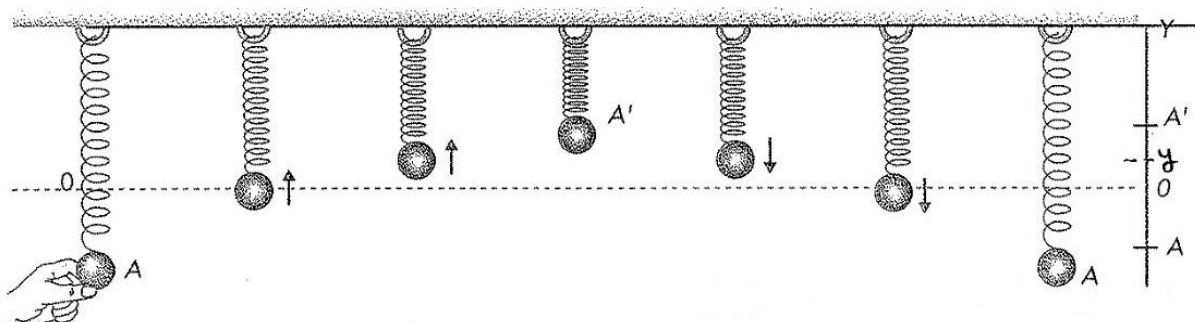


Bloque 3: Ondas

3.1.- Oscilador Harmónico. Estudo dinámico e enerxético do oscilador harmónico.

3.1.1. - Introducción

- Un corpo oscila cando se move periodicamente ao redor da súa posición de equilibrio.
- Movemento periódico: é aquel que se repite a si mesmo, isto é, o móbil pasa repetidas veces e a intervalos de tempo iguais pola mesma posición e sempre coas mesmas características do movemento (velocidade, aceleración...).



3.1.2. - Magnitudes características do movemento oscilatorio.

- Elongación (y): distancia á que está o obxecto da posición de equilibrio.
- Amplitude (A): elongación máxima, isto é, máxima separación do obxecto da posición de equilibrio.
- Período (T): tempo empregado en realizar unha oscilación completa ("ida e volta").
- Frecuencia (f): número de oscilacións por segundo. É a inversa do período.

3.1.3. - Cinemática do Movemento Harmónico Simple (M.H.S.)

- O M.H.S. é un tipo moi corrente e importante de movemento oscilatorio.
- Cando un obxecto se despraza da súa posición de equilibrio, teremos un M.H.S. se existe unha *forza recuperadora* ("elástica") que sexa proporcional ao desprazamento.
- No M.H.S., o movemento do obxecto ven descrito pola ecuación de posición:

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

Onde A , ω e φ son constantes.

- $\omega t + \varphi \rightarrow$ fase do movemento
 $\varphi \rightarrow$ fase inicial, de xeito que se en $t = 0$ o obxecto non está na súa posición de equilibrio ($\varphi = 0$), ha de estar en $y_0 = A \cdot \sin \varphi$.
- $\omega \rightarrow$ 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, $t = T$:

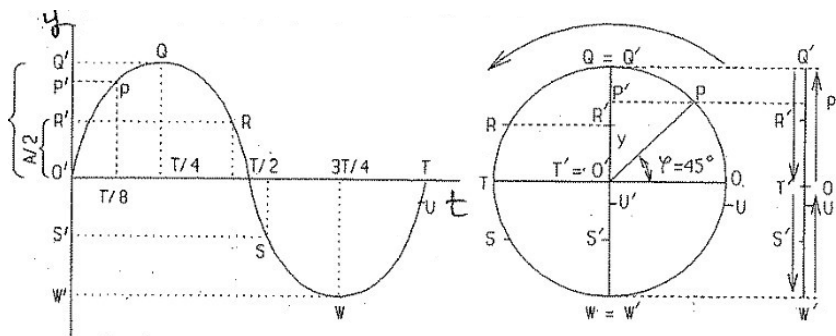
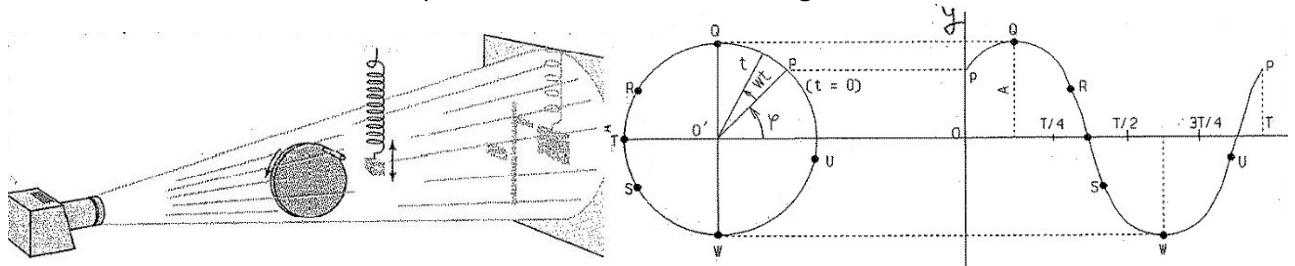
$$\omega(t + T) + \varphi = \omega t + \varphi + 2\pi \rightarrow \omega T = 2\pi \rightarrow \omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

▪ Así:

$$y = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$$

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

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



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

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

- Ecuacións da velocidade e da aceleración:

$$v = \frac{dy}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \pm \omega \sqrt{A^2 - y^2}$$



Máxima en $y = 0$

Nula en $y = \pm A$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 \cdot y$$



Nula en $y = 0$

Máxima en $y = \pm A$
(módulo)

En xeral, todo movemento con aceleración

$$a = -cte \cdot y$$

será M.H.S.

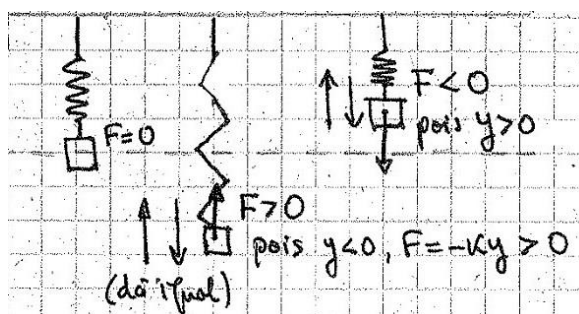
3.1.4. - Estudo dinámico do oscilador harmónico



$$y > 0$$

$$y = 0$$

$$y < 0$$



Un M.H.S. caracterízase porque a forza recuperadora que exerce o resorte sobre o obxecto unido a el é proporcional á separación da posición de equilibrio dirixida cara á posición de equilibrio: $F_e = -K \cdot y$

Pola segunda lei de Newton (non temos en conta a forza peso; ver NOTA 1):

$$\sum F = m \cdot a ; -K \cdot y = m \cdot a ; a = \frac{-K}{m} \cdot y \Rightarrow \text{Tendo en conta que } a = -\omega^2 \cdot y$$

$$\Rightarrow \frac{-K}{m} \cdot y = -\omega^2 \cdot y \Rightarrow \omega^2 = \frac{K}{m} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

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

3.1.5. - Estudo enerxético do oscilador harmónico

En calquera punto da oscilación, o obxecto unido cun resorte posúe enerxía cinética e potencial:

Enerxía cinética:

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

- A enerxía cinética depende da posición, sendo máxima na posición de equilibrio

$$(y = 0 ; E_c = \frac{1}{2} \cdot K \cdot A^2) \text{ e cero nos extremos } (y = \pm A ; E_c = 0)$$

Enerxía potencial (ou enerxía potencial elástica):

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

- A enerxía potencial é máxima nos puntos de elongación máxima

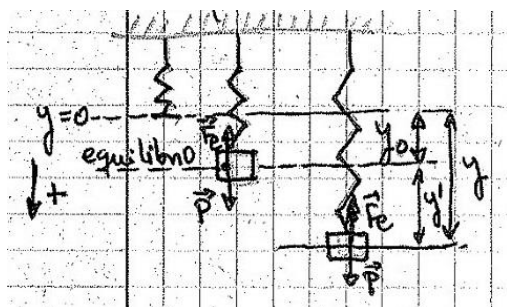
$$(y = \pm A ; E_p = \frac{1}{2} \cdot K \cdot A^2) \text{ e cero na posición de equilibrio } (y = 0 ; E_p = 0)$$

Enerxía mecánica:

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

É constante, tal e como cómpre agardar nun sistema sometido a forzas conservativas.

★ Nota 1: Análise dinámica dun obxecto pendurado dun resorte ou porqué é equivalente estudar o resorte horizontal ao resorte vertical.



Ao pendurar unha masa "m" do resorte, aparece unha forza peso, "P", que fai descender o obxecto até unha posición separada y_0 da posición inicial. Nese intre, acádase o equilibrio:

$$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_e = 0 \Rightarrow m \cdot g - k \cdot y_0 = 0 (*)$$

Se desprazamos agora o obxecto da masa "m" unha distancia y' da nova posición de equilibrio e liberamos o sistema, comezará a oscilar ao redor da posición $y = y_0$, segundo a 2ª lei de Newton:

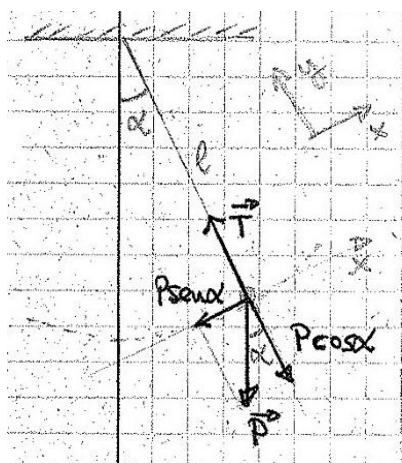
$$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_e = m \cdot \vec{a} \quad ; \quad m \cdot g - k \cdot y = m \cdot \vec{a} \Rightarrow m \cdot g - k(y' + y_0) = m \cdot \vec{a}$$

Como $k \cdot y_0 = m \cdot g$ (ver (*)): $-k \cdot y' = m \cdot a \iff y' = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

Isto é, como y' é a separación do obxecto da posición de equilibrio debido ao peso do obxecto, o único que ocorre é un desprazamento da posición inicial do obxecto dende $y = 0$ até $y = y_0$. O obxecto oscilará ao redor desta posición de equilibrio, sendo a velocidade, aceleración, período e enerxía dependentes só da separación a respecto de y_0 .

★ Nota 2: Péndulo Simple

O movemento dun péndulo simple aseméllase a un oscilador harmónico se a amplitude do movemento é pequena. Un péndulo simple é un punto material de masa "m" ("lentella") pendurado dun punto mediante un fío inextensíbel sen masa e de lonxitude " ℓ ".



$$\sum \vec{F} = \vec{T} + \vec{P} = m \cdot \vec{a} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum F_y = T - m \cdot g \cdot \cos \alpha = m \cdot a_n \\ \sum F_x = -m \cdot g \cdot \sin \alpha = m \cdot a_t \end{array} \right.$$

Aceleración no eixo x:

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

Para ángulos pequenos ($\alpha < 30^\circ$) o valor da función seno é aproximadamente igual ao valor do ángulo expresado en radiáns:

$$\sin \alpha \cong \alpha \Rightarrow a = -g \cdot \sin \alpha \cong -g \cdot \alpha$$

Como ademais para pequenas separacións da posición de equilibrio o arco e a corda case coinciden: $\sin \alpha \cong \alpha \cong \frac{x}{l}$, sendo x a distancia dende a lentella á vertical. Así:

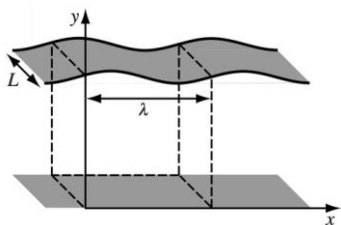
$$a = -g \frac{x}{l}; a = -\omega^2 \cdot x \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \Rightarrow$$

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

3.2.- Movement ondulatorio. Clases de ondas.

3.2.1.- Introducción: Que é unha onda?

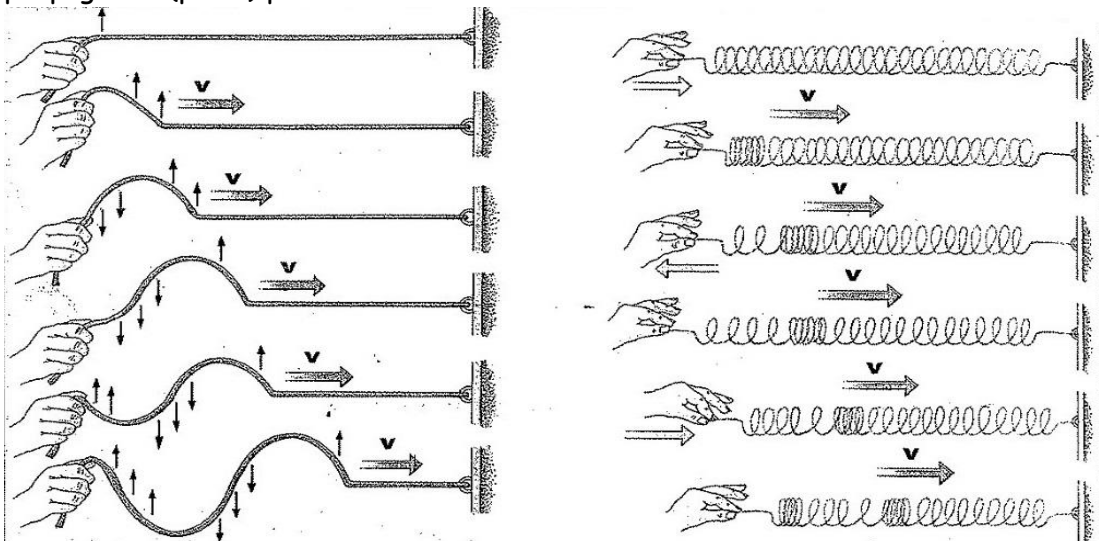
- Existen unha grande cantidade de fenómenos físicos con mecanismos diferentes pero cunha característica común: son situacións físicas producidas nun punto do espazo que se propagan a través do mesmo e que se reciben noutro punto. Son fenómenos ondulatorios.
- *Onda*: propagación dun estado de perturbación 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. Ten as seguintes propiedades:



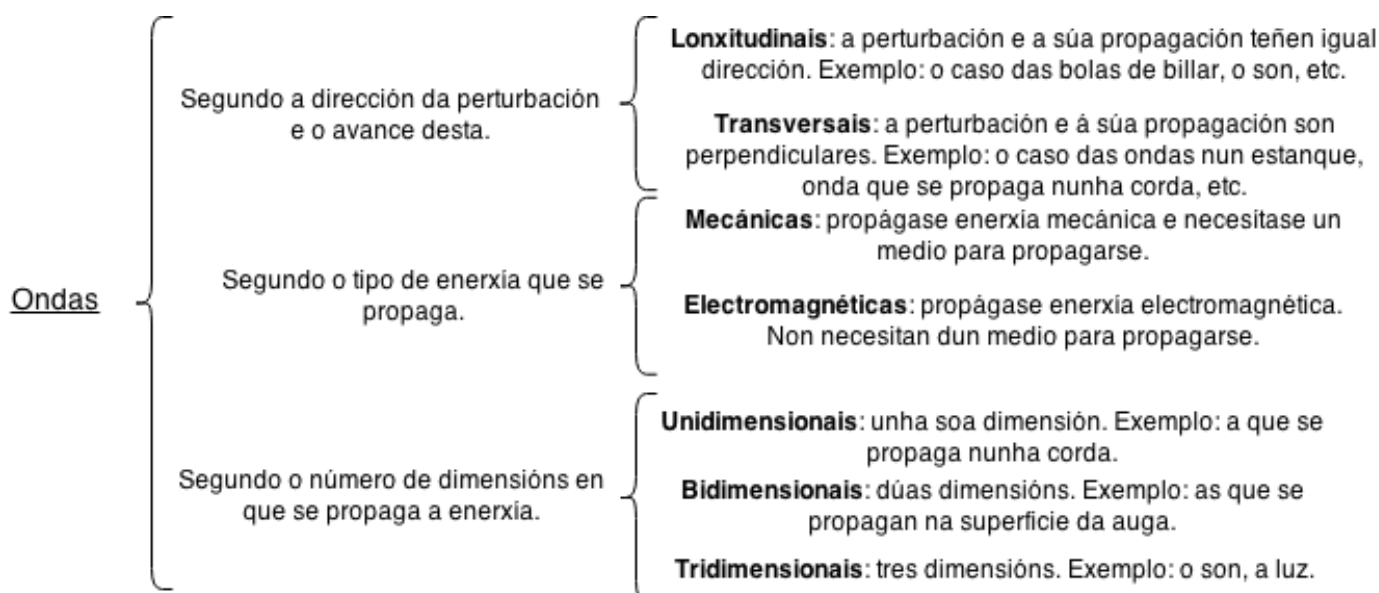
- Leva asociada unha certa cantidade de enerxía, necesaria para que se produza o cambio no valor da magnitude.
- Nun medio, a perturbación non se propaga instantaneamente, senón a unha velocidade finita, que depende do medio e da magnitude física.

- Exemplos:

- Ao golpear unha campá e ao acender a radio, o son óese en puntos distintos pasado un certo tempo. Son ondas sonoras, e o que se propaga é a compresión/dilatación dun gas (o aire).
- Ao acender a luz, as ondas electromagnéticas propáganse á velocidade da luz, precisándose un certo tempo para "iluminar".
- Cando lanzamos unha pedra á auga, a perturbación producida pola pedra transmítese a tódolos puntos da superficie da auga.
- A antena parabólica recibe ondas electromagnéticas enviadas dende un satélite.
- Se desprazamos lateralmente unha corda, o pulso propágase pola corda.
- Se comprimimos un resorte nunha determinada rexión, ao soltalo a compresión vaise propagando (pulso) polo resto do resorte.



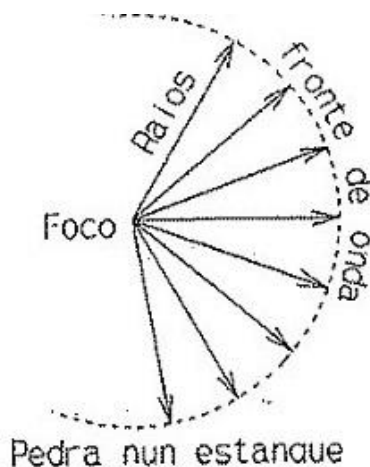
3.2.2.- Tipos de ondas.



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

Electromagnéticas: pódense propagar tamén no baleiro. O que se transmite son as sinais eléctricas, resultado das relacións físicas entre o campo eléctrico e o campo magnético. Normalmente prodúcese ao acelerar cargas eléctricas, o que dá lugar á perturbación dos campos eléctrico e magnético (Experimento de Hertz). No baleiro, todas se propagan a unha velocidade de $3 \cdot 10^8$ m/s. Por exemplo: ondas luminosas, ondas de radio, ondas de televisión, microondas, ondas ultravioleta, etc. Todas están agrupadas e ordenadas pola súa enerxía no chamado *espectro electromagnético*.

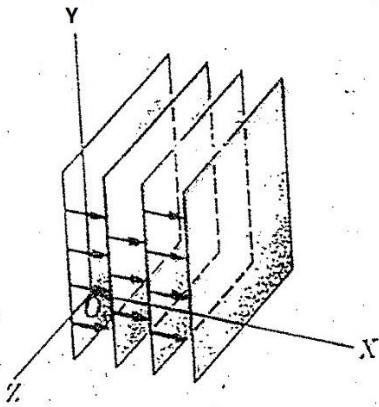
No caso de ondas bi e tridimensionais, son útiles os conceptos de:



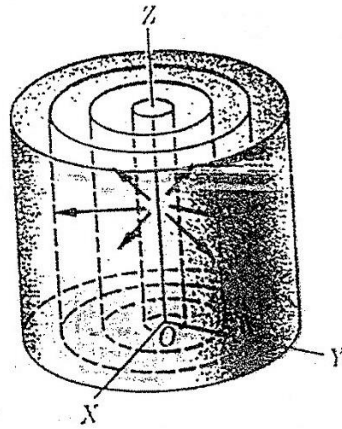
- *Frente de onda:* liña ou superficie imaxinaria formada polos puntos aos que a perturbación chega no mesmo intre (posúen o mesmo estado de vibración).
- *Raio:* dirección na que as ondas se propagan. Son liñas imaxinarias perpendicular ás frentes de onda.

★ Ondas en 3D:

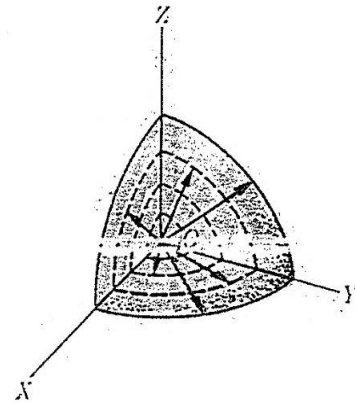
Plana



Cilíndrica

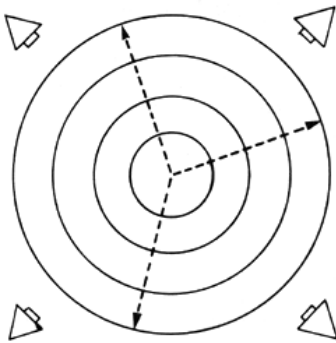


Esférica

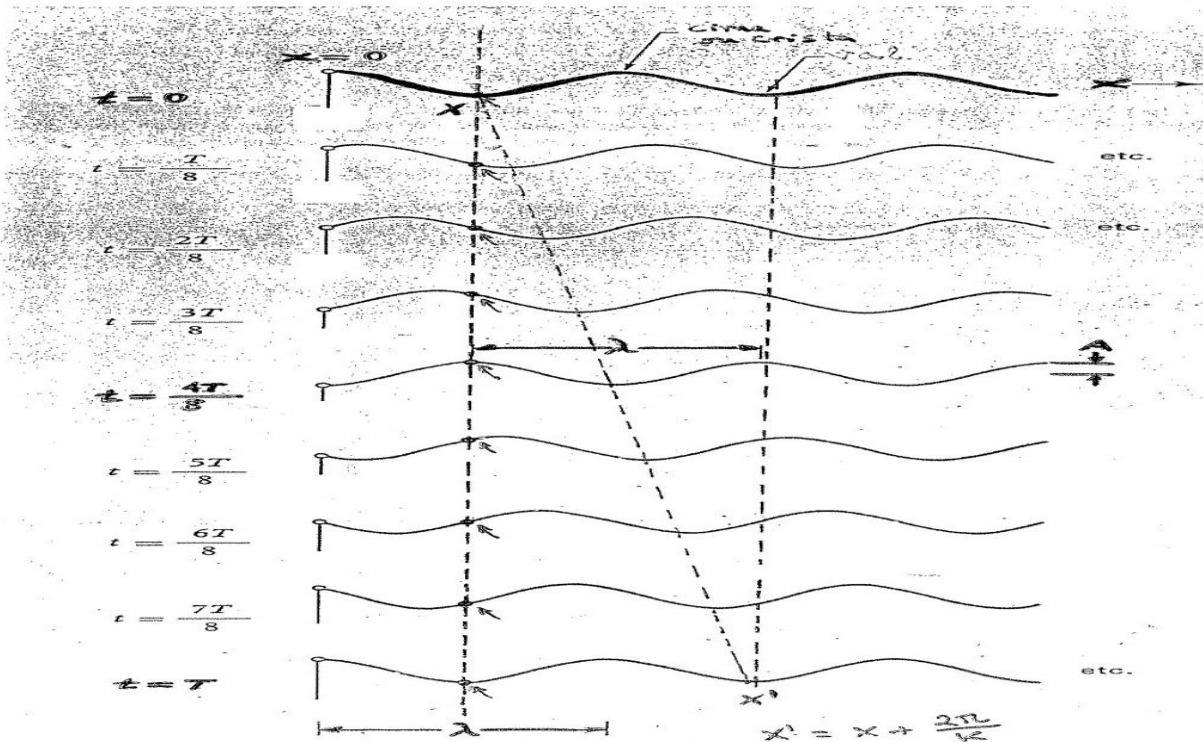


★ Ondas en 2D:

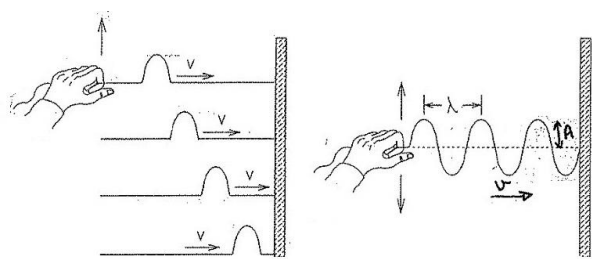
Circular



PERIODICIDADE ESPACIAL (λ) / TEMPORAL (T)



3.2.3.- Magnitudes para describir unha onda.



- *Pulso*: é a propagación dunha onda illada.

- *Tren de ondas*: resultado 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 empézanse a mover, sendo necesario subministrar enerxía continuamente dende o foco.

- *Lonxitude 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 folla 6.3.6.: dous puntos dunha onda están en igualdade de fase cando en calquera intre teñen a mesma elongación (distancia ao punto de equilibrio). A distancia entre eles é un número enteiro de lonxitudes de onda. Dous puntos dunha onda están en oposición de fase cando a distancia entre eles é $n \cdot \frac{\lambda}{2}$, onde $n \in \mathbb{Z}$ e é un número impar. A lonxitude de onda mídese no S.I.

- *Período, T* : é o tempo que tarda a onda en percorrer unha distancia igual á lonxitude de onda. Coincide co tempo que tarda cada partícula do medio en describir unha oscilación completa. O período do movemento ondulatorio é o mesmo que o do movemento vibratorio que está a propagar. Mídese en segundos.

- *Frecuencia, f (ou ν)*: é o número de veces que se repite a mesma situación física (oscilación completa) na unidade de tempo. Mídese en s^{-1} ou en Hz.

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

- *Velocidade de propagación, v* : é sempre a mesma para unha determinada perturbación nun medio.

Exemplos: v_{son} no aire = 340 m/s ; v_{luz} no baleiro = $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

Pola definición de T :

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

- *Elongación, y ou ξ* : é o valor da magnitude física "perturbada" en cada punto do medio. Indica a "separación" da posición de equilibrio na vibración de cada partícula do medio. Mídese nas unidades da magnitude correspondente.

- *Amplitude, A* : é a máxima elongación coa que vibran as partículas do medio. Só depende da enerxía coa que se propaga a onda.

3.3.- Ondas harmónicas. Ecuacións de onda unidimensional.

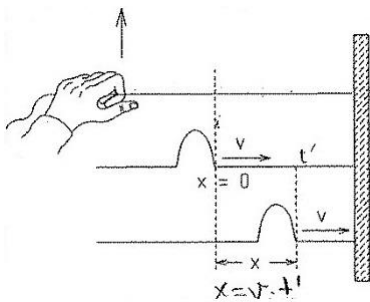
- Unha onda harmónica é a que resulta da propagación no espazo dun movemento harmónico.
- Se isto sucede nunha soa dirección ou se a onda é plana, fálase de onda harmónica unidimensional.
- Queremos buscar a ecuación matemática -función de onda- que nos permita coñecer en cada intre a posición de cada un dos puntos do medio afectados pola propagación do movemento harmónico simple:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen} \left[2\pi \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda} \right) \right] = A \cdot \text{sen}(\omega t \pm kx)$$

➡ Ecuación de onda harmónica unidimensional.

Onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número ou constante de onda: $k = \frac{\omega}{v}$

- Demostración:



- Nun intre dado o impulso afecta á partícula situada en $x = 0$, facéndoa vibrar un M.H.S.

- Logo dun tempo t' , a partícula situada a unha distancia x , tal que $x = v \cdot t'$, onde v é a velocidade de propagación da onda, estará afectada polo mesmo estado de oscilación que o punto $x = 0$ nun intre $t - t'$ segundos anterior:

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

Así, o M.H.S. da partícula en $x = x$ é:

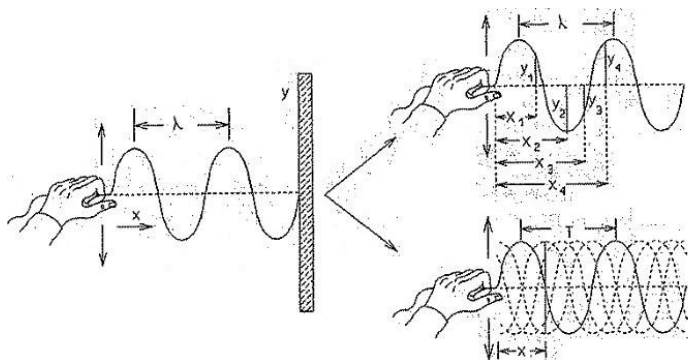
$$y(x, t) = y(0, t - t') = A \cdot \text{sen } \omega(t - t') = A \cdot \text{sen} (\omega t - \omega t')$$

Como $t' = \frac{x}{v}$ ➡ $y(x, t) = A \cdot \text{sen} \left(\omega t - \omega \frac{x}{v} \right) = A \cdot \text{sen} \left(\omega t - \omega \frac{T}{\lambda} \cdot x \right)$

Así: ➡ $y(x, t) = A \cdot \text{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = A \cdot \text{sen} (\omega t - kx)$

- Decatémonos da dobre periodicidade dunha onda:

- Período espacial, caracterizado pola lonxitude de onda, λ : "foto" da onda.
- Período temporal, caracterizado polo período, T : fixamos un "x".



Podemos verificar matematicamente que as funcións de onda repítense cada período espacial ou temporal:

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

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

3.4.- Enerxía e intensidade das ondas harmónicas.

3.4.1.- Enerxía das ondas harmónicas.

- Nun movemento ondulatorio transmítese a enerxía dun punto a outro sen que exista transporte neto de materia.
- Cando unha onda chega a un punto, este empeza a vibrar e adquire enerxía cinética, pois antes estaba no repouso na posición de equilibrio; ao adquirir velocidade, desprázase da súa posición de equilibrio adquirindo enerxía potencial.
- A enerxía mecánica en cada intre será a suma das enerxías cinética e potencial:

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_x^2 + \frac{1}{2} \cdot K \cdot y^2 = \frac{1}{2} \cdot K \cdot A^2$$

Onde v_x é a velocidade de oscilación do punto x . Como $K = \text{cte elástica} = m \cdot \omega^2$:

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

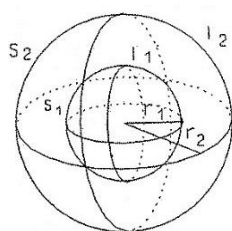
6.3.2.- Intensidade das ondas harmónicas.

- Denomínase *intensidade dun movemento ondulatorio*, I , nun punto, á cantidade de enerxía que na unidade de tempo atravesa a unidade de superficie colocada nese punto perpendicularmente á dirección de propagación da onda:

$$I = \frac{\text{Enerxía}}{\text{Tempo} \cdot \text{Superficie}} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}}$$

- No S.I. mídese en $\frac{J}{s \cdot m^2} = \frac{W}{m^2}$

- Imos considerar o caso particular dunha onda esférica. Neste caso, a intensidade a unha distancia r_1 do foco emisor será:



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

A unha distancia r_2 , con $r_2 > r_1$

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

Se non existise ningún tipo de rozamento:

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

O que significa que a intensidade dunha onda esférica nun punto é inversamente proporcional ao cadrado da distancia ao foco emisor.

- Ademais, como:

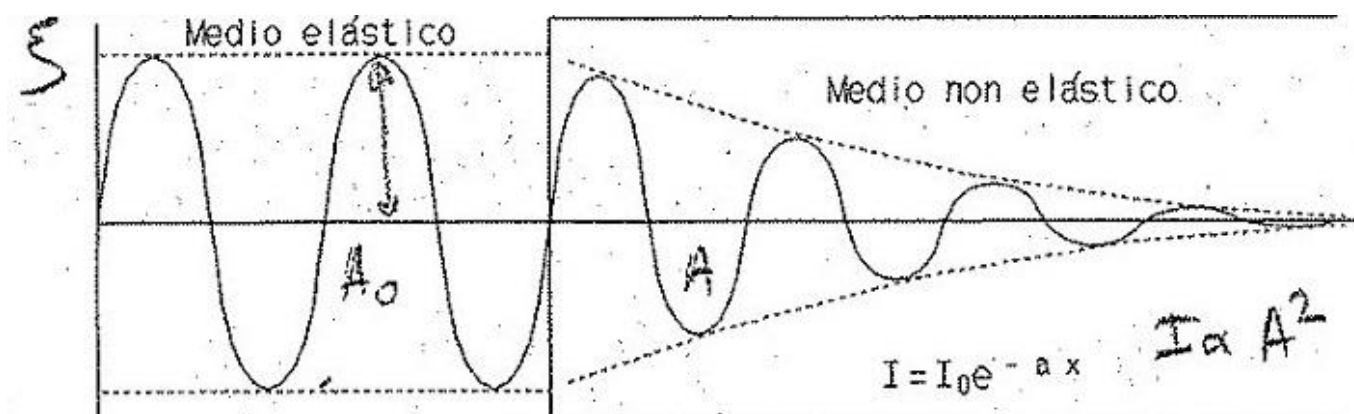
$$E \propto A^2 \rightarrow I \propto A^2 \rightarrow \frac{A_1^2}{A_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

- Estes resultados non supoñen perda da enerxía da onda, senón que a enerxía de cada punto é menor segundo se afasta do foco emisor, pois cómpre termos en conta que cada vez a superficie da fronte de ondas é maior e, xa que logo, o número de puntos a abranguer a onda é maior. Este fenómeno coñécese como *atenuación da onda*.

- As ondas lineais (unidimensionais) como as dunha corda non sofren *atenuación*; sen embargo, se se atenúan 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 coñécese 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 xeometría das fronte de onda, a absorción depende fortemente do medio no que se propaga a onda e da frecuencia desta.



Propiedades das ondas

4.4.- Principio de Huygens: reflexión e refraccións.

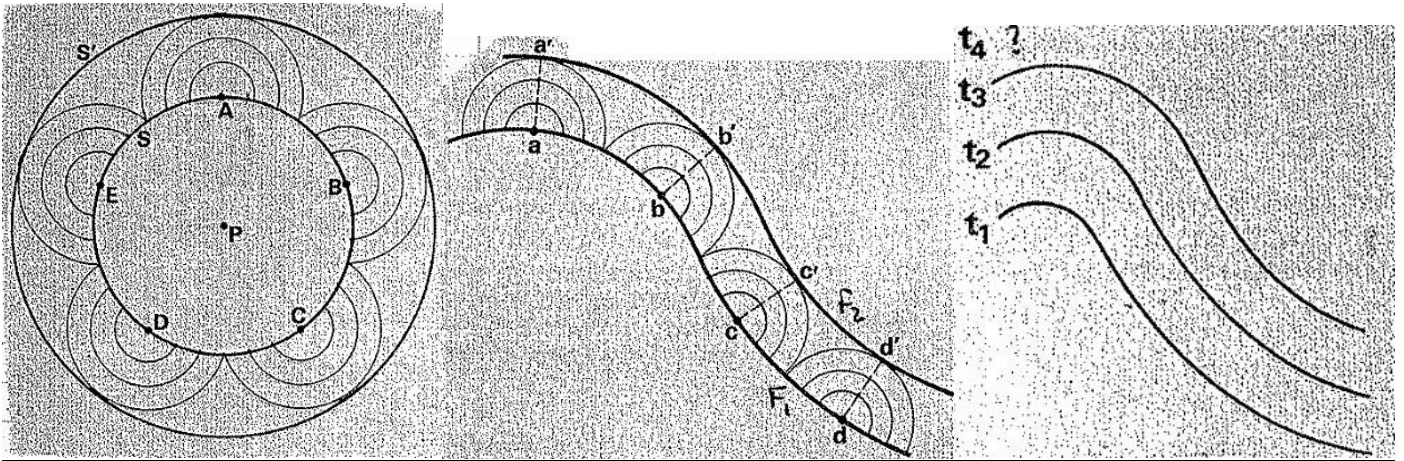
Agora que xa sabemos como describir un movemento ondulatorio, imos estudar cómo se propaga a onda e algúns fenómenos que teñen lugar na propagación.

4.4.1.- Principio de Huygens.

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

- *Principio de Huygens*: "Todos os puntos dunha fronte de ondas convértense 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".

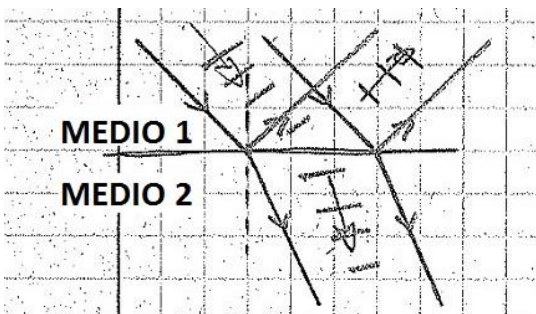
Se collemos unha fronte de onda F_1 calquera, cada un dos seus puntos está animado dun M.H.S.; converténdose en centro emisor de novas ondas secundarias. Logo dun tempo, estas ondas secundarias percorreron a mesma distancia, formando a liña que une todos os puntos unha nova fronte de onda, F_2 .



6.4.2.- Reflexión e refracción de ondas.

- Estes fenómenos tan característicos do movemento ondulatorio prodúcense cando a onda na súa propagación cambia de medio. En dous medios con características físicas diferentes, unha onda propágase 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 desa superficie en ambos os medios á vez, actuando como focos da perturbación (principio de Huygens) e xerando dúas ondas diferentes:



- *Onda reflectida*: retrocede cara o 1º medio de novo.
- *Onda transmitida ou refractada*: propágase polo 2º medio a una nova 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 (os raios) e a normal á superficie de separación dos medios están no mesmo plano.
2. Lei de reflexión: o ángulo de incidencia (i) e o de reflexión (r) son iguais: $i = r$
3. Lei de refracción: o cociente entre o seno do ángulo incidente e o seno do ángulo refractado (t) é constante: (Lei de Snell, 1621)

$$\frac{\sin i}{\sin t} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$$

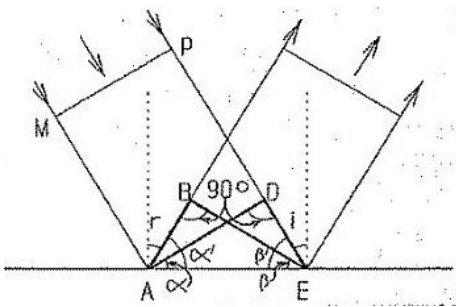
Onde v_1 e v_2 son as velocidades de propagación da onda nos medios 1 e 2, e n_{21} o índice de refracción do medio 2 respecto do 1.

- 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 transmitido non estean contidos nese plano.

- Xustificación 2ª lei (reflexión):

A 2ª e 3ª leis podémolas xustificar mediante o principio de Huygens e supoñendo -por simplificar- frontes de onda planos que chegan cunha certa inclinación i á superficie de separación dos dous medios. Observando o debuxo:



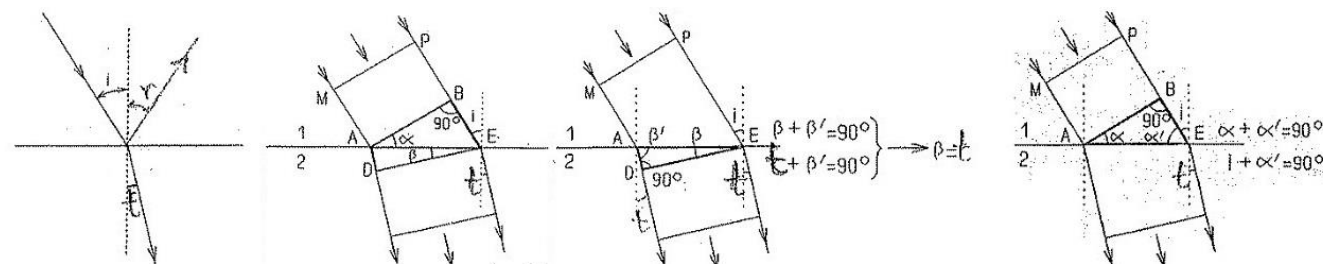
$$\overline{AD} = v_1 \cdot t = \overline{BE}$$

Como os triángulos $\widehat{ABE}$ e $\widehat{ADE}$ son semellantes $\rightarrow \alpha = \beta$ e $\alpha' = \beta'$

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

- Xustificación 3ª lei (refracción):

Agora a onda ao propagarse polo 2º medio cambia a súa velocidade.



Queremos demostrar que: $\frac{\text{sen } i}{\text{sen } t} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} = \text{cte}$:

$$\left. \begin{array}{l} \overline{BE} = v_1 \cdot t \\ \overline{AD} = v_2 \cdot t \end{array} \right\} \quad \frac{\overline{BE}}{\overline{AD}} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} \quad (1) \quad \left. \begin{array}{l} \text{Do debuxo 2º:} \\ \text{sen } \alpha = \frac{\overline{BE}}{\overline{AE}} \\ \text{sen } \beta = \frac{\overline{AD}}{\overline{AE}} \end{array} \right\} \quad \frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{\overline{BE}}{\overline{AD}} \stackrel{(1)}{=} \frac{v_1}{v_2}$$

Mediante os debuxos 3º e 4º deducimos que $\beta = t$ e $\alpha = i$, polo tanto:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } t} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} = \text{cte}$$

O *índice de refracción* dun medio 2 respecto a un medio 1, n_{21} , é un valor constante que serve para comparar a forma de propagarse dunha determinada onda neses dous medios. 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:

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

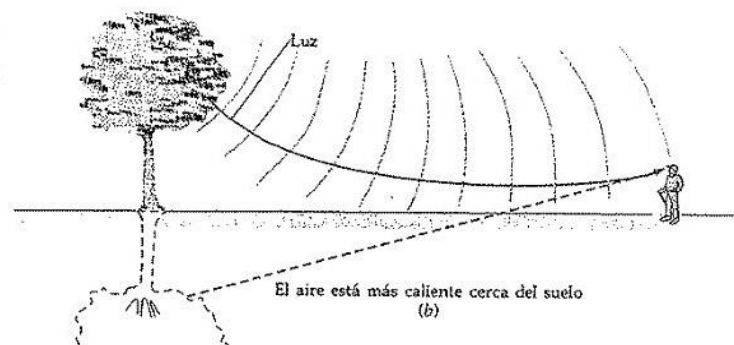
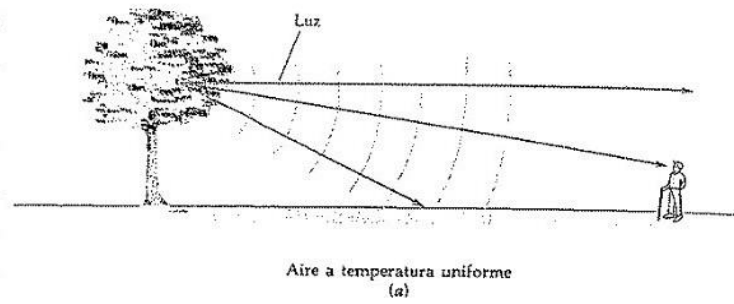
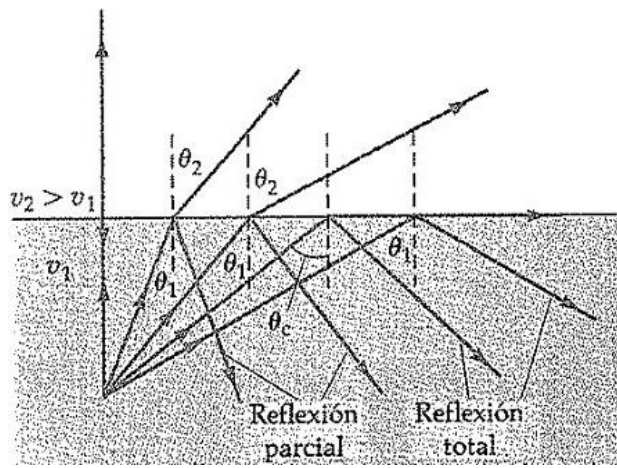
Neste caso, a lei de Snell fica: $n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } t$ onde $n_1 = \frac{c}{v_1}$ e $n_2 = \frac{c}{v_2}$

- 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 electromagnéticas) e afástase 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 90º.

$$\text{sen } i_{\text{lim}} = \frac{v_1}{v_2}$$

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 da luz por fibra de vidro, o funcionamento dos prismáticos ou os espellismos no deserto.



6.5.- Estudio cualitativo de interferencias, difraccións, absorcións e polarización.

6.5.1.- Interferencia de dúas ondas. Principio de superposición.

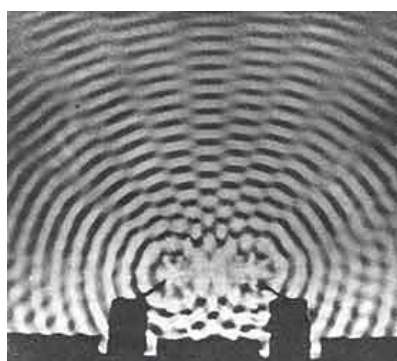
- Até agora estudamos a propagación dunha soa onda. ¿Que ocorrerá cando esa onda se cruce con outra nunha rexión do medio no que se propagan?
- Experimentalmente, pódese comprobar que cando dúas ondas se cruzan, as ondas nese punto suman os seus efectos, conservando logo cada onda a mesma forma e enerxía. Este feito é unha propiedade fundamental do movemento ondulatorio. É unha característica propia das ondas.
- Estes feitos experimentais permítenos enunciar o *Principio de Superposición*.

VER FOLLA 6.13.6.

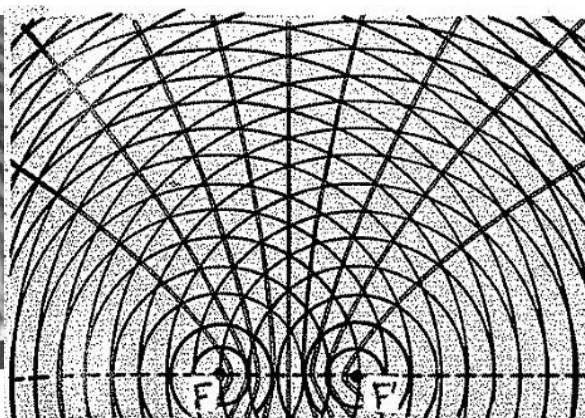
- Cando nunha rexión do espazo dúas ou máis ondas interaccionan, pode ocorrer que a amplitude (intensidade) da onda resultante varíe regularmente duns puntos a outros entre certos valores extremos; estas variacións constitúen os fenómenos de *interferencia*.
- Para que haxa interferencia entre dúas ondas harmónicas cómpre que:
 - As fronte de onda coincidan nalgunha rexión do espazo.
 - As ondas teñan igual frecuencia.
 - As ondas teñan igual dirección da perturbación (as dúas lonxitudas ou as dúas transversais)

Se cómpren estas condicións, os focos das ondas dise que son *coherentes*.

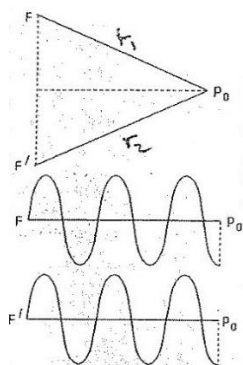
- Dado que existen un gran número de casos de interferencias, imos analizar un caso simple, para inducir logo resultados válidos para as demais interferencias: dúas ondas xeradas por fontes coherentes que emiten en fase ("síncronas", ao mesmo tempo) e que teñen a mesma amplitude.



Interferencia de dos ondas en la superficie del agua.



- Puntos de interferencia construtiva (amplitude máxima):

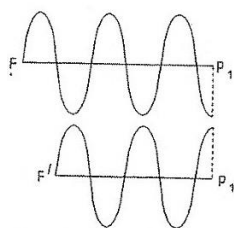
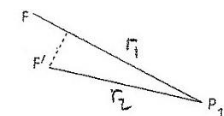


Cando as fronte de onda se encontran nun punto da mediatriz do segmento FF' , ao teren percorrido a mesma distancia ($r_1 - r_2 = 0$) vanse atopar no mesmo estado de perturbación (elongación) polo que, segundo o Principio de Superposición, a elongación resultante ha de ser a suma das individuais: $A_r = 2A$

En xeral, se $r_1 - r_2 = n \cdot \lambda$, $n \in \mathbb{Z} \rightarrow A_r = 2A$

A interferencia é construtiva e os puntos nos que isto ocorre chámanse *ventres*.

- Puntos de interferencia destrutiva (amplitude mínima):



Se consideramos agora un punto P_1 , tal que: $r_1 - r_2 = \frac{\lambda}{2}$, os estados de perturbación de cada onda nese 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 destrutiva, e os puntos nos que isto ocorre son *nodos*.

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

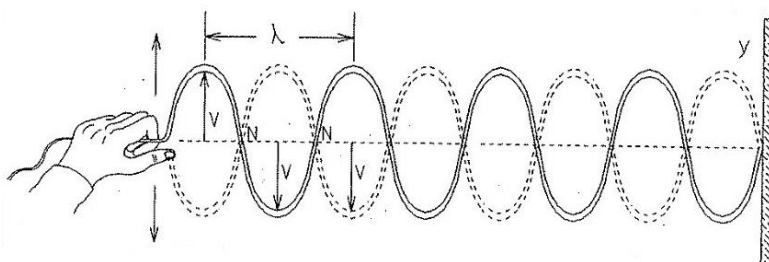
- Ondas estacionarias:

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

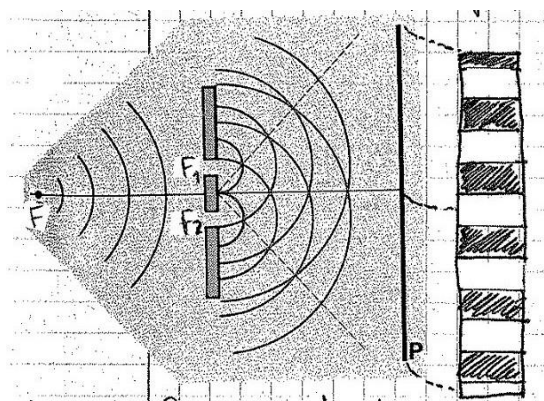
Hai puntos da rexión de interferencia que sempre fican en repouso; o resto dos puntos presentan un M.H.S. A situación da perturbación resultante non varía no tempo (é "estacionaria"), a diferenza do resto de ondas que son "viaxeiras".

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

Exemplo: instrumentos musicais.



- Experiencia de Young (1801):

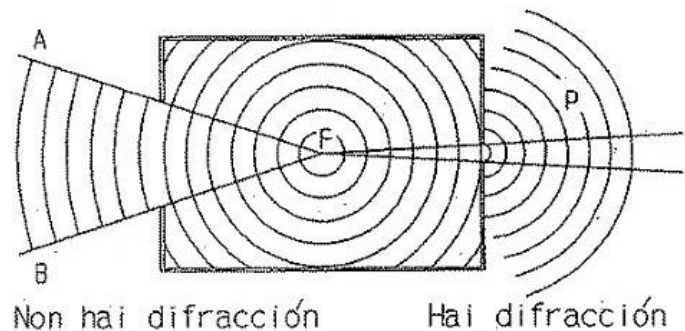


O dispositivo da figura constitúe un *interferómetro*, aparellos que nos permiten obter ondas coherentes no laboratorio. Con este dispositivo, Young confirmou o carácter ondulatorio da luz, permitindo ao mesmo tempo medir a súa lonxitude de onda. Cando a fronte de onda xerada en F acada os buracos F_1 e F_2 , xéranse (Principio de 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 visíbel.

6.5.2.- Difracción

- A difracción é un dos fenómenos máis característicos das ondas. Obsérvase cando a onda é distorsionada por obstáculos de dimensións comparábeis á lonxitude de onda.
- Un obstáculo pode ser unha pantalla cunha pequena fenda ou abertura, que só permite o paso dunha pequena porción da fronte de onda incidente, ou pode ser un pequeno obxecto que impide o paso dunha pequena porción da fronte de onda.
- En óptica o fenómeno é coñecido dende hai varios séculos (Grimaldi, século XVII), sendo de grande importancia no debate sobre o carácter ondulatorio ou corpuscular da luz.

Acotío os obxectos interpostos á luz teñen dimensións superiores ás lonxitudes de onda do rango visíbel ($\sim 5 \cdot 10^{-7}m$) e xa que logo non observamos o fenómeno da difracción.



- No exemplo da figura, fóra do cono *AFB* non hai luz: non existe difracción, pois a abertura é demasiado grande. Sen embargo, o buraco á dereita ten dimensións semellantes (ou inferiores) á lonxitude de onda da luz que se propaga dende *F*. Segundo o Principio de Huygens, os puntos do buraco convértese en novos focos de ondas, espallándose a luz fóra do cono, como no punto *P*: existe difracción.
- Cando a lonxitude de onda é da mesma orde de magnitude que o obstáculo, se situamos outra pantalla como na experiencia de Young, aparecerán unhas franxas iluminadas e outras escuras. E medida da distancia entre estas pódese utilizar para determinar o tamaño dos obstáculos, coñecida a lonxitude de onda incidente.

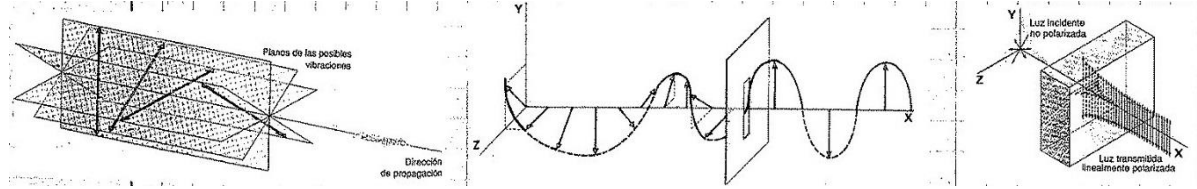
6.5.3.- Polarización

- 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, dise que a onda está *linealmente polarizada*.
- Na luz e nas ondas electromagnéticas, as vibracións supoñen a variación dos valores dos campos eléctrico e magnético asociados, que son sempre perpendiculares á dirección de propagación. A onda electromagnética 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 azar.

- 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 polaroide; estas absorben toda a luz que non oscila nunha determinada dirección. A luz emerxe do polaroide está linealmente polarizada.

Exemplo: gafas de sol cun recubrimento 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.

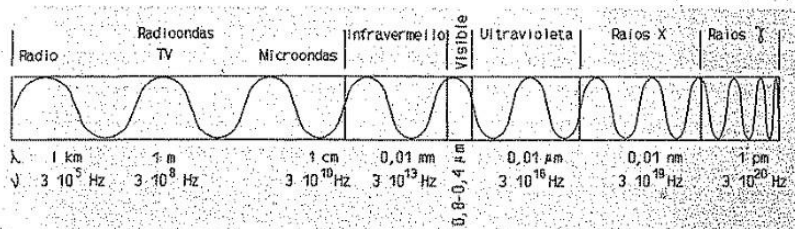
Na zona intermedia do espectro está a luz visible, que se caracteriza porque cada frecuencia produce unha cor diferente. A lonxitude de onda correspondente está comprendida entre os 400 nm (para a cor violeta) e os 700 nm (para o vermello escuro).

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 Hz - 10^{23} Hz) constituindo o chamado **espectro electromagnético**. Os diversos intervalos de frecuencias teñen nomes específicos, que son:



Radioondas ($3 \cdot 10^5$ Hz - $3 \cdot 10^8$ Hz): Son as ondas electromagnéticas de menor frecuencia. Prodúcese nun circuito oscilante LC. Empréganse en radiodifusión¹⁰ e telecomunicacións.

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

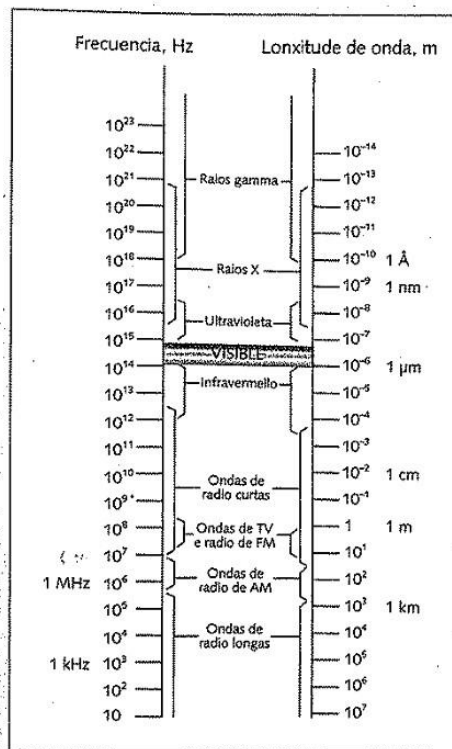
Raios infravermellos ($3 \cdot 10^{12}$ Hz - $3 \cdot 10^{14}$ Hz): Son producidas por vibracións atómicas. Empréganse na industria e en medicina.

Luz visible ($3,8 \cdot 10^{14}$ Hz - vermello - ata $7,7 \cdot 10^{14}$ 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 ($8 \cdot 10^{14}$ Hz - 10^{17} 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} Hz - 10^{21} 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 danifios 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 reunifica-las 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 canaliza-la 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

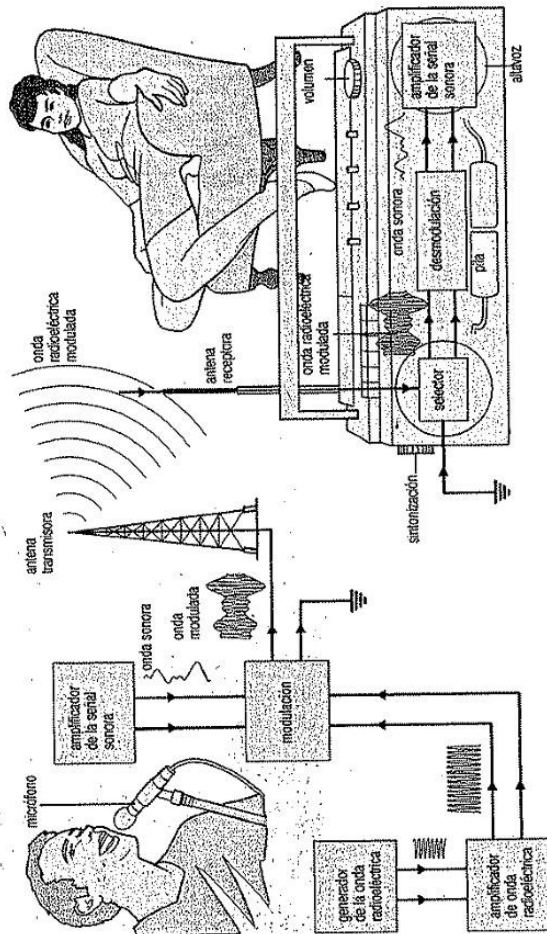
En el aire

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 oírlos 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, sincronizado 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.

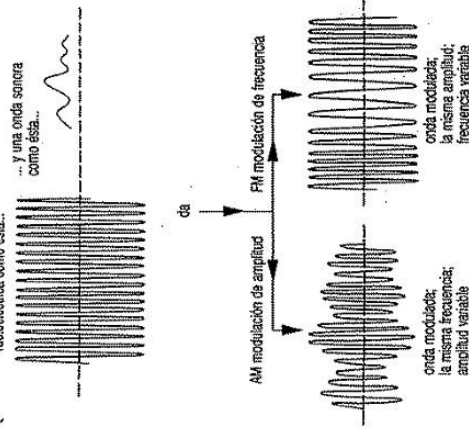
Naturalmente, ¡siempre hay una dificultad! Las transmisiones de VHF sólo pueden recibirse claramente en distancias cortas, quizá 40 km más o menos, debido a la curvatura de la superficie de la tierra. Estas transmisiones tienen un «alcance visual» porque, al igual que la luz, se desplazan solamente en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

utilizar una onda radioeléctrica como ésta...



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.

RADIOFRECUENCIAS

RADIO 1 (FM): 568 MHz/512.8 m. RADIO 5 (FM): 577 MHz/512.6 m. RADIO MAYOR (FM): 580 MHz/512.4 m. RADIO INTERCONTINENTAL (FM): 583 MHz/512.2 m. RADIO ESPAÑA (FM): 585 MHz/511.5 m. RADIO POPULAR (FM): 588 MHz/510.6 m.

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?

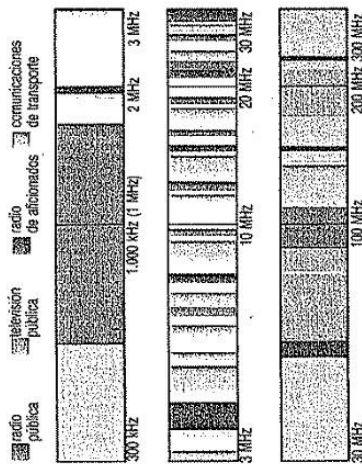
De ELF a UHF

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			enlaces con submarinos
3-30 kHz	muy baja VLF	100.000-10.000		> 1.500	flota de largo alcance, para uso del ejército
30-300 kHz	baja LF	10.000-1.000	onda larga	> 1.500	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

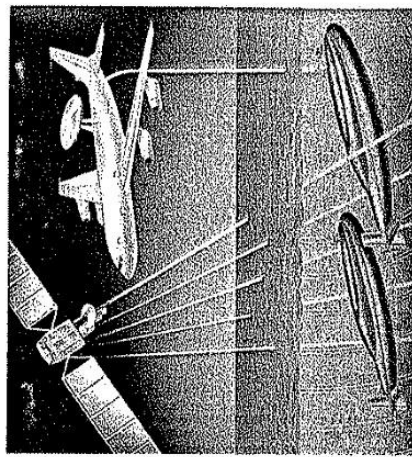
Una división del espectro de las ondas radioeléctricas.

¿Qué onda?

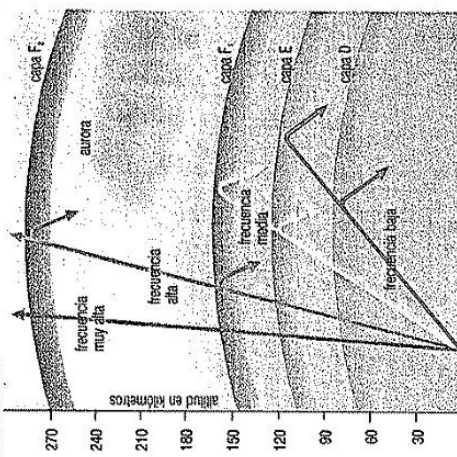
Si todas las ondas radioeléctricas pueden modularse para transmitir una señal sonora, ¿por qué usar ondas radioeléctricas de frecuencias tan distintas? La razón es que tienen propiedades diferentes.

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.

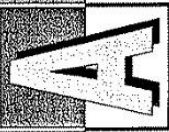


Detalles de las capas de la ionosfera que indican dónde se reflejan diferentes ondas radioeléctricas.

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.

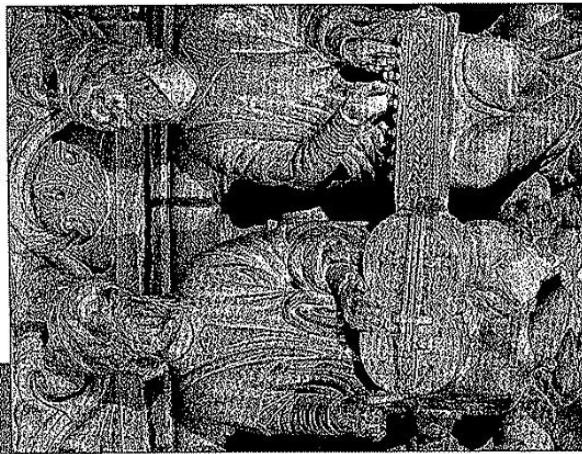
2 La banda de frecuencias o anchura de la banda necesaria para transmitir la voz es de unos 4 kHz. Explica por qué la transmisión de música de alta calidad necesita más (18 kHz) y la televisión muchísimos más (8 MHz).



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 compoñense 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.

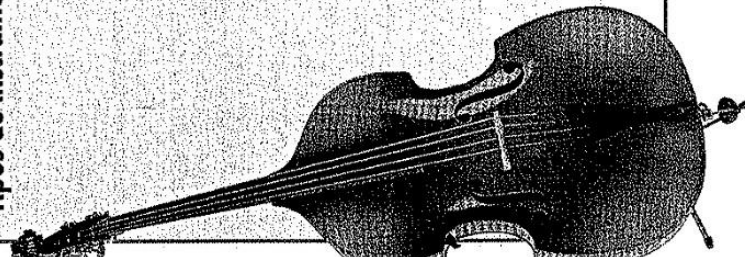


Músicos. Detalle do Pórtico da Gloria da catedral de Santiago de Compostela. Recentemente fabricáronse os instrumentos esculpidos neste pórtico do século XII, co obxectivo de recupera-los sons daquela época.

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 transmitense 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 conduto curto e estreito que termina nunha abertura da caixa que fai de resoador. Cando se sopra máis ou menos fortemente a través do conduto, prodúcense remuíños de aire que fan vibrar as moléculas próximas. Ás veces o conduto 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

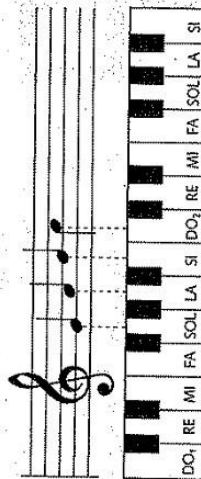
Unha das características fundamentais do son emitido por un instrumento musical é o seu **ton**. Esta característica fai referencia á frecuencia da onda.

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		

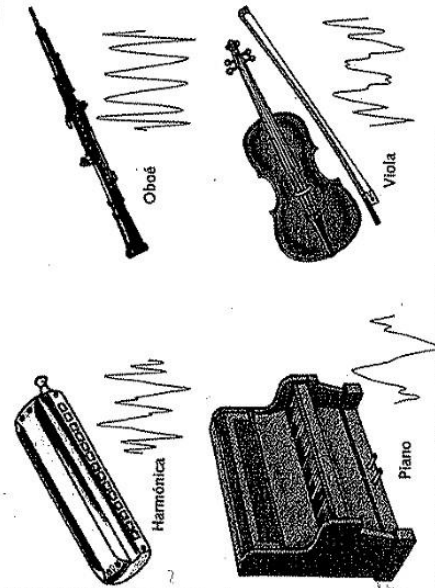
onde os intervalos están referidos á nota DO inicial. O intervalo entre dúas notas do mesmo nome, por exemplo dúas LA, é sempre igual a 2 e chámase **oitava**. Para distinguir estas notas pónselles un subíndice, por exemplo:

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



Gráfica das ondas sonoras instrumentais

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



Timbre e harmónicos

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

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 timbre 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 chamán **harmónicos**. Segundo sexa a riqueza e intensidade destes harmónicos, o oído humano ten unha sensación ou outra, o que lle permite distinguir-la 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, tímbal, 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?

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, transmitense ó cerebro como impulsos eléctricos e alí son procesados e analizados.

Limitacións do oído

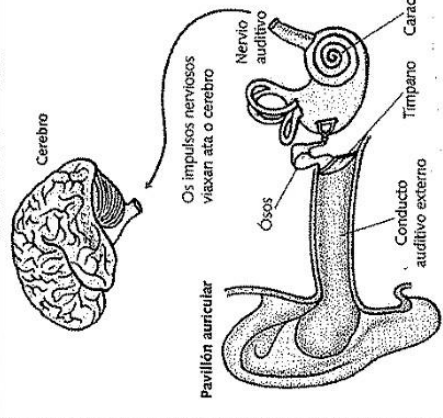


Covas de Nerja, Málaga. No interior das covas prodúcese reverberacións sorprendentes.

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 ril sen necesidade de intervención cirúrxica. Algúns animais, coma o morcego e o can, si perciben ben os ultrasons.



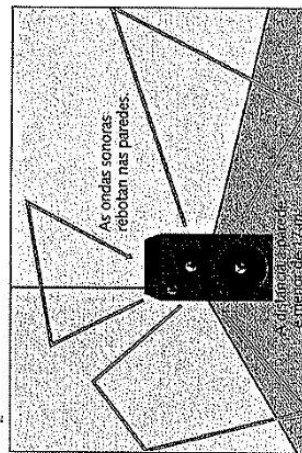
Anatomía do oído e transmisión da información sonora ata o cerebro.

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 oírense 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.



As ondas sonoras rebotan nas paredes.

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 correspóndense 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

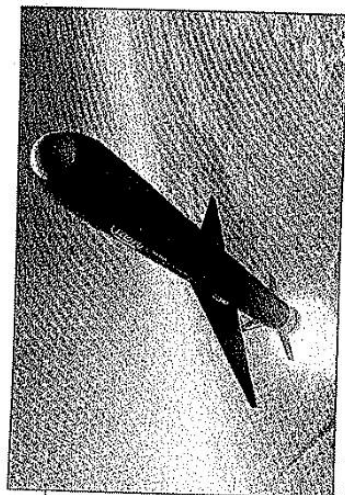
Indica cales son as partes do oído que captan as vibracións do aire, cales as transmiten e cales as procesan para convertelas en impulsos nerviosos.

¿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.

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

Energía e audición

¿Que é a intensidade do son? ¿E 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.

