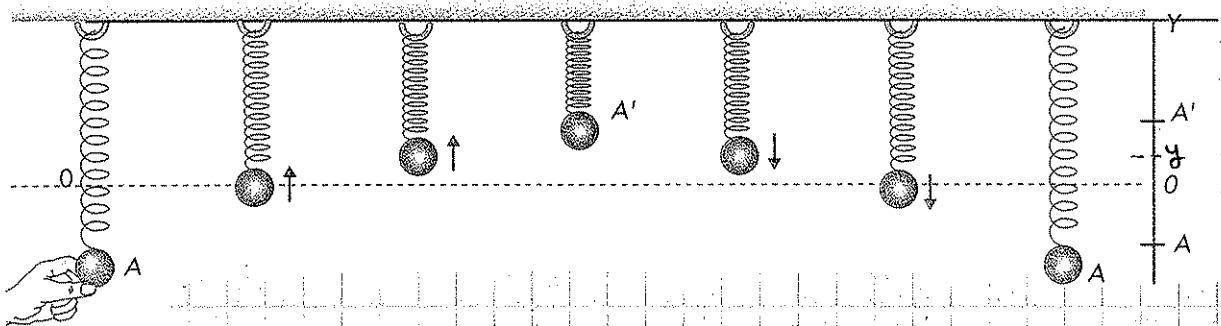


1.10. - OSCILADOR HARMÔNICO. ESTUDO DINÂMICO E ENERGÉTICO DO OSCILADOR HARMÔNICO.

1.10.1 - Introdução

- Um corpo oscila quando se move periodicamente ao redor da sua posição de equilíbrio.
- Movimento periódico: é aquele que se repete a si mesmo, i.e. o móvel passa repetidas vezes e a intervalos de tempo iguais pela mesma posição e sempre com mesmas características do movimento (velocidade, aceleração, ...).



1.10.2 - Magnitudes características do movimento oscilatório

- Elongação (y): distância $\hat{a}$ que está o objecto da posição de equilíbrio.
- Amplitude (A): elongação máxima, i.e. máxima separação do objecto da posição de equilíbrio.
- Período (T): tempo empregado em realizar uma oscilação completa ("ida e volta").
- Frequência (f): número de oscilações por segundo; é a inversa do período.

1.10.3 - Cinemática do Movimento Harmônico Simple (M.H.S.)

- O M.H.S. é um tipo muito corrente e importante de movimento oscilatório.
- Quando um objecto se desloca da sua posição de equilíbrio, teremos um M.H.S. se existe uma força recuperadora ("elástica") que seja proporcional ao deslocamento. ($F_{el} = -kx$)
- No M.H.S., o movimento do objecto vem descrito pela equação de posição:

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

onde A , ω e φ son constantes:

- $\omega t + \varphi \rightarrow$ fase do movement

$\varphi \rightarrow$ fase inicial, de xesto que se en $t=0$ o obxecto non está na súa posición de equilibrio ($\varphi=0$), ha estar en $y_0 = A \sin \varphi$

- $\omega \rightarrow$ frecuencia angular ou pulsación:

Se a fase aumenta 2π rad $\Rightarrow \sin(\omega t + \varphi + 2\pi) = \sin(\omega t + \varphi)$,

o móbil realizou unha oscilación completa, xa que logo, $t=T$:

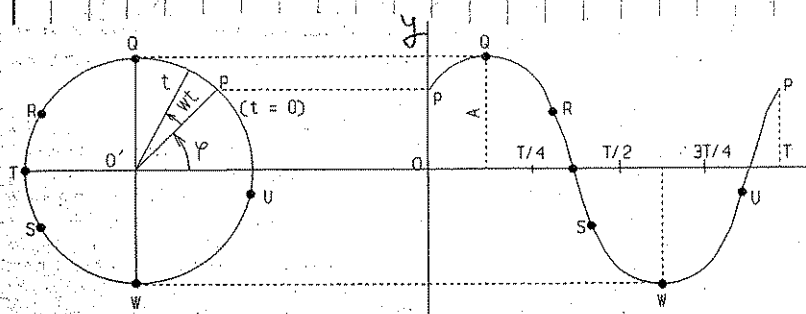
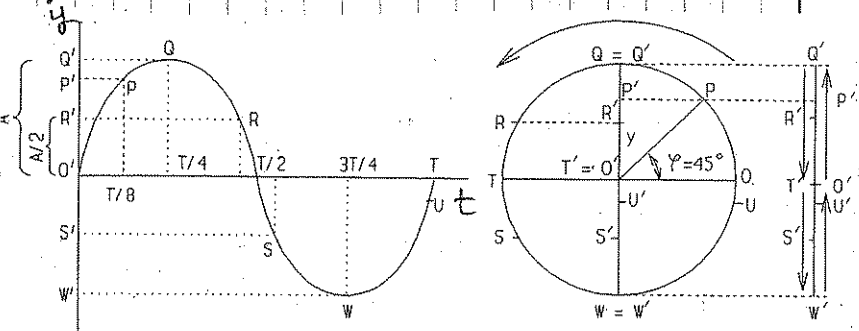
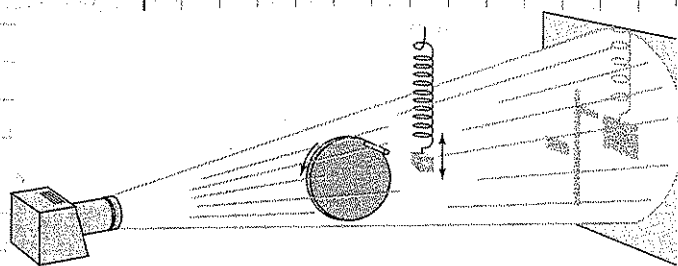
$$\omega(t+T) + \varphi = \omega t + \varphi + 2\pi \Rightarrow \omega T = 2\pi \Rightarrow$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

- Así: $y = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right) = A \sin(2\pi f t + \varphi)$

- Primeira xustificación de $y = A \sin(\omega t + \varphi)$: Representación fasorial

Asemellamos o movemento oscilatorio co movemento resultante da proxección dun movemento circular uniforme deido o seu plano de xiro. (velocidade angular ou de xiro ω).



Se ao empetermos a contar o tempo o móbil xa está en P:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi)$$

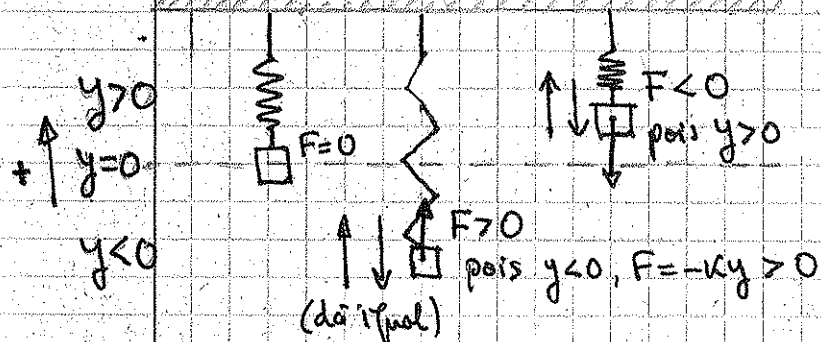
- Equações da velocidade e da aceleração:

$$v = \frac{dy}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi) = \pm \omega \sqrt{A^2 - y^2} \Rightarrow \begin{cases} \text{máxima em } y=0 \\ \text{nula em } y=\pm A \end{cases}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 y \Rightarrow \begin{cases} \text{nula em } y=0 \\ \text{máxima em } y=\pm A \\ \text{(módulo)} \end{cases}$$

Em geral, todo movimento com aceleração: $a = -\text{cte.} \cdot y$ será M.H.S.

1.10.4 - Estudo dinâmico do oscilador harmónico



Um MHS caracteriza-se porque a força recuperadora que exerce o resorte sobre o objecto unido a ele é proporcional à separação da posição de equilíbrio e dirigida para

a posição de equilíbrio: $F_e = -Ky$

Para 2ª lei de Newton (não temos em conta a força peso; ver NOTA 1):

$$\Sigma F = m \cdot a ; \quad -ky = ma ; \quad a = -\frac{k}{m} y \quad \Rightarrow$$

Tendo em conta que $a = -\omega^2 y$

$$\Rightarrow -\frac{k}{m} y = -\omega^2 y \Rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m} ; \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\text{Como } \omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

1.10.5 - Estudo energético do oscilador harmónico

- Em qualquer ponto da oscilação, o objecto unido ao resorte possui energia cinética e potencial:

Energia Cinética:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m [\omega^2 (A^2 - y^2)] \Rightarrow E_c = \frac{1}{2} K (A^2 - y^2)$$

- A energia cinética depende da posição, sendo máxima na posição de equilíbrio ($y=0$, $E_c = \frac{1}{2} K A^2$) e zero nos extremos ($y = \pm A$, $E_c = 0$).

Energia Potencial: (ou energia potencial elástica)

Como vimos no apartado 1.9.3: $E_p(y) = \frac{1}{2} K y^2$

- A energia potencial é máxima nos pontos de elongação máxima ($y = \pm A$, $E_p = \frac{1}{2} K A^2$) e zero na posição de equilíbrio ($y=0$, $E_p=0$).

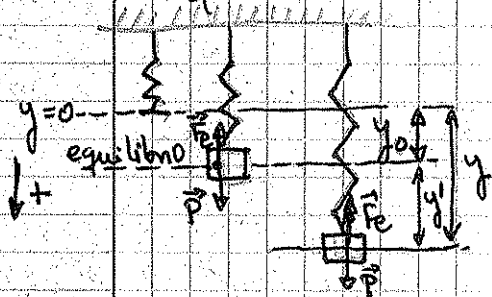
Energia Mecânica

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} K (A^2 - y^2) + \frac{1}{2} K y^2$$

$$E_m = \frac{1}{2} K A^2 = \text{cte}$$

como sempre acontece num sistema submetido a forças conservativas.

* NOTA 1: Análise dinâmica dum objecto pendurado dum resorte ou porque é equivalente estudar o resorte horizontal ao resorte vertical:



Ao pendurar uma massa m do resorte, aparece uma força peso, P , que faz descer o objecto até uma posição separada y_0 da posição inicial.

Neste instante, acontece o equilíbrio:

$$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_e = 0 \Rightarrow mg - K y_0 = 0 \quad (*)$$

Se deslocarmos agora o objecto da massa m uma distância y' da nova posição de equilíbrio e liberarmos o sistema, começará a oscilar ao redor da posição $y = y_0$, segundo a 2ª lei de Newton:

$$\Sigma \vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_e = m \cdot \vec{a}$$

$$mg - ky = ma \Rightarrow mg - k(y' + y_0) = ma$$

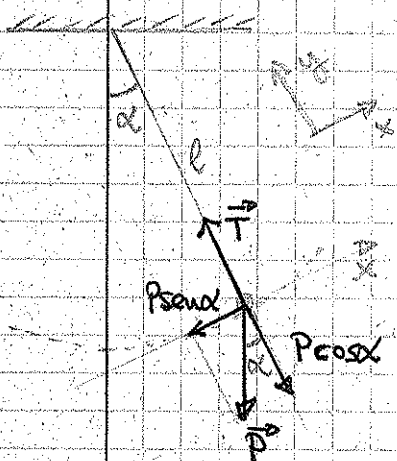
Como $ky_0 = mg$ (ver #1):

$$-ky' = ma \Leftrightarrow y' = A \sin(\omega t + \varphi)$$

Isto é, como y' é a separação do objecto da posição de equilíbrio devido ao peso do objecto, o único que ocorre é um desprazamento da posição inicial do objecto de onde $y=0$ até $y=y_0$. O objecto oscilará ao redor desta nova posição de equilíbrio, sendo a velocidade, aceleração, período, energia dependentes só da separação a respeito de y_0 .

(*) NOTA 2: Pêndulo Simple:

O movimento dum pêndulo simple assemelha-se a um oscilador harmónico se a amplitude do movimento é pequena. Um pêndulo simple é um ponto material de massa m ("lentella") pendurado dum ponto mediante um fio inextensível sem massa e de longitude l .



$$\Sigma \vec{F} = \vec{T} + \vec{P} = m \cdot \vec{a}$$

$$\Sigma F_y = T - mg \cos \alpha = m \cdot a_n$$

$$\Sigma F_x: -mg \sin \alpha = m a_t$$

Aceleração no eixo x :

$$a = a_t = -g \sin \alpha$$

Para ângulos pequenos ($\alpha < 30^\circ$) o valor do função seno é aproximadamente igual ao valor do ângulo

expressado em radianos: $\sin \alpha \approx \alpha \Rightarrow a = -g \sin \alpha \approx -g\alpha$

Como ademais para pequenas separações da posição de equilíbrio o arco e a corda case coincidem: $\sin \alpha \approx \alpha \approx \frac{x}{l}$, sendo x a distância desde a lentella à vertical. Assim:

$$a = -g \frac{x}{l}; a = -\omega^2 x \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \Rightarrow$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

TEMA 6: OSCILACIONES E ONDAS

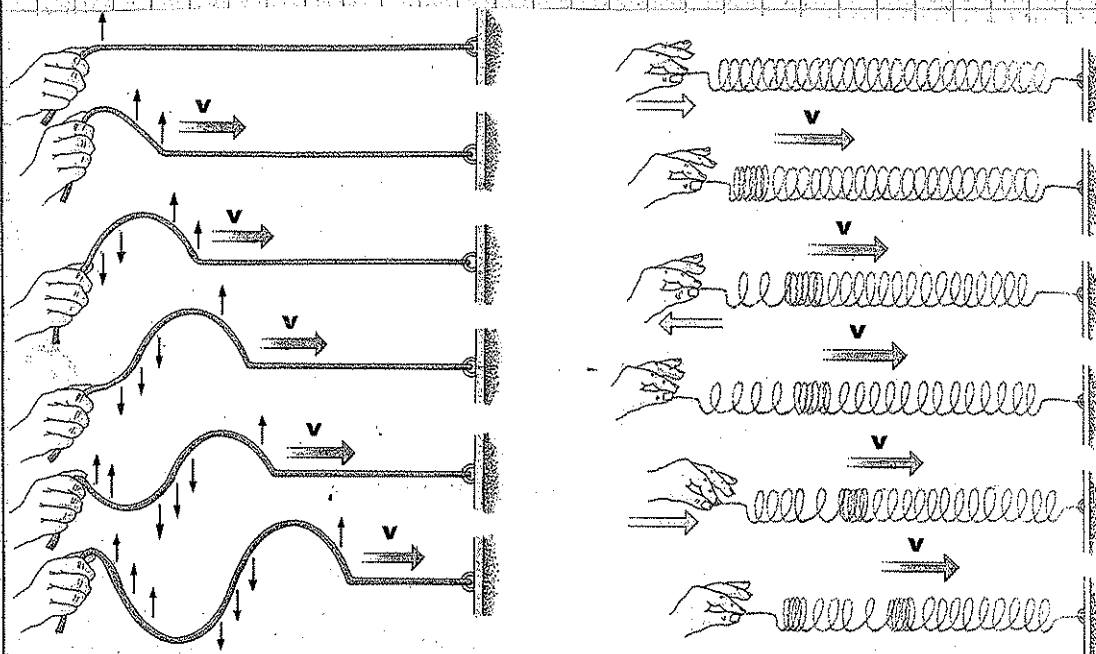
6.1

6.1.- MOVIMIENTO ONDULATORIO. CLASES DE ONDAS.

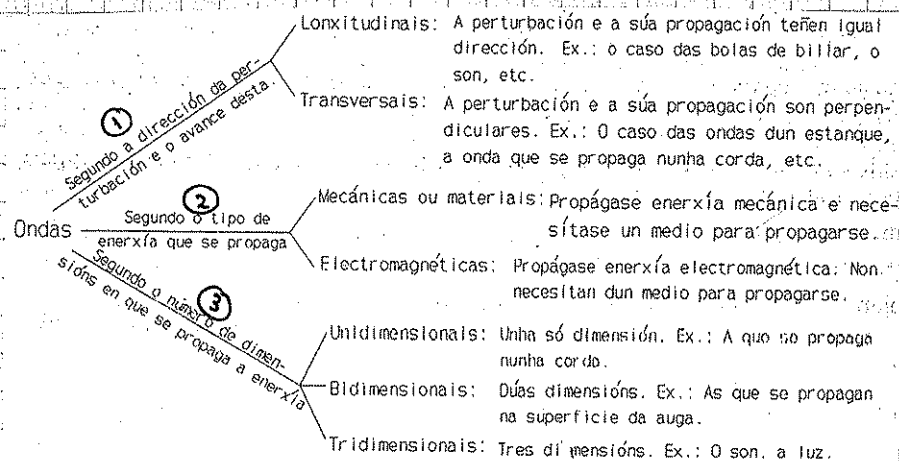
6.1.1.- Introducción. ¿Que é unha onda?

- Existen unha grande cantidade de fenómenos físicos con mecanismos diferentes pero cunha característica común: son situacións físicas producidas nun punto do espazo que se propagan a través do mesmo e que se reciben noutro punto. Son fenómenos ondulatorios.
- Onda: Propagación dun estado de perturbación a través dun medio. Supón propagación de enerxía sen propagación de materia, isto é, as partículas do medio non acompañan ao movemento de avance da perturbación.
- Perturbación: É un cambio producido nunha magnitude física nun punto do espazo, chamado foco.
Propiedades:
 - leva asociado unha certa cantidade de enerxía, necesaria para que se produza o cambio no valor da magnitude
 - nun medio, a perturbación non se propaga instantaneamente, senón a unha velocidade finita, que depende do medio e da magnitude física.
- Exemplos:
 - Ao golpearmos unha campá ou ao acendermos a radio, o son óese en puntos distantes pasado certo tempo. Son ondas sonoras, e o que se propaga é a compresión/dilatación dun gas (o aire).
 - Ao acendermos a luz, as ondas electromagnéticas propáganse á velocidade da luz, necesitando un certo tempo para "iluminar".
 - Cando lanzamos unha pedra a auga, a perturbación producida pola pedra transmítese a todos os puntos da superficie da auga.
 - A antena parabólica recibe ondas electromagnéticas enviadas desde un satélite.

- Se desprazamos lateralmente unha corda, o pulso propágase pola corda.
- Se comprimimos un resorte nunha determinada rexión, ao soltalo a compresión vai propagando (pulso) polo resto do resorte.



6.2.2 - Tipos de ondas



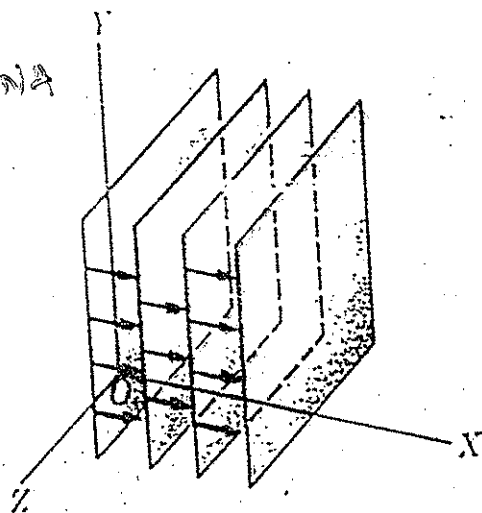
②. Mecánicas ou materiais: orixínase ao perturbar un medio elástico (corda, auga, resorte, aire, ...) e transmítese grazas á elasticidade do medio. A velocidade coa que se propagan depende das características do medio. Ex.: ondas sonoras, ondas na auga, nos resortes, nas cordas.

• Electromagnéticas: Pódense propagar tamén no baleiro. O que se transmite son sinais eléctricos resultado das relacións físicas entre o campo eléctrico e o campo magnético. Normalmente prodúcese no foco ao acelerar cargas.

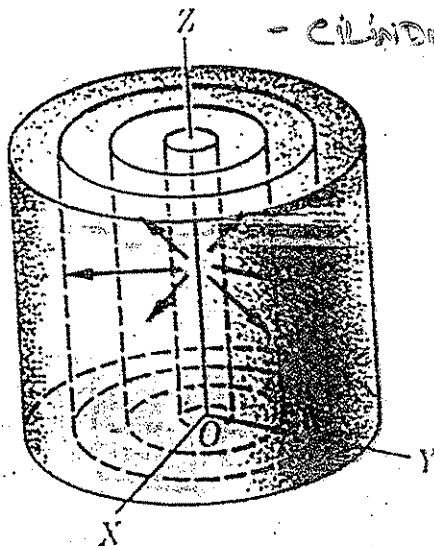
*) ONDAS EN 3D:

6.2b

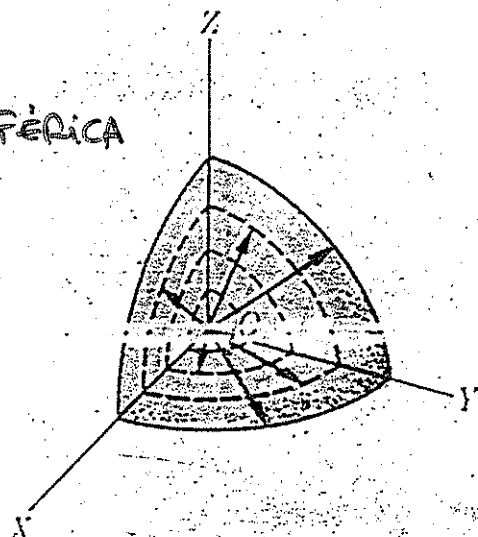
- PLANA



- CILÍNDRICA

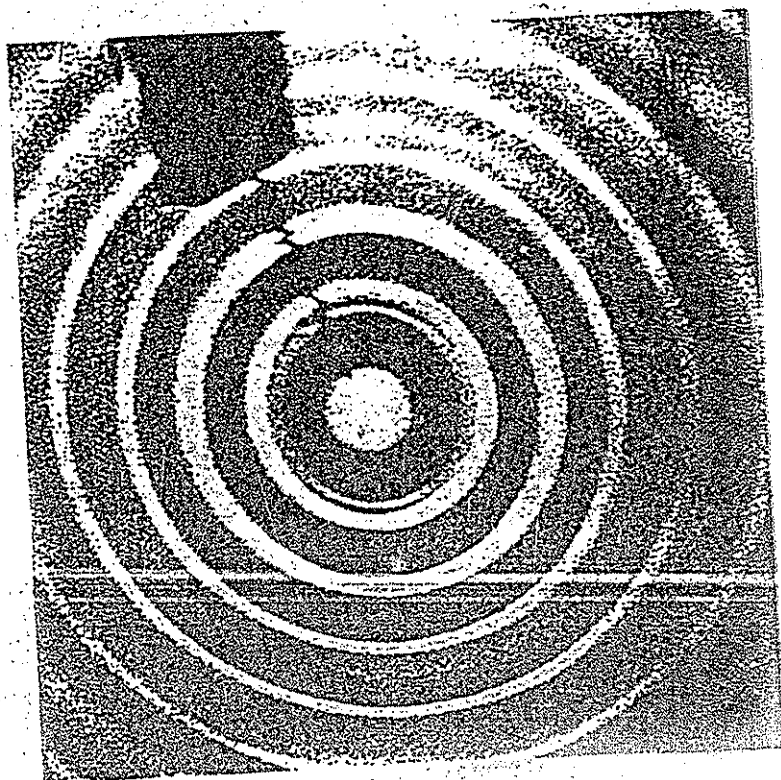
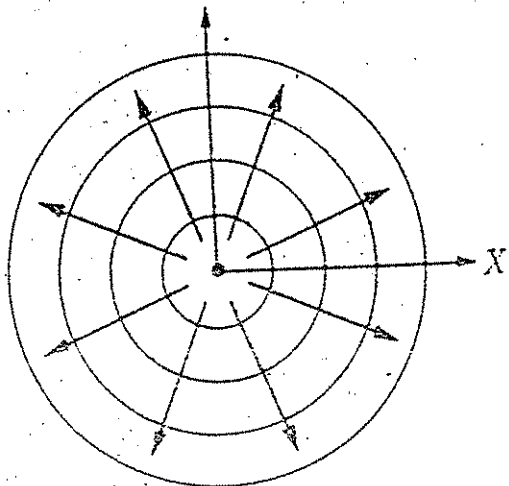


- ESFÉRICA



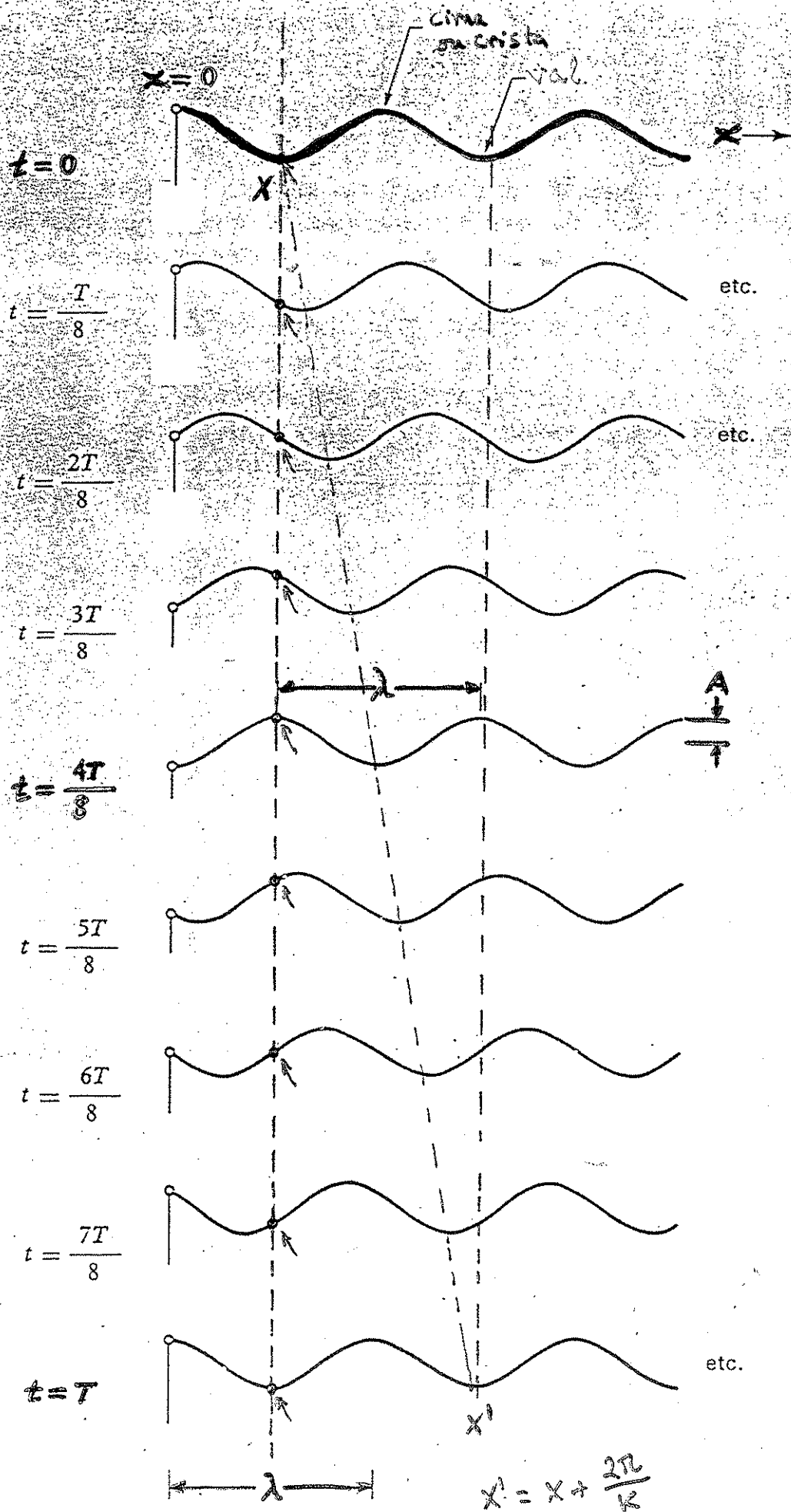
*) ONDAS EN 2D

- CIRCULAR



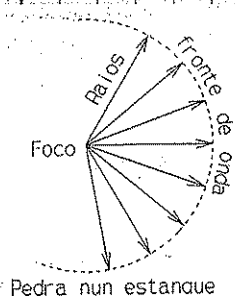
PERIODICIDADE ESPACIAL (λ) / TEMPORAL (T)

6.36



eléctricas, o que dá lugar á perturbación dos campos eléctricos e magnéticos (Experimento de Hertz). No baleiro, todas se propagan a unha velocidade de $3 \cdot 10^8$ m/s. Ex.: ondas luminosas, ondas de radio, ondas de televisión, microondas, ondas ultravioleta, etc. Todas están agrupadas e ordenadas polo seu enerxía no chamado Espectro electromagnético. * (páx. 276 Bolívar)

③ No caso de ondas bi e tridimensionais, son útiles os conceptos de:

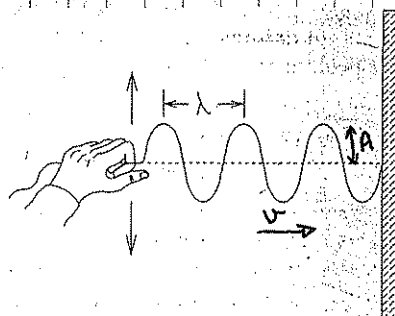
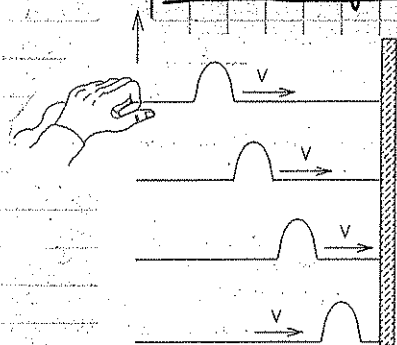


- frente de onda: liña ou superficie imaginaria formada polos puntos aos que a perturbación chega no mesmo instante (posición o mesmo estado de vibración)

- raio: dirección na que as ondas se propagan. Son liñas imaginarias perpendiculares ás frentes de onda.

VER FOTOGRAFÍA 6.36

6.1.3- Magnitudes para describir unha onda:



- pulso: É a propagación dunha onda illada

- tren de ondas: Resulta cando producimos unha sucesión de ondas, resultado dunha perturbación periódica

(a intervalos de tempo iguais) e da mesma intensidade (enerxía).

Neste caso, todas as partículas do medio entanse a mover, sendo necesario suministrar enerxía continuamente desde o foco.

- Longitude de onda, λ : Distancia entre dous puntos consecutivos dun tren de ondas que se encontran no mesmo estado de vibración.

Tamén se define como a distancia entre dous puntos consecutivos que están en fase.

VER FOLIA 6.36: Dous puntos dunha onda están en igualdade de fase

cando em qualquer instante t, têm a mesma elongação (distância ao ponto de equilíbrio). A distância entre eles é um número inteiro de comprimentos de onda.

Dois pontos numa onda estão em oposição de fase quando a distância entre eles é $n \cdot \frac{\lambda}{2}$, onde $n \in \mathbb{Z}$.

A comprimento de onda mede-se em metros no SI.

- Período, T , : É o tempo que tarda a onda em percorrer uma distância igual à comprimento de onda. Corresponde ao tempo que tarda cada partícula do meio em descrever uma oscilação completa.

O período do movimento oscilatório é o mesmo que o do movimento vibratório que se está a propagar.

Mede-se em segundos.

- Frequência, f (ou ν): É o número de vezes que se repete a mesma situação física (oscilação completa) na unidade de tempo. Mede-se em s^{-1} ou Hz.

$$f = \frac{1}{T}$$

- Velocidade de propagação, v , : É sempre a mesma para uma determinada perturbação num determinado meio. Ex: v_{som} no ar = $340 \frac{m}{s}$

$$v_{\text{luz}} \text{ no vácuo} = c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Para definições de T :

$$v = \frac{\lambda}{T} ; v = \lambda \cdot f$$

- Elongação, y ou ξ : É o valor da magnitude física "perturbada" em cada ponto do meio. Indica a "separação" da posição de equilíbrio na vibração de cada partícula do meio.

Mede-se nas unidades da magnitude correspondente.

- Amplitude, A : É a máxima elongação com que vibram as partículas do meio. Só depende da energia com que se propaga a onda.

6.2- ONDAS HARMÓNICAS. ECUACIÓN DE ONDA UNIDIMENSIONAL.

- Uma onda harmónica é a que resulta da propagação no espaço dum movimento harmónico.
- Se isto sucede em 1 direcção ou se a onda é plana, fala-se de onda harmónica unidimensional.
- Queremos buscar a equação matemática - função de onda - que nos permita conhecer em cada instante a posição de cada um dos pontos do meio afectados pela propagação do movimento harmónico simples:

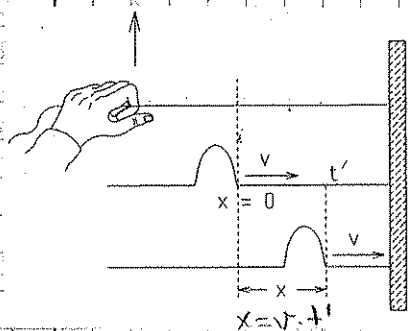
$$y(x,t) = A \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} \mp \frac{x}{\lambda} \right) \right]$$

$$= A \sin (\omega t \mp kx)$$

Ec. de onda harmónica
unidimensional

onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda, $k = \frac{\omega}{v}$

- Demonstração:



- Num instante t' o impulso afecta a partícula situada em $x=0$, fazendo-a vibrar com MHS.

- Logo dum tempo t' , a partícula situada a uma distância x , tal que $x = v \cdot t'$, onde v é a velocidade de propagação da onda, estará afectada pelo mesmo estado de oscilação que o ponto $x=0$ num instante $t - t'$ segundos anterior:

$$y(x,t) = y(0, t - t')$$

Aí, o MHS da partícula em $x=x$ é:

$$y(x,t) = y(0, t - t') = A \sin \omega(t - t') = A \sin (\omega t - \omega t')$$

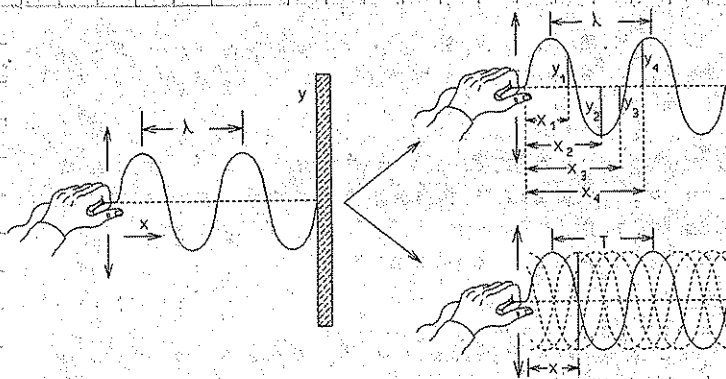
Como $t' = \frac{x}{v}$:

$$y(x,t) = A \sin \left(\omega t - \omega \frac{x}{v} \right) = A \sin \left(\omega t - \omega \frac{T}{\lambda} x \right)$$

Assí:

$$y(x,t) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = A \sin (\omega t - kx)$$

- Determinamos a dobre periodicidade de uma onda:
 - período espacial, caracterizado pela comprimento de onda, λ : "foto" da onda.
 - período temporal, caract. pelo período, T : fixamos um "x".



Podemos verificar matematicamente que as funções de onda repetem-se cada período espacial ou temporal:

$$y(x + \lambda, t) = y(x, t)$$

$$y(x, t + T) = y(x, t)$$

6.3. ENERGIA E INTENSIDADE DAS ONDAS HARMÔNICAS

6.3.1. Energia das ondas harmônicas

- Num movimento ondulatório transmite-se a energia de um ponto a outro sem que exista transporte neto de matéria.
- Quando uma onda chega a um ponto, este começa a vibrar e adquire energia cinética, pois antes estava no repouso na posição de equilíbrio; ao adquirir velocidade, desprata-se da sua posição de equilíbrio adquirindo energia potencial.
- A energia mecânica em cada instante será soma das energias cinética e potencial:

$$E_m = \frac{1}{2} m v_x^2 + \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} k A^2$$

onde " v_x " é a veloc. de oscilação do ponto x. Como $k = \text{cte elástica} = m \omega^2$:

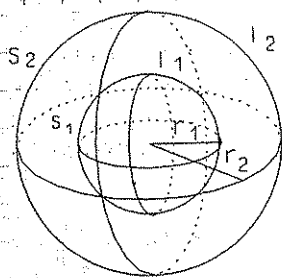
$$E_m = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = 2\pi^2 m A^2 f^2$$

6.3.2.- Intensidade das ondas harmônicas.

- Denominase Intensidade dum movimento ondulatório, I , nun ponto, a quantidade de energia que na unidade de tempo atravessa a unidade de Superfície colocada nesse ponto perpendicularmente à direcção de propagação da onda:

$$I = \frac{\text{Energia}}{\text{tempo} \cdot \text{Superfície}} = \frac{\text{Potência}}{\text{superfície}}$$

- No SI medase em $\frac{J}{s \cdot m^2} = \frac{W}{m^2}$
- Vamos considerar o caso particular duma onda esférica: Neste caso, a intensidade a uma distância r_1 do foco emissor será:



$$I_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{4\pi r_1^2}$$

A uma distância r_2 , com $r_2 > r_1$

$$I_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{P_2}{4\pi r_2^2}$$

Se não existe nenhum tipo de atenuação:

$$E_1 = E_2 \Rightarrow P_1 = P_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

O que significa que a intensidade duma onda esférica nun ponto é inversamente proporcional ao quadrado da distância ao foco emissor.

- Ademais, como $E \propto A^2 \Rightarrow I \propto A^2 \Rightarrow \frac{A_1^2}{A_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{r_2}{r_1}$
- Estes resultados non supõem perda da energia da onda, senon que a energia de cada ponto é menor segundo se afasta do foco emissor, pois cômpe termos em conta que cada vez a superfície da frente de ondas é maior e, xa que logo, o número de pontos a abranguer a onda é maior. Este fenómeno cômcese co nome de atenuação da onda.

- As ondas lineais (unidimensionais) como as dunha corda non sofren atenuación; sen embargo, si se atenuan as ondas bidimensionais, como as da superficie da auga.

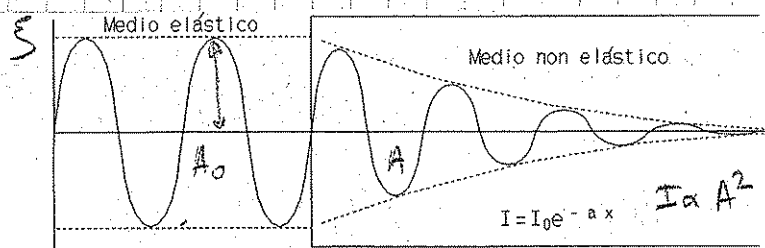
- Absorción:

- Na realidade, os medios nos que se propagan as ondas non son perfectamente elásticos e, xa que logo, cómpre considerar a absorción de enerxía por parte do medio (rozamento, viscosidade, efecto Joule, ...).

- Esta absorción leva consigo un amortecemento da onda e, finalmente, a extinción a unha determinada distancia do foco.

- Este fenómeno cóñase co nome de absorción. A enerxía da onda non fica constante segundo avanza a onda.

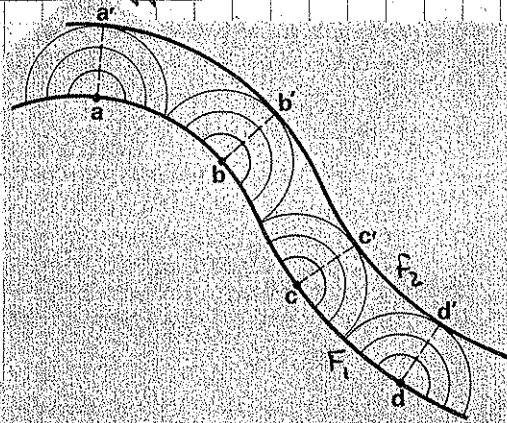
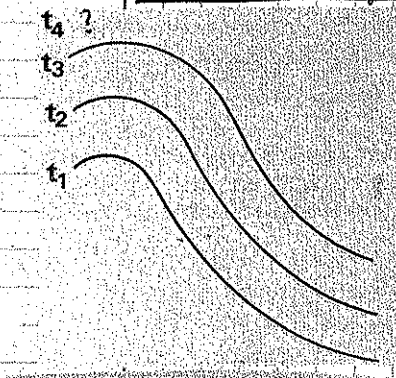
- A diferenza da atenuación, que é un fenómeno debido exclusivamente á geometría das fronteiras de onda, a absorción depende fortemente do medio no que se propaga a onda e da frecuencia desta.



6.4.- PRINCIPIO DE HUYGENS: REFLEXIÓN E REFRACCIÓN.

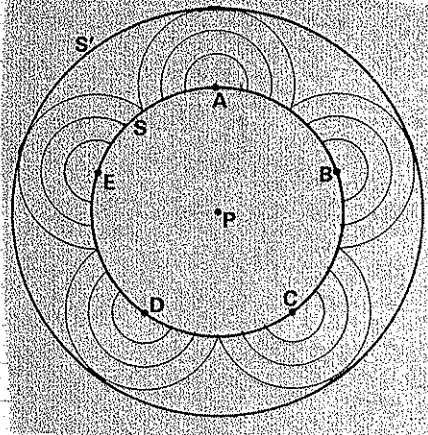
Agora que xa sabemos como describir un movemento ondulatorio, imos estudar como se propaga a onda e algúns fenómenos que teñen lugar na propagación.

6.4.1.- Principio de Huygens.



En 1690, C. Huygens propón un mecanismo para entender o comportamento dunha onda ao propagarse polo medio, explicando como se crea cada nova fronte de onda:

Principio de Huygens: "Todos os puntos dunha fronte de ondas converténdose en focos emisores de ondas secundarias (tamén chamadas ondas elementais), de xeito que transcorrido un tempo, a nova fronte de onda será a envolvente de todas as ondas elementais xeradas."

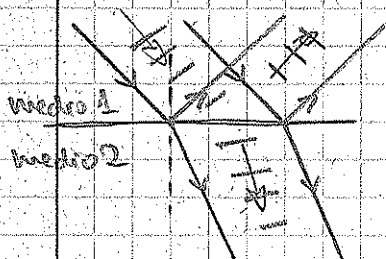


Se collemos unha fronte de onda F_1 calquera, cada un dos seus puntos está animado dun MHS; convertíndose en centro emisor de novas ondas secundarias. Logo dun tempo, estas ondas secundarias percorreron a mesma distancia, formando a liña que une todos os puntos nunha nova fronte de onda, F_2 .

6.4.2.- Reflexión e refracción de ondas.

- Estes fenómenos tan característicos do movemento ondulatorio prodúcese cando a onda na súa propagación cambia de medio. En dous medios con características físicas diferentes, unha onda propagase a diferentes velocidades, tendo lugar un cambio na dirección da onda.

- A onda que se propaga no primeiro medio, chamada onda incidente, ao chegar á superficie de separación dos dous medios provoca a vibración dos puntos dessa superficie en ambos os medios á vez, actuando como focos da perturbación (Prin. Huygens) e xerando dúas ondas diferentes:



- onda reflectida: retrocede cara o 1º medio de novo

- onda transmitida ou refractada: propágase polo 2º medio a unha velocidade $v_2 \neq v_1$.

Así, a enerxía da onda incidente divídese entre ambas as ondas reflectida e refractada.

- Se predomina o fenómeno da reflexión a superficie de separación denomínase espello e se predomina a refracción, dioptrio.

- Experimentalmente observáronse as seguintes leis:

- 1) As direccións das ondas incidente, reflectida e transmitida (ou raios) e a normal á superficie de separación dos medios están no mesmo plano
- 2) Lei da reflexión: o ángulo de incidencia (i) e o de reflexión (r) son iguais: $i = r$
- 3) Lei da refracción: o cociente entre o seno do ángulo incidente, e o seno do ángulo refractado é constante: (Lei de Snell, 1621)

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n_2$$

onde v_1 e v_2 son as veloc. de propagación da onda nos medios 1 e 2, e n_2 é o índice de refracción do medio 2 respecto do 1.

Xustificación 1ª lei:

Por simetría: o raio incidente e a normal forman un plano e non existe motivo ningún para que os raios reflectidos e transmitidos non estean contidos nese plano.

Justif. 2ª lei: Reflexión:

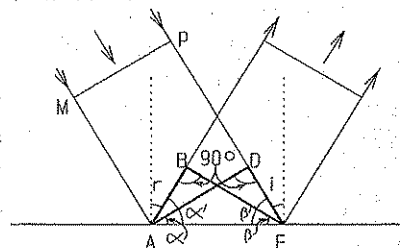
A 2ª e 3ª leis podem ser justificadas mediante o Princ. de Huygens e supondo -por simplificar- fontes de ondas planas que chegam com uma certa

inclinação i à superfície de separação dos 2 meios. Observando o desenho:

$$\overline{AD} = v_1 \cdot t = \overline{BE}$$

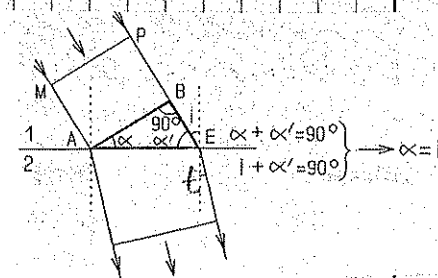
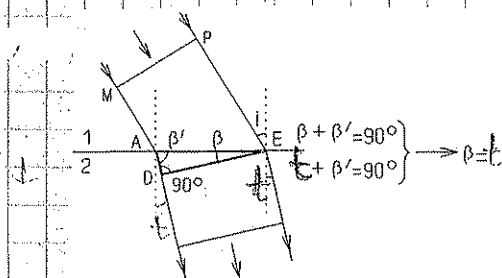
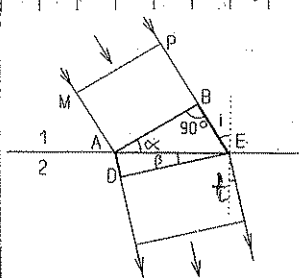
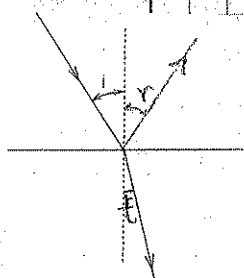
Como os triângulos $\triangle ABE$ e $\triangle ADE$ são semelhantes $\Rightarrow \alpha = \beta$ e $\alpha' = \beta'$

xa que logo: $i = r$ pois $\alpha' + r = 90^\circ$ e $\beta' + i = 90^\circ$



Justif. 3ª lei: Refracção

Agora a onda ao propagar-se pelo 2º meio cambia a sua velocidade.



Queremos demonstrar que: $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} = \text{cte.}$

$$\left. \begin{array}{l} \overline{BE} = v_1 \cdot t \\ \overline{AD} = v_2 \cdot t \end{array} \right\} \frac{\overline{BE}}{\overline{AD}} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Do desenho 2º: } \sin \alpha = \frac{\overline{BE}}{\overline{AE}} \\ \sin \beta = \frac{\overline{AD}}{\overline{AE}} \end{array} \right\}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\overline{BE}}{\overline{AD}} \xrightarrow{(1)} \frac{v_1}{v_2}$$

Mediante os desenhos 3º e 4º deduzimos que $\beta = t$ e $\alpha = i$, portanto:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} = \text{cte}$$

O índice de refração dum meio 2 respecto a um meio 1, n_{21} , é um valor constante que serve para comparar a forma de se propagar duma determinada onda nesses dois meios. Depende, xa que logo,

da natureza dos medios e da natureza da onda.

- No caso particular - pero importantísimo - das ondas electromagnéticas, pódese tomar o baleiro como medio de referencia ($v = c$), e definir para cada medio un índice de refracción absoluto n , que soamente dependerá das características físicas do medio:

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

Neste caso, a lei de Snell fica: $n_1 \sin i = n_2 \sin r$

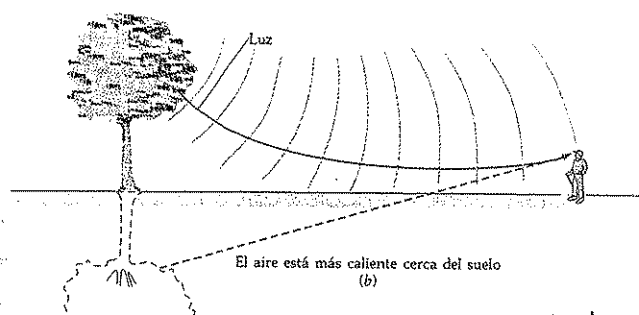
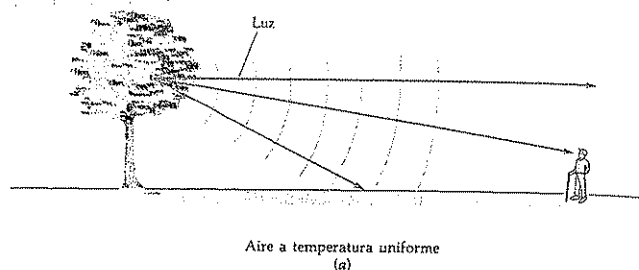
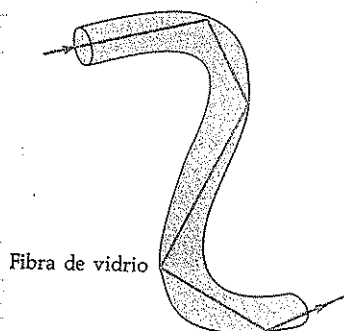
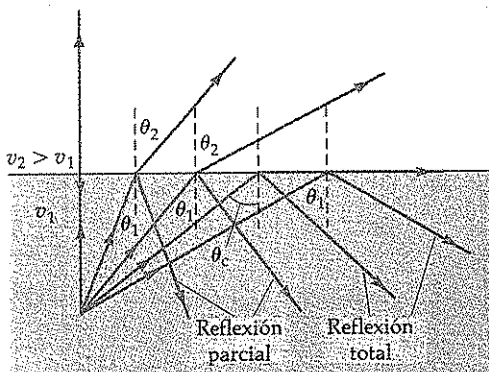
onde $n_1 = \frac{c}{v_1}$, $n_2 = \frac{c}{v_2}$

- En xeral, o raio (dirección da onda) refractado achégase á normal á superficie de separación se $v_2 < v_1$ ($n_2 > n_1$ no caso das ondas EM) e afórtase da normal cando $v_2 > v_1$.

Neste 2º caso ($v_2 > v_1$) existe un valor do ángulo de incidencia, chamado ángulo límite, para o cal o ángulo de refracción é de 90° :

$$\sin i_{\text{lím}} = \frac{v_1}{v_2}$$

Para ángulos de incidencia maiores ao ángulo límite non se produce refracción, tendo lugar soamente onda reflectida. Isto coñécese como reflexión total. É o fundamento físico de fenómenos como a condución de luz por fibra de vidro, o funcionamento dos prismáticos ou os espellos no deserto.



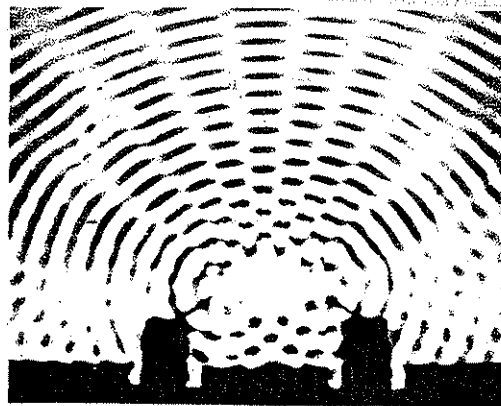
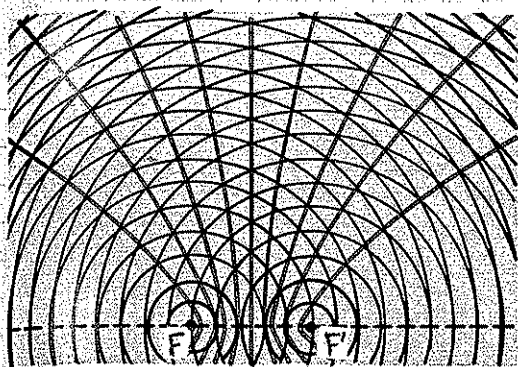
6.5- ESTUDIO CUALITATIVO DE INTERFERENCIAS, DIFRACCIÓN, ABSORCIÓN E POLARIZACIÓN.

6.5.1- Interferencia de duas ondas. Principio de superposición.

- Alla agora estudiamos a propagação dunha soa onda. ¿Que ocurrirá cando esa onda se cruce con outra nunha rexión do medio no que se propaga?
- Experimentalmente, pódese comprobar que cando dúas ondas se cruzan, as ondas vese pouco suman os seus efectos, conservando logo cada onda a mesma forma e enerxía. Este feito é unha propiedade fundamental do mov. ondulatorio. É unha característica propia das ondas.
- Este feito experimental permítenos enunciarnos o Principio de Superposición.
VER FOMA 6.13b
- Cando nunha rexión do espazo dúas ou máis ondas interaccionan, pode ocorrer que a amplitude (intensidade) da onda resultante varie regularmente duns puntos a outros entre certos valores extremos; estas variacións constitúen os fenómenos de interferencia.
- Para que haxa interferencia entre dúas ondas harmónicas cumpre que:
 - as fontes de onda coincidan nalgunha rexión do espazo.
 - as ondas teñan igual frecuencia.
 - as ondas teñan igual dirección da perturbación (as dúas lonx ou as dúas transversais)

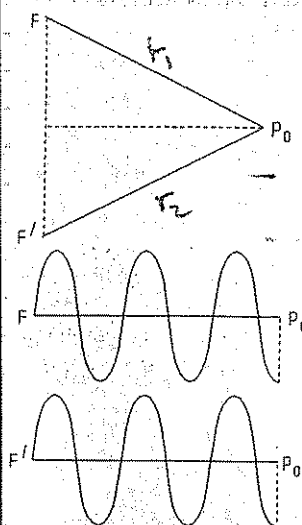
Se cumpren estas condicións, as fontes das dúas dize que son coherentes

- Dado que existen un gran número de casos de interferencias, imos analizar un caso simple, para inducir logo resultados válidos para as demais interferencias: dúas ondas xeradas por fontes coherentes que emiten en fase ("sincrónicas", ao mesmo tempo) e que teñen a mesma amplitude.



Interferencia de dos ondas en la superficie del agua.

• Puntos de interferencia constructiva (amplitud máxima):



Cuando las ondas de onda se encuentran un punto de mediatriz del segmento FF' , ao teran percorrido a mesma distancia ($r_1 - r_2 = 0$) vaise atopar no mesmo estado de perturbación (elongación), polo que, segundo o princ. de superposición, a elongación resultante ha de ser a suma das individuais: $A_r = 2A$.

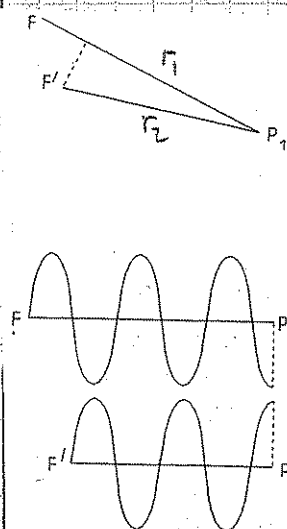
En xeral, se:

$$r_1 - r_2 = n\lambda, n \in \mathbb{Z} \Rightarrow A_r = 2A$$

A interf. é constructiva e os puntos nos que isto

ocorre chámanse ventres.

• Puntos de interferencia destructiva (amplitud mínima):



Se consideramos agora un punto P_1 tal que: $r_1 - r_2 = \frac{\lambda}{2}$, os estados de perturbación de cada onda ese punto estarán en oposición de fase, isto é, a suma de ambas as ondas vai ser cero, pois as elongacións de cada onda han de ser iguais pero de signo oposto. O punto P_1 , xa que logo, non ha vibrar: $A_r = 0$.

En xeral, se:

$$r_1 - r_2 = (2n+1) \frac{\lambda}{2}, n \in \mathbb{Z} \Rightarrow A_r = 0$$

A interferencia é destructiva, e os puntos nos que isto ocorre son nodos.

- Os puntos situados entre os ventres e os nodos vibran cunha amplitude comprendido entre 0 e $2A$.

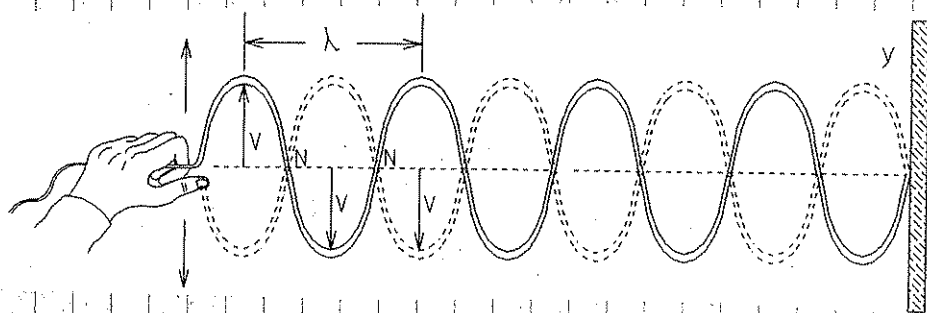
- Ondas estacionárias:

Son un caso especial de interferência que ten lugar cando dous movementos ondulatórios das mesmas características se propagan en sentidos contrarios.

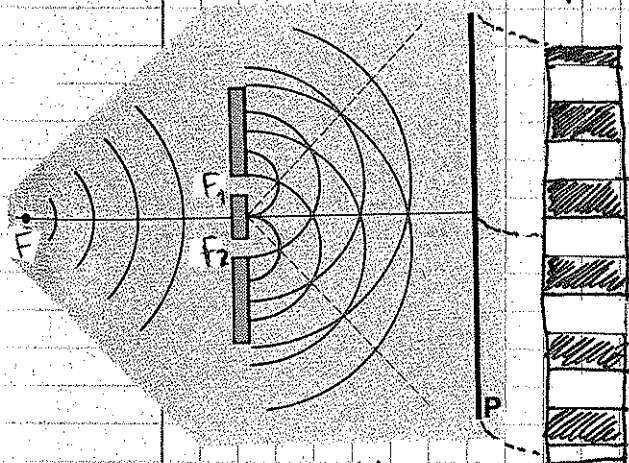
Hai puntos da rexión de interferência que sempre ficam en repouso; o resto dos puntos presentan un MHS. A situación da perturbación resultante non varia no tempo (é "estacionaria"), a diferencia do resto de ondas que son "viaxeiras".

Neste caso, a enerxía non se propaga polo corda. Todos os puntos oscilan ao mesmo tempo, pero con diferentes amplitudes.

Ex.: instrumentos musicais.



- Experiencia de Young: (1801)



O dispositivo da figura constitúe un interferómetro, aparellos que nos permiten obter ondas coherentes no laboratorio.

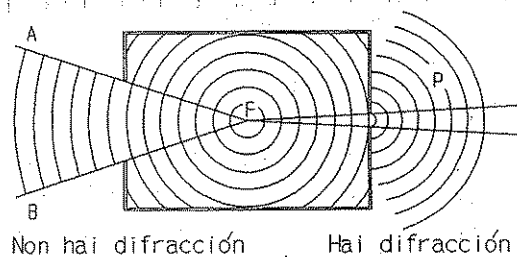
Con este dispositivo, Young confirmou o carácter ondulatorio da luz, permitindo ao mesmo tempo medir a súa lonxitude de onda.

Cando a fronte de onda xerada en F acada os buracos F_1 e F_2 , xéranse (pelo Huygens) novas ondas secundarias coherentes que interfieren na pantalla P. Sobre esta, aparecen zonas con interferencia construtiva (franxas iluminadas) e zonas con interferencia destrutiva (franxas escuras). Medindo a distancia entre franxas, podemos calcular λ da onda visible.

6.5.2 - Difracção

- A difracção é um dos fenómenos mais característicos das ondas. Observase quando a onda é distorcida por obstáculos de dimensões comparáveis à longitude de onda.
- Um obstáculo pode ser uma pantalla com uma pequena fenda ou abertura, que só permite o paso duma pequena porção da frente de onda incidente, ou pode ser um pequeno objecto que impede o paso duma pequena porção da frente de onda.
- Em óptica o fenómeno é conhecido desde há vários séculos (Grimaldi, s. XVII), sendo de grande importância no debate em torno do carácter ondulatório ou corpuscular da luz.

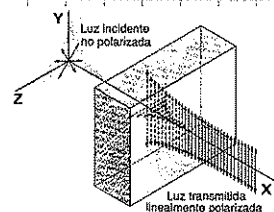
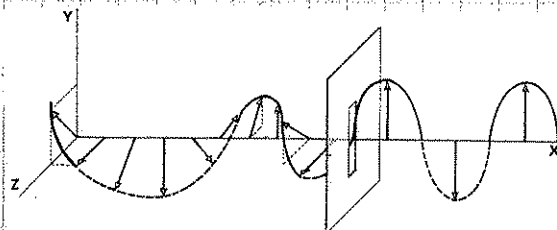
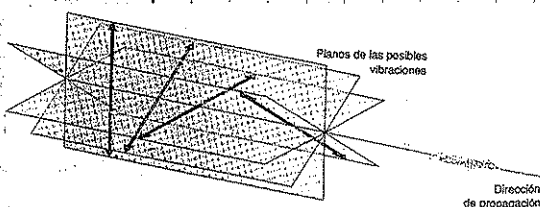
A maioria dos objectos interpostos à luz têm dimensões superiores à longitude de onda do campo visível ($\sim 5 \cdot 10^{-7} \text{m}$) e é por isso que não observamos o fenómeno da difracção.



- No exemplo da figura, fora do cone AFB não há luz: não existe difracção, pois a abertura é demasiado grande. Sem embargo, o buraco à direita tem dimensões semelhantes (ou inferiores) à longitude de onda da luz que se propaga desde F. Segundo o Princípio de Huygens, o ponto do buraco converte-se em novo foco de ondas, espalhando a luz fora do cone, como no ponto P: existe difracção.
- Quando a lonx. de onda é da mesma orde de magnitude que o obstáculo, se situarmos atrás a pantalla como na experiência de Young, aparecerão umas faixas iluminadas e outras escuras. A medida da distância entre estas pode-se utilizar para determinar o tamanho dos obstáculos, conhecida a lonx. de onda incidente.

6.5.3- Polarización

- Nas ondas transversais existen infinitas direccións contidas nun plano perpendicular á dirección de propagación nas que pode ter lugar a vibración.
 - A polarización dunha onda caracteriza a dirección das súas oscilacións.
 - É unha propiedade que só ten sentido nas ondas transversais e ten especial relevancia no caso da luz, pois valen para demostrar o seu carácter de onda transversal.
 - Se a vibración dunha onda transversal se mantén paralela a unha liña fixa do espazo, diwe que a onda está linealmente polarizada.
 - Na luz e nas ondas ETL, as vibracións supoñen a variación dos valores dos campos eléctrico e magnético asociados, que son sempre perpend. á dirección de propagación. A onda ETL resultante é unha superposición das ondas individuais producidas por cada átomo ou molécula excitado. O resultado, en xeral, é luz non polarizada, pois hai millóns de átomos con electróns acelerados que emiten ondas ao chou.
 - Un polarizador é un dispositivo que lle confire un determinado estado de polarización a unha onda transversal. Os mecanismos máis comúns para polarizar a luz son:
 - Polarización por absorción: Interpoñendo no camiño da luz certas substancias, denominadas comercialmente polaroides; estas absorben toda a luz que non oscila nunha determinada dirección. A luz que emerge do polaroide está linealmente polarizada.
- Ex. gafas de sol con revestimento polaroide



Espectro electromagnético

As propiedades da luz cambian de maneira notable cando se cambia a súa frecuencia. En particular, non tódalas frecuencias impresionan a nosa retina, é dicir, a **luz visible** é soamente unha parte moi pequena do conxunto de frecuencias posibles dunha onda electromagnética.

A clasificación da luz pola súa frecuencia (ou pola súa lonxitude de onda) recibe o nome de **espectro electromagnético**. Neste espectro as frecuencias moi elevadas correspóndenlles ós raios gamma, producidos na radioactividade nuclear. No outro extremo encóntranse as ondas de radio e televisión.

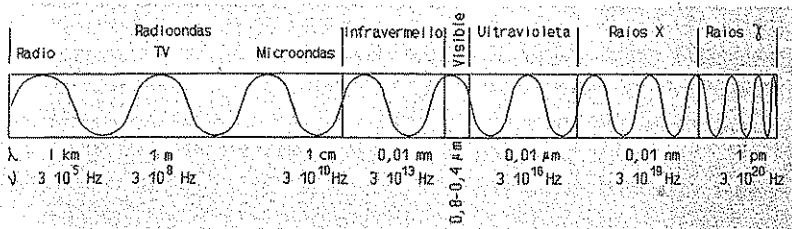
Na zona intermedia do espectro está a luz visible, que se caracteriza porque cada frecuencia produce unha cor diferente. A lonxitude de onda correspondente está comprendida entre os 400 nm (para a cor violeta) e os 700 nm (para o vermello escuro).

A enerxía dunha onda electromagnética é proporcional á súa frecuencia e, polo tanto, o seu poder de penetración en calquera material (en particular nos tecidos orgánicos) é inversamente proporcional á súa lonxitude de onda. Por esta razón os raios gamma son moi perigosos, mentres que as ondas de televisión son practicamente inofensivas.

Tódolos corpos emiten radiación electromagnética polo mero feito de estaren máis ou menos quentes. Por exemplo, á temperatura ordinaria a radiación emitida pertence á zona infravermella do espectro. Os chamados «visores nocturnos» son en realidade detectores de luz infravermella.

Espectro electromagnético.

As ondas electromagnéticas abarcan unha gamma moi ampla de frecuencias ($10\text{ Hz} - 10^{23}\text{ Hz}$) constituindo o chamado **espectro electromagnético**. Os diversos intervalos de frecuencias teñen nomes específicos, que son:



Radioondas ($3 \cdot 10^3\text{ Hz} - 3 \cdot 10^9\text{ Hz}$): Son as ondas electromagnéticas de menor frecuencia. Producense nun circuíto oscilante LC. Empréganse en radiodifusión¹⁰ e telecomunicacións.

Microondas ($3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$): Son producidas por vibracións de moléculas. Empréganse en radioastronomía e comunicacións.

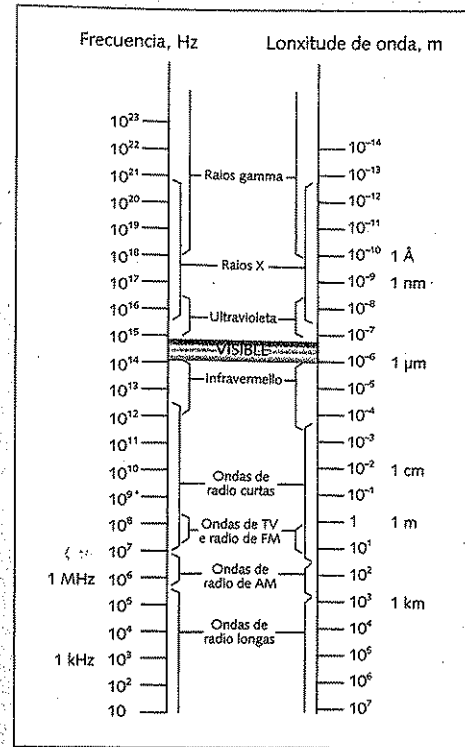
Raios infravermellos ($3 \cdot 10^{12}\text{ Hz} - 3 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$): Son producidas por vibracións atómicas. Empréganse na industria e en medicina.

Luz visible ($3,8 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$ - vermello - ata $7,7 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$ - violeta): Son producidas por oscilacións dos electróns máis externos do átomo. Empréganse para a visión, láser, etc. A radiación solar está formada por un 60% de raios visibles, o 37% de radiación infravermella e o 3% de radiación ultravioleta.

Raios ultravioleta ($8 \cdot 10^{14}\text{ Hz} - 10^{17}\text{ Hz}$): Son producidas por oscilacións dos electróns internos do átomo. Empréganse en medicina. O Sol é un gran emisor de raios ultravioleta.

Raios X ($10^{16}\text{ Hz} - 10^{21}\text{ Hz}$): Son producidos nas oscilacións de electróns próximos ao núcleo. Utilízanse na industria e en medicina. Axuda ao organismo para sintetizar a vitamina D (unha das poucas que o home é capaz de sintetizar). A fonte natural desta radiación é o Sol. Podemos produci-la mediante lámpadas de vapor de mercurio. Son perigosos para os tecidos debido ao seu poder enerxético¹¹.

Raios gamma (10^{19} Hz e maiores): Son de orixe nuclear, aparecendo nas reaccións nucleares. Son daniosos para os seres vivos.



Dispersión

A luz visible que recibimos habitualmente en pleno día contén unha mestura de tódalas frecuencias, o que fai que se perciba de cor branca. Sen embargo, é posible descompoñela nas cores do espectro facendo que se refracte nun prisma de cristal, xa que a velocidade de propagación nese medio é diferente para cada frecuencia.

Este fenómeno chámase **dispersión** da luz. A súa orixe ondulatoria queda patente porque é un fenómeno invertible, é dicir, é posible reunificarl as cores mediante unha segunda refracción e recupera-la luz branca.

Fibras ópticas

Cando a luz pasa do interior dun cristal ó aire, os raios afástanse da normal, pois a súa velocidade é maior no aire. Por esta razón, se o ángulo de incidencia é grande, pode ocorrer que a luz se reflecta no canto de refractarse, dando lugar ó fenómeno de **reflexión total**.

Isto permite canalizar a luz en tubos de cristal de pequeno diámetro, que reciben o nome de **fibras ópticas**. Na medicina úsanse para poder observar certos órganos internos sen intervención cirúrxica. Tamén son de grande utilidade nas telecomunicacións. Por exemplo, unha fibra óptica do grosor dun pelo humano pode transmitir información de audio e de vídeo equivalente a 25.000 voces falando simultaneamente.

Ondas radioeléctricas

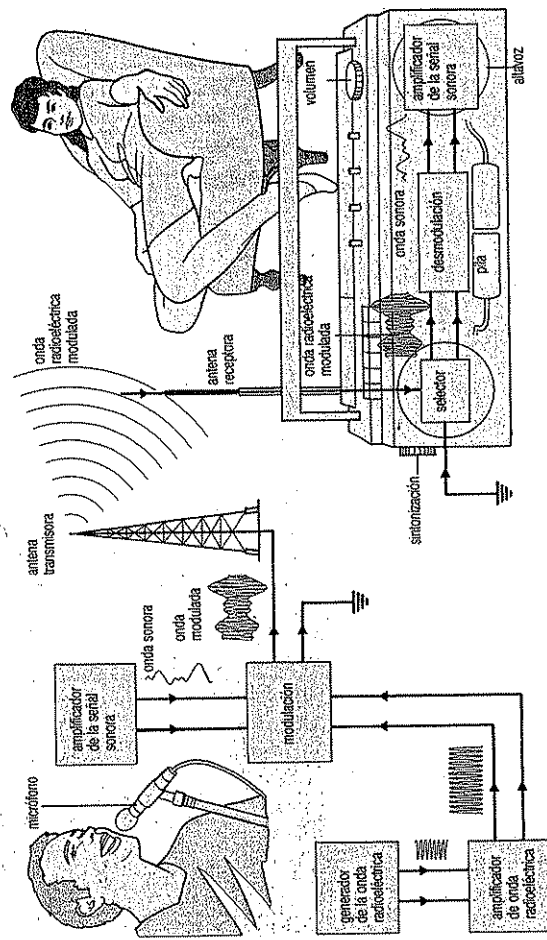
En el aire

En 1887 Heinrich Hertz hizo experimentos con una bobina de inducción. Observó que siempre que la bobina producía una chispa, aparecía otra chispa en los extremos de una anilla metálica abierta situada a varios metros. Las ondas radioeléctricas, producidas por la primera chispa, se habían transmitido de un lado a otro de la habitación. Después Guglielmo Marconi descubrió una forma de transmitir el sonido. En 1907 pudo transmitir la primera señal sonora a través del Atlántico. El descubrimiento de Marconi fue la clave para la utilización de las ondas radioeléctricas en la comunicación.

Comunicaciones por ondas radioeléctricas

El aire que nos rodea se llena de muchas ondas radioeléctricas diferentes, todos los días, cada día. Aunque muchas transmiten señales sonoras, no podemos oírlas sin receptores especiales. Así que, ¿cómo es posible que las ondas radioeléctricas transmitan sonidos, silenciosos y rápidamente, a todas las partes del mundo y más allá?

En el diagrama se ven las etapas principales de la comunicación por ondas radioeléctricas.



El generador de la onda radioeléctrica produce una onda portadora de amplitud y frecuencia constantes. Después, esta onda es alterada (modulada) de forma que incorpora a la señal sonora que se está transmitiendo. La onda portadora modulada finalmente sale de la antena transmisora. Cualquier receptor, sintonizado con la misma frecuencia, capta esta onda modulada. La señal sonora y la onda portadora son separadas (desmoduladas) y una señal sonora amplificada va al altavoz.

Modulación

Una forma de añadir sonido a las ondas radioeléctricas es cambiar la altura (amplitud) en la frecuencia de la señal sonora. Esto se llama modulación de amplitud (AM). La frecuencia de la onda radioeléctrica (portadora) permanece inalterable.

Otra forma de transmitir sonido por radio es mantener constante la amplitud de las ondas radioeléctricas y hacer que las señales sonoras cambien la frecuencia. Esta forma de modulación, que se llama modulación de frecuencia (FM), se usa con ondas radioeléctricas de frecuencia muy alta (VHF: Very High Frequency).

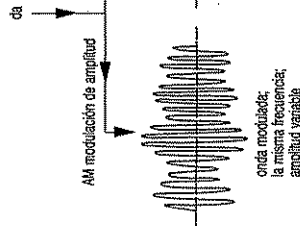
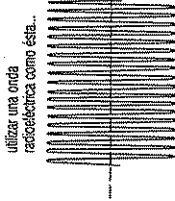
Hay dos ventajas primordiales de la radiodifusión de VHF/FM frente a la radiodifusión AM. En primer lugar no sufren tantas interferencias y en segundo lugar la calidad acústica es mucho mejor. Por estas razones, la FM se usa cuando la calidad acústica es importante, como con alta fidelidad.

Naturalmente, ¡siempre hay una dificultad! Las transmisiones de VHF sólo pueden recibirse claramente en distancias cortas, quizá 40 km más o menos, debido a la curvatura de la superficie de la tierra. Estas transmisiones tienen un «alcance visual» porque, al igual que la luz, se desplazan solamente en líneas rectas.

Muchas emisoras de radio usan transmisiones tanto de AM como de FM. Emiten señales de AM en ondas medias y largas y el mismo programa en señales de FM en ondas de frecuencia muy alta. Esto permite que la gente con receptores de AM oiga emisiones en lugares del país a donde no llegan las señales de VHF/FM. También proporcionan una recepción de gran calidad a otros con receptores de VHF.

El silencio es oro

Las ondas radioeléctricas, sean AM o FM, no pueden detectarlas los seres humanos y por eso reina el silencio (a no ser que tengas un receptor de radio).



La modulación de la onda radioeléctrica puede ser AM o FM. La señal sonora se restaura suprimiendo la onda portadora de la señal modulada en el receptor.



1 Radio 1 utiliza una frecuencia de la onda portadora de 585 kHz con una longitud de onda de 512,8 m. Usa estos valores para calcular la velocidad de estas (y de todas las demás) ondas radioeléctricas.

2 Copia y completa la tabla siguiente para 5 emisoras, utilizando los valores listados en el recorte del periódico.

Emisora	Frecuencia	Longitud de onda
Radio 5	657 kHz	456,6 m

3 a) Explica por qué emisoras diferentes tienen que utilizar radiofrecuencias diferentes.

b) ¿Qué mando del receptor se altera para captar estas emisoras diferentes?

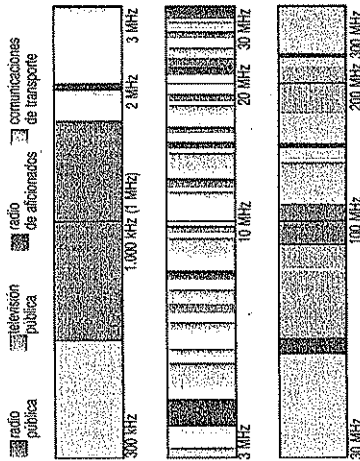
De ELF a UHF

Ondas radioeléctricas

Las ondas radioeléctricas forman parte del espectro de las ondas electromagnéticas. Dentro del mismo grupo de ondas radioeléctricas hay una gama amplia (un espectro) de frecuencias y propiedades de dichas ondas.

Las ondas radioeléctricas de frecuencias diferentes tienen propiedades diferentes y por eso las ondas de una sección tienen propiedades diferentes de las de otras secciones.

Cada parte del espectro de las ondas radioeléctricas tiene unas ventajas respecto a las otras partes. Estas ventajas determinan el uso primordial de esa parte concreta del espectro.



Banda de frecuencias	Denominación de la frecuencia	Longitud de ondas (m)	Denominación de las ondas	Alcance aprox. (km)	Usos más importantes
30 Hz-3 kHz	sumamente baja ELF	> 100.000	onda larga	> 1.500	enlaces con submarinos
3-30 kHz	muy baja VLF	100.000-10.000			flota de largo alcance, para uso del ejército
30-300 kHz	baja, LF	10.000-1.000			flota de largo alcance para uso del ejército
300 kHz-3 MHz	media, MF	1.000-100	onda media	< 1.500	radiodifusiones sonoras
3-30 MHz	alta, HF	100-10	onda corta	mundial	radiodifusiones sonoras
30-300 MHz	muy alta VHF	10-1	onda ultracorta	sólo más allá del horizonte	sonido de alta calidad
300-3.000 MHz	sumamente alta UHF	1-0,1		horizonte	enlace por televisión o móvil
> 3.000 MHz		< 0,1	microondas	36.000	enlaces por microondas, e.g. para satélites

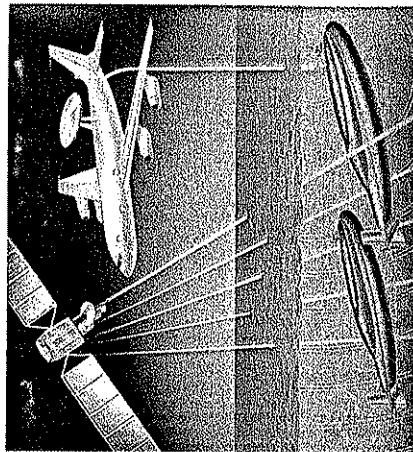
Una división del espectro de las ondas radioeléctricas.

¿Qué onda?

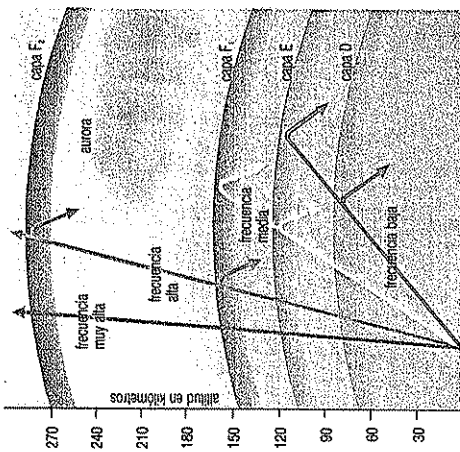
Si todas las ondas radioeléctricas pueden modularse para transmitir una señal sonora, ¿por qué usar ondas radioeléctricas de frecuencias tan distintas? La razón es que tienen propiedades diferentes.

Todas las ondas electromagnéticas se desplazan por el espacio a 3×10^8 m/s.

La ionosfera es una zona de partículas cargadas (iones) en el aire. La energía para producir estos iones procede de la radiación que llega a la Tierra desde el Sol.



Comunicación con submarinos en inmersión por medio de ondas radioeléctricas.

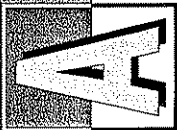


Detalles de las capas de la ionosfera que indican dónde se reflejan diferentes ondas radioeléctricas.

1 Explica las siguientes opciones de ondas radioeléctricas:

- microondas para enlaces por satélite;
- VHF para emisoras costeras en las que el alcance de la comunicación es de unos 40 km;
- la mayor parte de las radioemisoras utilizan ondas entre 10.000 m y 100 m de longitud de onda.

2 La banda de frecuencias o anchura de la banda necesaria para transmitir la voz es de unos 4 kHz. Explica por qué la transmisión de música de alta calidad necesita más (18 kHz) y la televisión muchísimos más (8 MHz).

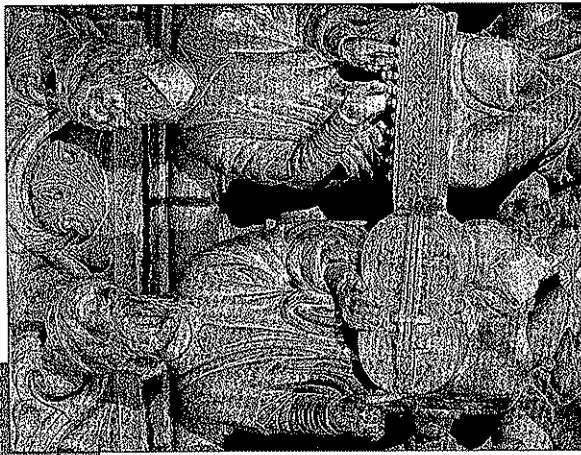


Instrumentos musicais

Producción de son

Os sons prodúcense sempre que existe algunha causa que provoca unha vibración das moléculas do aire. Os instrumentos musicais son mecanismos que, mediante unha ou outra técnica, conseguen producir estas vibracións. Normalmente compóñense de dúas partes fundamentais: o **vibrador**, que é o auténtico xerador de sons, e o **resoador**, dispositivo que serve para amplificar-lo son xerado polo vibrador e que habitualmente está formado por un compartimento pechado, aínda que ás veces ten unha ou máis aberturas pequenas.

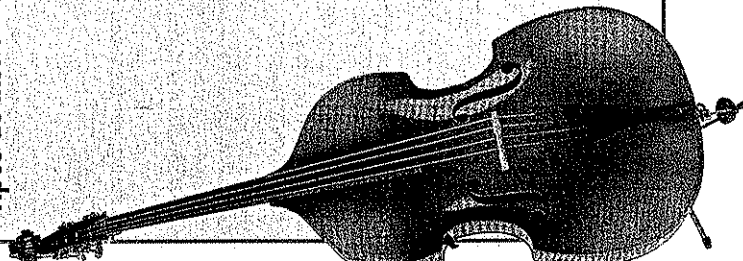
Músicos. Detalle do Pórtico da Gloria da catedral de Santiago de Compostela. Recentemente fabricáronse os instrumentos esculpidos neste pórtico do século XII, co obxectivo de recuperar-los sons daquela época.



Tipos de instrumentos

- Os **instrumentos de corda**, coma o violín ou a guitarra, teñen como vibrador un conxunto de cordas tensas de materiais diversos, coma o aceiro ou o nailon; as súas vibracións transmitíense ás moléculas de aire circundante. O resoador é unha caixa de madeira cunha forma adecuada que recolle e amplifica o son producido polas cordas.
- Nos **instrumentos de vento**, coma a frauta doce ou a trompeta, o vibrador é lixeiramente máis complicado. Consiste nun conducto curto e estreito que termina nunha abertura da caixa que fai de resoador. Cando se sopra máis ou menos fortemente a través do conducto, prodúcese remuíños de aire que fan vibrar as moléculas próximas. As veces o conducto anterior está formado polos labios da persoa que sopra, como é o caso da frauta traveseira.
- Os **instrumentos de percusión** están formados por un mazo pequeno que golpea sobre un obxecto (vibrador) capaz de vibrar, como pode ser un anaco de metal ou unha membrana moi tensa. É o caso dun xilófono ou dun tambor.

Un «instrumento musical» moi particular é o que dá lugar á voz humana. É dicir, o conxunto das cordas vocais, a larinxe e a cavidade bucal. Este instrumento musical é unha mestura de tipo corda e vento e, como sabemos, pode chegar a producir sons de gran riqueza.



Ton e escalas musicais

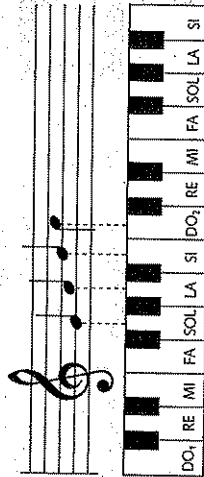
Unha das características fundamentais do son emitido por un instrumento musical é o seu **ton**. Esta característica fai referencia á frecuencia da onda.

A experiencia mostra que o efecto musical de dous sons emitidos sucesivamente (melodía) só depende do cociente das súas frecuencias F_1/F_2 . Este cociente chámase **intervalo tonal** e é o que permite ordenar as notas musicais en escalas, como é o caso da escala **diatónica**:

DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
1	9	5	4	3	5	15	2
	8	4	3	2	3	8	

onde os intervalos están referidos á nota DO inicial. O intervalo entre dúas notas do mesmo nome, por exemplo dúas LA, é sempre igual a 2 e chámase **oitava**. Para distinguir estas notas pónselles un subíndice, por exemplo:

Notas DO	DO ₁	DO ₂	DO ₃	DO ₄
Frecuencias	64 s ⁻¹	128 s ⁻¹	256 s ⁻¹	512 s ⁻¹



Tímbre e harmónicos

Outra característica moi importante do son emitido por un instrumento é o **tímbre**.

Esta característica e a calidade da onda que nos permite distinguir, por exemplo, se un son procede dun violín ou dun piano, ou se é a voz dunha persoa coñecida ou o ruído dun ascensor.

O matemático francés Joseph B. Fourier (1768-1830) demostrou que calquera onda é unha mestura dun gran número de ondas harmónicas. O tímbre é o conxunto de todas as frecuencias destas ondas harmónicas. Habitualmente, este conxunto está formado por unha frecuencia fundamental, por exemplo, a nota LA₃, e todos os seus múltiplos, que se chaman **harmónicos**. Segundo sexa a riqueza e intensidade destes harmónicos, o oído humano ten unha sensación ou outra, o que lle permite distinguir a fonte do son.

ACTIVIDADES E CUESTIONS

A produción do son

Indica qué parte é o resoador e cal o vibrador nos seguintes instrumentos musicais: guitarra, arpa, violonchelo, tímbral, xilófono, piano, órgano, trompa, frauta e triángulo.

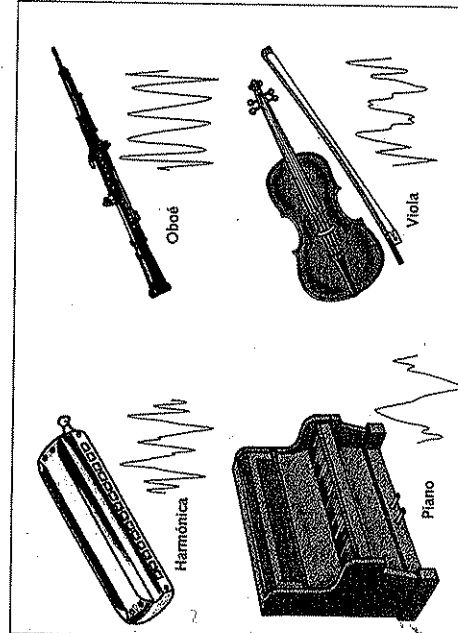
Explica por qué o piano pode ser considerado como instrumento de corda e de percusión.

A escala musical

- ¿Que é a escala diatónica?
- ¿Que relación existe entre as frecuencias correspondentes a dúas notas contiguas na escala diatónica?
- ¿Que é unha oitava? ¿En que se diferencia unha nota e a súa oitava?

Gráfica das ondas sonoras instrumentais

Como cada instrumento ten un tímbre distinto, a representación gráfica das ondas sonoras que emite ten tamén un aspecto diferente.



A audición

O oído é un detector de sons

As ondas sonoras producen vibracións no tímpano, as cales se transmiten como ondas elásticas a través dos ósos do oído medio. Estas ondas pasan á cóclea ou caracol, onde se mide a súa frecuencia. Finalmente, transmitíense ó cerebro como impulsos eléctricos e alí son procesados e analizados.

Limitacións do oído

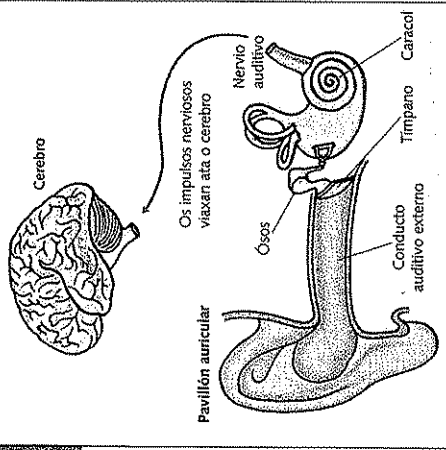


Covas de Nerja, Málaga. No interior das covas prodúcese reverberacións sorprendentes.

Ultrasons

O tímpano e a cóclea (caracol) non son capaces de percibir todas as frecuencias. Para unha persoa nova a gama de frecuencias audíbles sitúase aproximadamente entre 20 Hz e 20.000 Hz.

Os sons que teñen unha frecuencia superior ós 20.000 Hz denomínanse **ultrasons** e son moi útiles en diversas aplicacións. Por exemplo, os ultrasons utilízanse na medicina para romper cálculos de riñón sen necesidade de intervención cirúrxica. Algúns animais, coma o morcego e o can, si perciben ben os ultrasons.



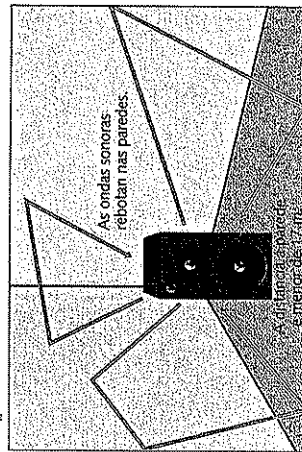
Anatomía do oído e transmisión da información sonora ata o cerebro.

Eco e reverberación

A transmisión de sinais desde o tímpano ata o cerebro existe un certo tempo. Así, por exemplo, cando se escoita unha palabra, necesítase ó menos unha décima de segundo para distinguir unha sílaba da seguinte.

Nisto baséase o fenómeno do eco: ó berrar fronte a unha parede situada a máis de 17 m as sílabas oñen-se dúas veces. En efecto, o son reflectido na parede percorre máis de 34 m e, polo tanto, tarda en chegar máis dunha décima de segundo, xa que a velocidade de propagación é de 340 m/s.

Cando a distancia á parede é menor de 17 m, os son orixinais mestúranse cos reflectidos sen que o oído humano sexa capaz de distinguir claramente uns doutros. Prodúcese entón unha sensación auditiva denominada **reverberación**, que é a que percibimos, por exemplo, cando falamos nunha estancia grande e baleira.



Energía e audición

Os sons tal como os percibimos habitualmente, en forma de música, de ruído ou de palabras, transportan diferentes cantidades de enerxía, o que se traduce nunha maior ou menor sensación auditiva.

A **intensidade** dunha onda é a enerxía que transporta por unidade de tempo a través da unidade de superficie perpendicular á dirección de propagación. No Sistema Internacional a intensidade mídese en vatios por metro cadrado.

A mínima intensidade I_0 que percibe o oído humano chámase **intensidade soleira** e ten un valor aproximado de 10^{-12} W/m². En canto á máxima intensidade que soporta a maioría das persoas antes de sentir dor é da orde de 1 W/m². Debido a esta marxe tan ampla, utilízase unha escala «encollida», que consiste en substituí-la intensidade I polo **nivel de intensidade sonora** β , que ten por unidade o decibelio:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Así, resulta que as soleiras da audición e da dor corresponden cos seguintes valores: soleira da audición: $\beta_0 = 0$ decibelios. Soleira da dor: $\beta_{\text{max}} = 120$ decibelios.

Nesta escala, por exemplo, multiplicar por dez a intensidade é equivalente a aumentar en dez unidades os decibelios.

Contaminación sonora

O exceso de sons pode chegar a dano-lo oído e incluso afecta-lo cerebro ou outros órganos, sobre todo se a intensidade sonora é moi elevada ou permanente. Isto ocorre, por exemplo, nas proximidades dunha autoestrada con moito tráfico. Por esta razón instálanse pantallas acústicas naquelas autoestradas que pasan preto de zonas moi poboadas.

Na táboa móstranse os valores do nivel de intensidade sonora en diferentes ambientes da vida diaria.

Son	dB	Sensación
Follas das árbores	0	Soleira
Biblioteca	20	A penas audíble
Oficina sen máquinas	40	Pouco audíble
Conversación normal	50	Suave
Fábrica con máquinas	60	Moderado
Tren nun túnel	80	Moi forte
Saída dun reactor a 60 m	100	Enxordecedor
Saída dun reactor a 10 m	120	Soleira da dor
	150	Dor

ACTIVIDADES E CUESTIONS

A audición

Indica cales son as partes do oído que captan as vibracións do aire, cales as transmiten e cales as procesan para convertelas en impulsos nerviosos.

¿Que é a reverberación? ¿Onde se produce? ¿Por que non se pode producir nun espazo aberto? Fai un esquema de como se produce a reverberación nun cuarto baleiro.

Sábese que as persoas anciás non adoitán oí-los sons de frecuencia moi alta. Explica por que.

Energía e audición

¿Que é a intensidade do son? ¿É o nivel de intensidade? Explica por que é máis útil esta magnitude cá intensidade.



No despegamento dun avión a reacción prodúcese un ruído intenso que supera a soleira da dor.

