m a 17 mm.

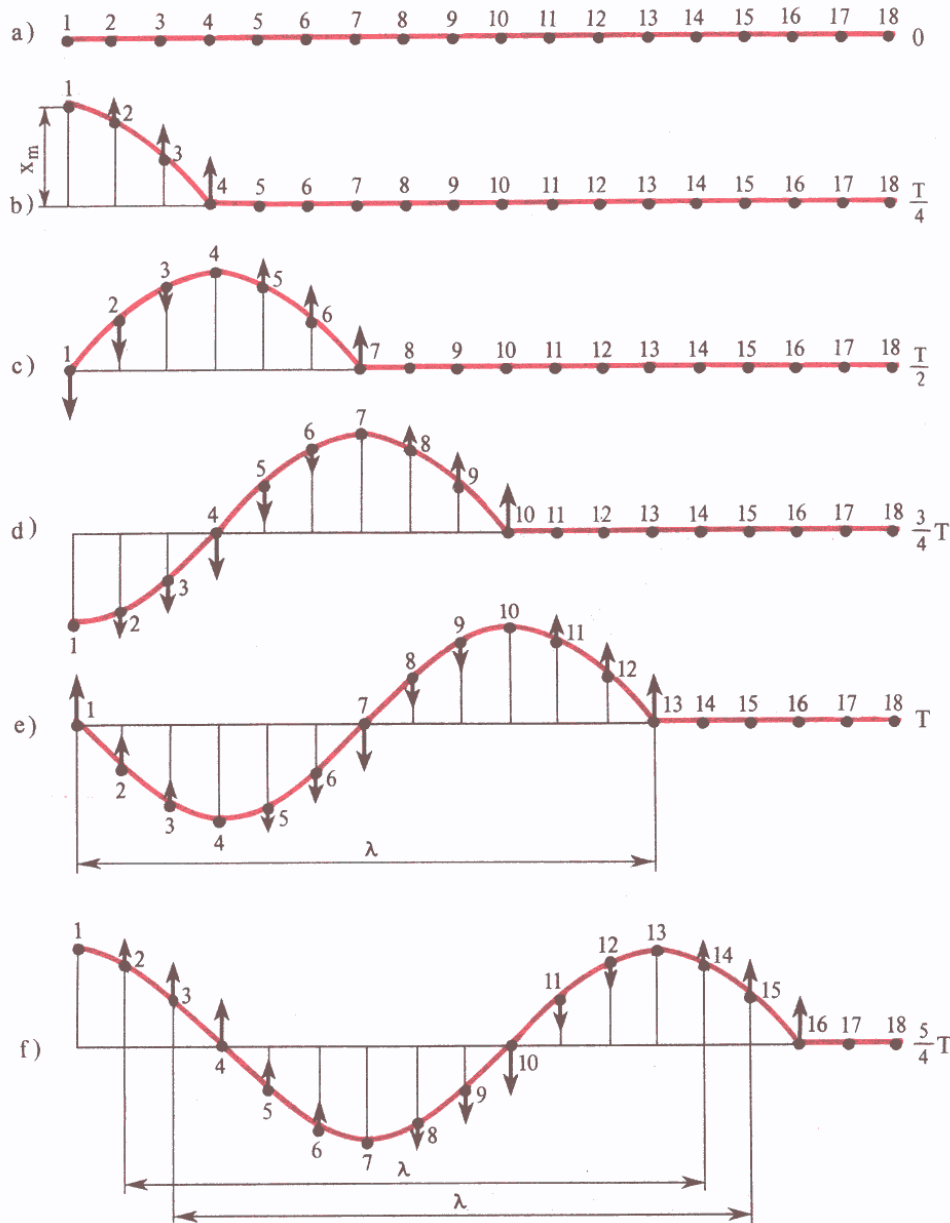
Logo, dado que temos $v = \frac{d}{\Delta t}$, obtemos $v = \frac{\lambda}{T}$, ou $\lambda = vT$, i.e., a relação entre o

comprimento de onda e o período da vibração. Como $f = \frac{1}{T}$, a relação anterior pode

vir também expressa como $\lambda = \frac{v}{f}$, i.e., a relação entre o comprimento de onda e a

frequência da vibração.

Representação temporal das vibrações sucessivas de pontos de um meio, relativamente à sua posição de equilíbrio



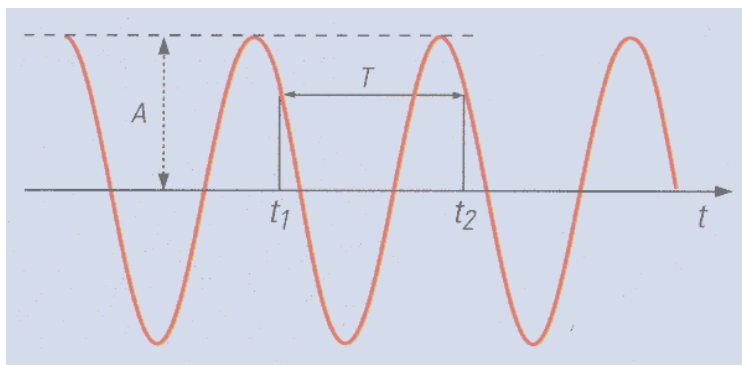
Na figura acima, as situações a), b), c), d), e) e f) representam o processo de propagação da onda, uma onda progressiva, indicando as posições das partículas do meio em instantes sucessivos, que distam entre si um quarto do período das oscilações. As setas nos pontos representam os vectores velocidade do movimento das mesmas nos instantes considerados.

Na situação f), para o instante $t = \frac{5}{4}T$, os pontos 1 e 13, 2 e 14, 3 e 15, ou seja, quaisquer dois pontos separados pela distância $n\lambda$, com $n = 1, 2, 3, \dots$, dizem-se em **fase**. Os pontos 1 e 7, 2 e 8, 3 e 9, ou 7 e 13, encontram-se em **oposição de fase**.

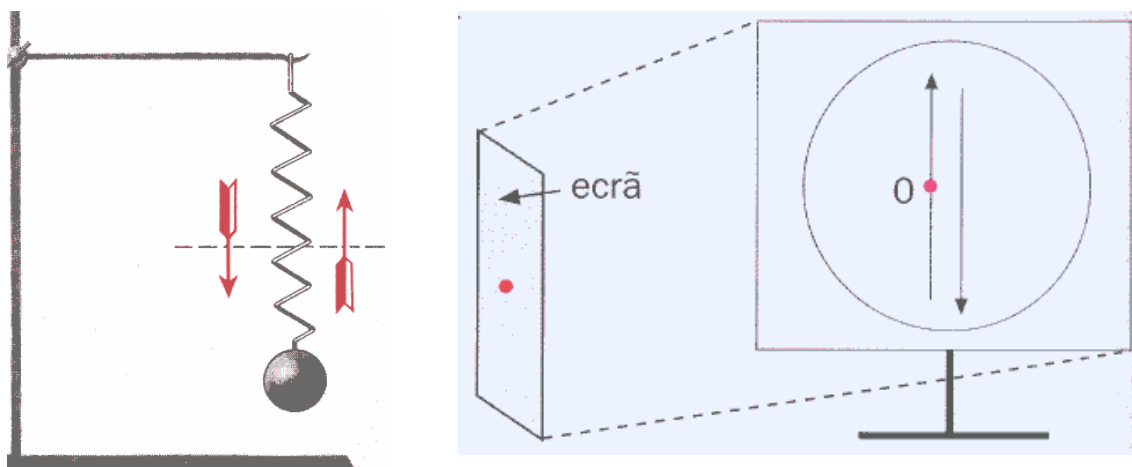
Assim, todos os pontos separados por distâncias $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$, ..., encontram-se também em **oposição de fase**.

Sinal harmónico e onda harmónica

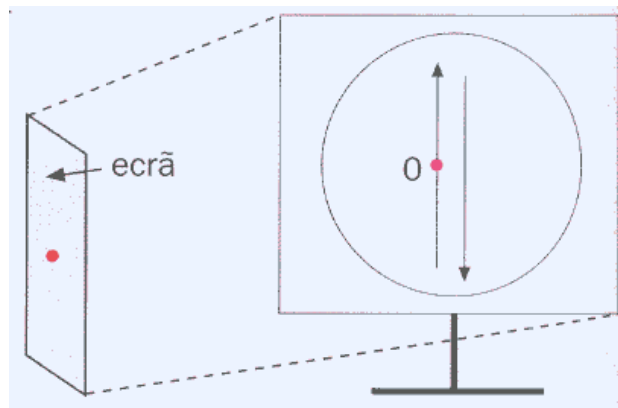
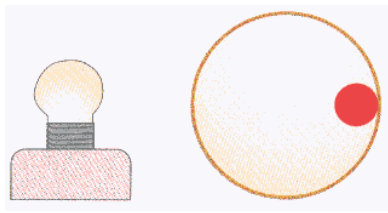
A figura seguinte representa a evolução temporal de uma onda progressiva periódica.



Esta onda diz-se **sinusoidal** ou **harmónica**. Porquê?



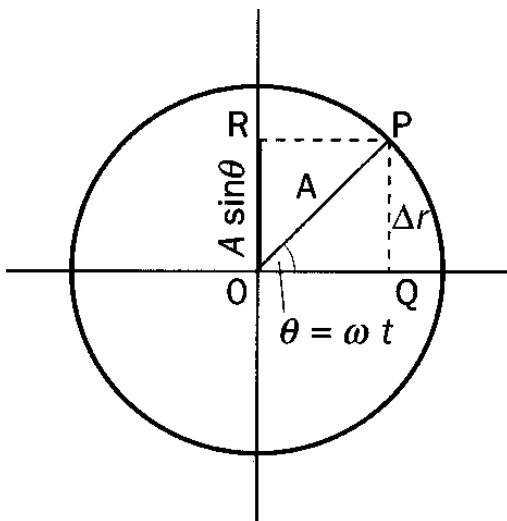
Considerando o movimento oscilatório, para cima e para baixo, representado na figura da esquerda, e se o projectarmos, através de um foco, num ecrã, o que vemos é o oscilador assumir posições periódicas sobre um eixo vertical, conforme representa a figura da direita. Se traçarmos o gráfico da posição do oscilador, relativamente à sua posição de equilíbrio (elongação), ao longo do tempo, obtemos a onda supracitada.



Se considerarmos um corpo animado de movimento circular uniforme, iluminado por um foco, como representa a figura da esquerda, tal que a sua projecção seja feita num ecrã, o que obtemos projectado é o corpo a assumir posições periódicas sobre um eixo vertical, conforme representa a figura da direita. Se traçarmos o gráfico da posição do corpo vamos de novo obter a representação de uma onda semelhante à anterior.

Podemos então comparar o movimento de um oscilador com o movimento circular uniforme.

A figura seguinte representa o **movimento harmónico simples** de um oscilador quando projecção do movimento circular uniforme.



Assim, considera-se a origem dos tempos como um instante em que o oscilador passa na posição de equilíbrio, deslocando-se no sentido arbitrado como positivo.

O raio da circunferência (A) descreve um ângulo ao centro (θ) ao fim de um certo intervalo de tempo correspondendo-lhe um valor de deslocamento (Δr), relativo à posição de equilíbrio.

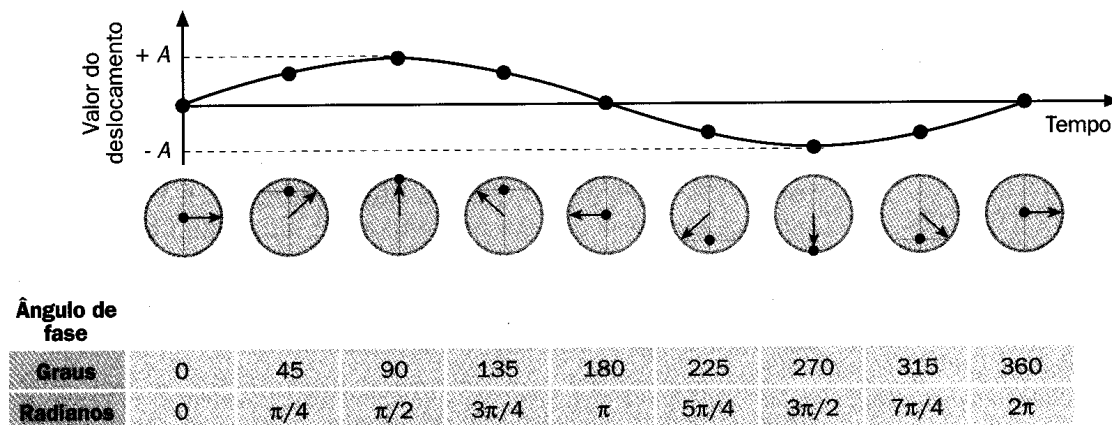
Como no movimento circular uniforme o raio vector da posição do corpo descreve ângulos iguais em tempos iguais, temos que a velocidade angular (ω) é dada por:

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

Assim, $\text{sen}\theta = \frac{\overline{PQ}}{\overline{OP}}$, o que dá $\text{sen}\theta = \frac{\Delta r}{A}$, i.e., $\Delta r = A \text{sen}\theta$, e consequentemente

$$\Delta r = A \text{sen}\omega t.$$

Um **sinal harmónico simples** é todo o sinal que é descrito pela função $A \text{sen}\omega t$, cuja representação gráfica está abaixo representada, quer em termos do valor do deslocamento do oscilador, relativamente à posição de equilíbrio, quer em termos do movimento circular uniforme do raio vector, com o correspondente ângulo varrido.



Se considerarmos o tempo decorrido como o período (T), o ângulo varrido é 2π e então $\omega = \frac{2\pi}{T}$, ou então $\omega = 2\pi f$. Como $A \text{sen}\omega T = A \text{sen}2\pi$, conclui-se que o período de um sinal harmónico não depende da sua amplitude, a qual está apenas relacionada com a intensidade do sinal, que tem um valor máximo quando $\text{sen}\omega t = \pm 1$, variando entre $\pm A$.

Um sinal harmónico caracterizado por um certo período, e uma certa frequência, propaga-se no espaço e no tempo através de uma onda harmónica, sempre visualizada através de uma **sinusóide**. As expressões $v = \frac{\lambda}{T}$ e $v = \lambda f$ que foram anteriormente apresentadas são expressões que permitem calcular a **velocidade de propagação de uma onda harmónica**, que percorre uma distância igual ao seu comprimento de onda durante um intervalo de tempo correspondente a um período.

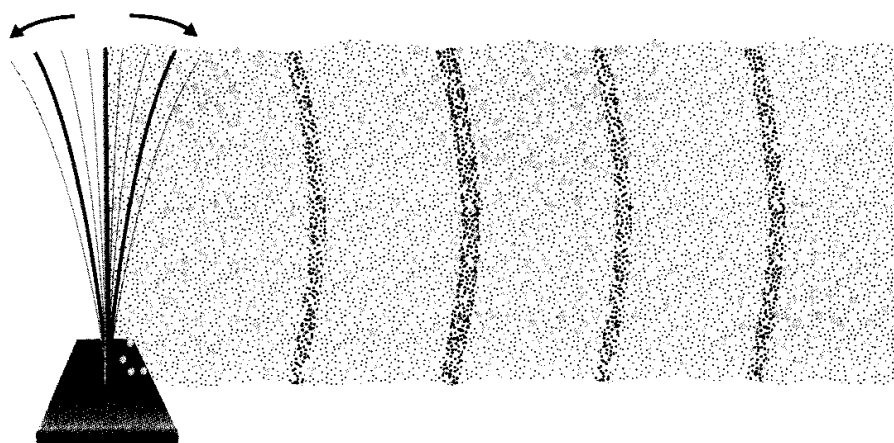
Uma onda harmónica, para além de ser representada por uma função $A \text{sen}\omega t$, apresenta a vantagem de também o ser por uma função $A \text{cos}\omega t$.

2.1.2 Som

O som, conforme já foi referido, é uma onda mecânica, pois necessita de um meio material para se propagar. Todavia, como a qualquer onda, podemos associar ao som uma frequência, um período, um comprimento de onda e uma velocidade de propagação.

Produção e propagação de um sinal sonoro

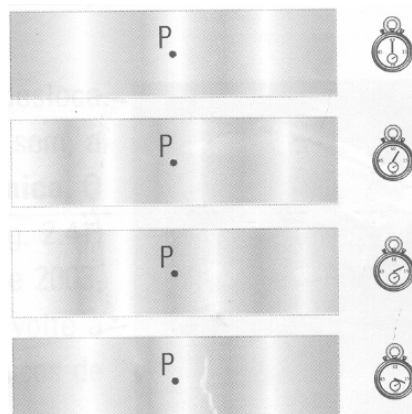
Na origem de um sinal sonoro está sempre a **vibração** de um corpo, i.e., movimentos do corpo como um todo, ou parcialmente, muitas vezes imperceptíveis, que causam uma perturbação no meio em seu redor, geralmente o ar.



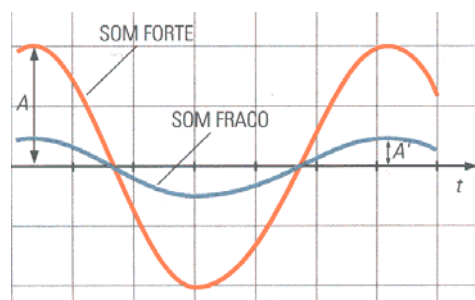
A oscilação de uma lâmina vai transferir energia para as moléculas do ar em seu redor, que entram em **vibração** com a mesma frequência, produzindo **diferenças de pressão**, devido à criação de zonas de maior densidade, **compressão**, onde a pressão do ar é maior, e zonas de menor densidade, **rarefação**, onde a pressão do ar é menor.

Para um dado ponto do espaço P , a pressão varia periodicamente, assumindo valores superiores e inferiores ao valor normal.

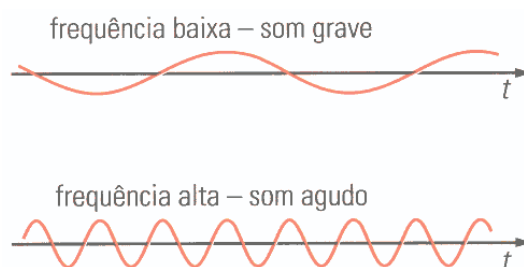
Assim, podemos concluir que o som é uma **onda de pressão**.



A **intensidade** do som é a característica que permite distinguir um som forte, aquele que pode ser ouvido a grande distância, de um som fraco, sendo tanto mais forte quanto maior for a amplitude da oscilação.



A **altura** do som está ligada à frequência da oscilação, sendo um som tanto mais alto quanto maior for a sua frequência.



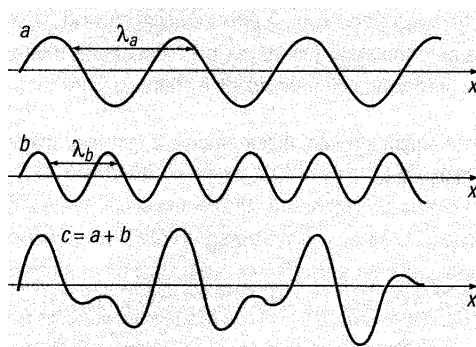
Se duas ondas tiverem a mesma amplitude, transporta mais energia aquela que tiver maior frequência!

Sons puros e sons complexos; sons harmónicos

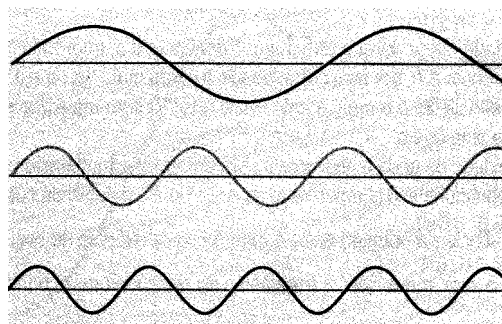
Um som **puro**, ou simples, é aquele que apresenta apenas um só comprimento de onda, é uma onda harmónica, e, conseqüentemente, tem uma frequência bem definida, chamada **frequência fundamental**, f_0 .

Todavia, a esmagadora maioria dos sons não são puros; contêm mais do que um comprimento de onda, mais do que uma componente, dizendo-se por isso **complexos**.

A figura seguinte representa dois sons puros diferentes, pois possuem diferente comprimento de onda, e o som resultante, i.e., o resultado da sua soma, ou sobreposição, que já não tem uma frequência bem definida, logo não é uma onda sinusoidal. Este fenómeno toma a designação de **interferência**.



Um **som puro**, cuja frequência seja um múltiplo inteiro de uma dada frequência, toma a designação de **som harmónico**. A figura seguinte representa um som puro (1º harmónico) e os 2º e 3º harmónicos.

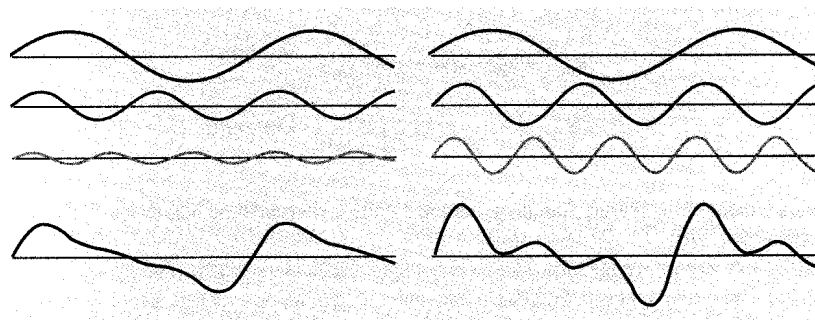


Assim, a **frequência de um som harmónico é sempre um múltiplo da frequência fundamental**, $f_{\text{harmónico}} = n f_0$, com $n = 1, 2, 3, \dots$

Claro que osciladores diferentes têm frequências fundamentais diferentes!

O **timbre** resulta da combinação do som puro, que tem a frequência fundamental, com os seus harmónicos, os que têm frequência múltipla da fundamental.

Diferentes combinações do mesmo som fundamental com os dois harmónicos seguintes, mas com amplitudes diferentes, originam diferentes sons resultantes, i.e., sons com **timbres diferentes**, como ilustra a figura seguinte.

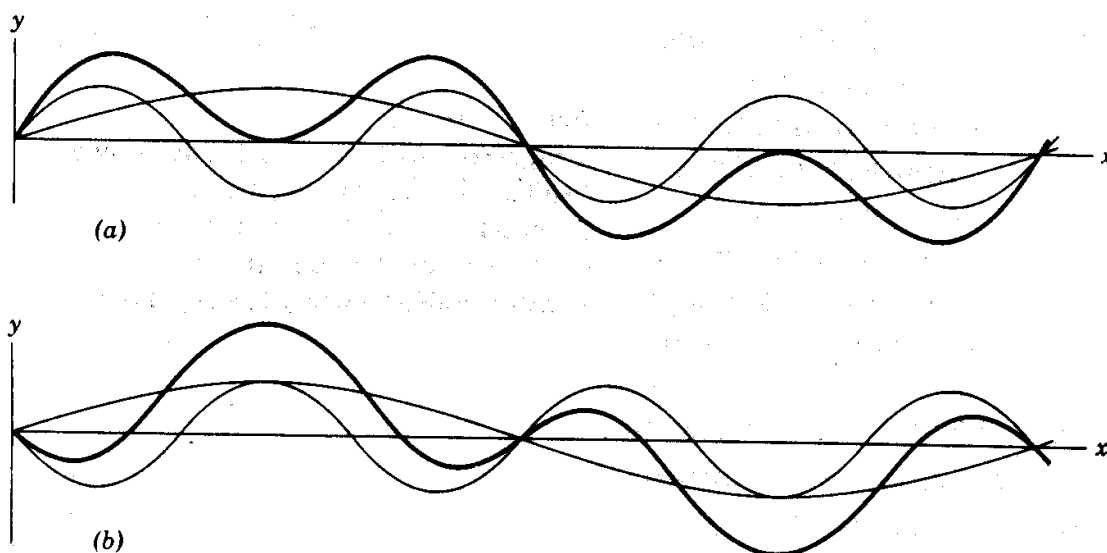


O som, como onda mecânica que é, transfere energia entre as partículas que constituem o meio material, elástico, sem que haja transporte destas, i.e., as partículas apenas vibram em torno das suas posições de equilíbrio, originando as tais diferenças de pressão, sendo por isso designado, como já foi referido, de onda de pressão.

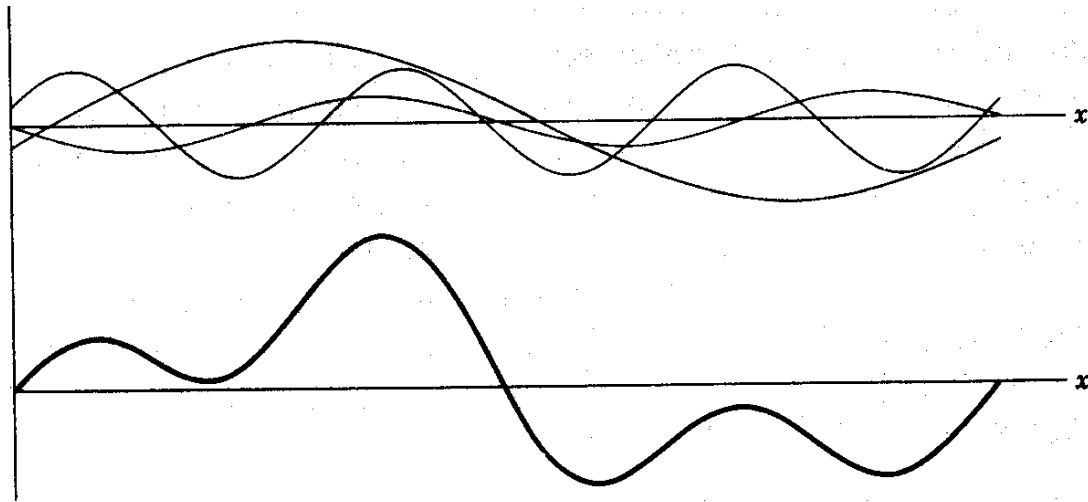
Ondas estacionárias

Num corpo unidimensional de tamanho finito, como é o caso de uma corda esticada pelas duas extremidades, de comprimento ℓ , as ondas que se propagam na corda são reflectidas nos contornos do corpo, ou seja, nas extremidades. Cada reflexão dessas origina uma onda que se propaga pela corda no sentido oposto. As ondas reflectidas somam-se às ondas incidentes, de acordo com o **princípio da sobreposição**.

As figuras seguintes ilustram algumas situações de sobreposição de ondas, nas quais a resultante é obtida simplesmente adicionando algebricamente os deslocamentos provocados, em qualquer ponto, pelas ondas componentes. Como todas essas ondas se propagam com a mesma velocidade, a forma da onda resultante move-se com essa mesma velocidade e mantém-se inalterada.



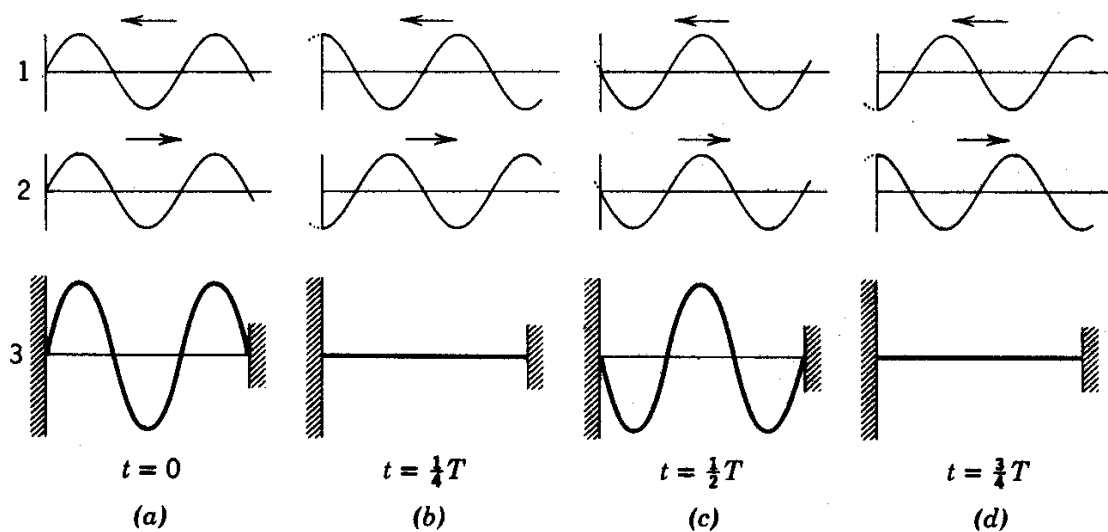
Sobreposição de duas ondas, em que a frequência de uma é o triplo da outra (linha finas), resulta numa onda cuja forma depende da relação de fase das ondas componentes (linha grossa).



A sobreposição de três ondas de diferente frequência (acima) resulta numa forma de onda complexa (abaixo).

Consideremos duas ondas que tenham a mesma frequência, velocidade e amplitude e que se propagam em sentidos opostos ao longo de uma corda.

A sobreposição de uma onda incidente e de uma onda reflectida, sendo a adição de duas ondas progressivas de sentidos opostos, origina uma **onda estacionária**.



Configuração de uma onda estacionária a intervalos de um quarto de período..

A característica de uma onda estacionária é o facto da **amplitude não ser a mesma para as diferentes partículas**, variando com a posição de cada uma delas.

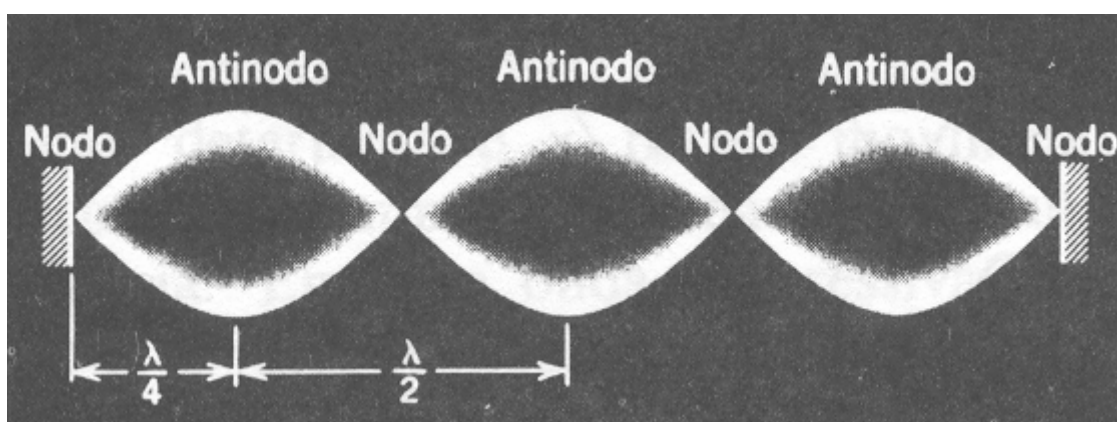
Assim, existem pontos, distanciados entre si $\frac{\lambda}{2}$ que atingem sempre **amplitude**

máxima, os **antinodos**. Para estes pontos $x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots$

Existem pontos em que a **amplitude tem sempre um valor nulo**, os **nodos**, também distanciados de $\frac{\lambda}{2}$. Para estes pontos $x = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, 2\lambda, \dots$

A energia permanece estacionária na corda, uma vez que não pode ultrapassar os pontos nodais, em que a corda está permanentemente em repouso, não ocorrendo assim transmissão de energia ao longo da corda, quer para a direita, quer para a esquerda.

As cordas vibrantes oscilam com uma frequência tal que o olho humano apenas detecta uma mancha cuja forma é a da **envoltória** do movimento.



A envoltória de uma onda estacionária: uma fotografia do movimento revelando os nodos e os antinodos da vibração.

Assim, a provocação de uma perturbação lateral numa corda fixa em ambas as extremidades leva à propagação de vibrações transversais ao longo da corda. Essas perturbações vão ser reflectidas nas extremidades fixas da mesma, o que resulta numa onda estacionária. Estas vibrações vão originar ondas longitudinais no ar à sua volta.

Conclusão:

As ondas audíveis originam-se em cordas vibrantes, como o violino ou as cordas vocais, em colunas de ar em vibração, como o órgão ou o clarinete, e em placas e membranas vibrantes, como o xilofone, o altifalante ou o tambor.

Todos estes elementos, em vibração, comprimem, alternadamente, o ar à volta deles, no seu movimento para diante, rarefazendo-o no seu movimento de retorno.

O ar transmite estas perturbações sob a forma de uma onda que se propaga a partir da fonte. Ao penetrar no ouvido, estas ondas originam a sensação sonora.

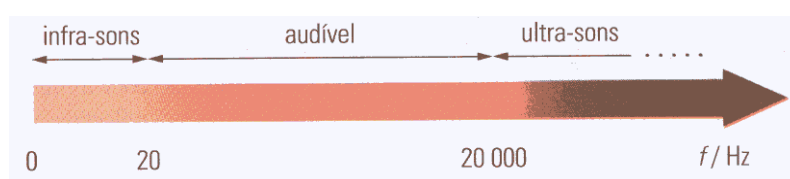
As ondas cujas formas são aproximadamente periódicas originam uma sensação agradável, se a intensidade não for muito grande, como é o caso dos sons musicais.

Uma onda sonora cuja forma seja aperiódica dá-nos a sensação de barulho, i.e., uma sobreposição de ondas periódicas, com um elevado número de componentes.

O espectro sonoro

A percepção do som não tem só a ver com a amplitude das ondas sonoras mas também com a sua frequência.

Os sons audíveis cifram-se numa zona de frequência entre os 17 e os 20000 Hz .



Todos os sons com frequência inferior a 17 Hz , por corresponderem a vibrações muito lentas, são designados por **infra-sons**. São sentidos nos tremores de terra, são detectados pelos elefantes e as aranhas comunicam através deles.

Todos os sons com frequência superior a 20kHz , por corresponderem a vibrações muito rápidas, são designados por **ultra-sons**. Temos aqui o *sonar* (40 a 50kHz) e as *ecografias* ($\approx 10^6$ Hz). São ouvidos por ratos, cães (15 a 50kHz), cavalos, morcegos, golfinhos e baleias. Estes três últimos podem ouvir e emitir sons até 120kHz .