

O SON

- 1. Ondas sonoras e son**
- 2. Velocidade de propagación das ondas sonoras**
 - 2.1. Velocidade nos sólidos**
 - 2.2. Velocidade nos líquidos**
 - 2.3. Velocidade nos gases**
- 3. Calidades do son**
 - 3.1. A sonoridade**
 - 3.2. O ton**
 - 3.3. O timbre**
- 4. Percepción do son: audición**
- 5. O efecto Doppler**
 - 5.1. Fonte sonora en movemento e observador en repouso**
 - 5.2. Fonte sonora en repouso e observador en movemento**
 - 5.3. Fonte sonora e observador en movemento**
- 6. Fenómenos asociados ás ondas sonoras**
 - 6.1. A reflexión das ondas sonoras**
 - 6.2. A refracción das ondas sonoras**
 - 6.3. A difracción das ondas sonoras**
- 7. Resonancia e instrumentos musicais**
 - 7.1. Ondas estacionarias nunha corda fixa nos seus dous extremos**
 - 7.2. Ondas estacionarias en tubos: instrumentos de vento**
 - a) Ondas sonoras estacionarias en un tubo aberto por un dos seus extremos
 - b) Ondas sonoras estacionarias nun tubo aberto por ambos extremos
- 8. Contaminación acústica, fontes e efectos. Medidas de actuación**
- 9. Aplicacións das ondas sonoras ao desenvolvemento tecnolóxico e á mellora das condicións de vida**

1. Ondas sonoras e son

As ondas sonoras son ondas mecánicas lonxitudinais de carácter tridimensional.

- Mecánicas, porque necesitan dun medio material elástico para a súa propagación e non se propagan no baleiro nin en medios ríxidos cuxas partículas non poden vibrar.
- Lonxitudinais, xa que as partículas do medio oscilan na mesma dirección na que se propaga a onda.
- Tridimensionais, xa que as ondas sonoras se propagan nas tres direccións do espazo.

Por tanto:

Unha onda sonora é a propagación dunha perturbación (causada cando se fan vibrar as partículas dun medio elástico de forma que se produzan variacións da súa densidade ou da súa presión) con transporte de enerxía pero non de materia.

O proceso que engloba a produción, transmisión e recepción das ondas sonoras polo noso oído é o que se denomina son. Dito proceso require, pois:

- Unha fonte produtora de ondas sonoras. Son fontes sonoras, por exemplo, os altosfalantes, os instrumentos musicais ou a voz humana.
- Un medio transmisor polo que se propague a onda sonora. Debe presentar propiedades elásticas (é dicir, dar lugar á aparición de forzas restauradoras cando unha porción do mesmo é apartada da súa posición de equilibrio). No noso entorno cotidiano é o aire.
- Un receptor ou detector de sons que transforme a enerxía transmitida polas vibracións mecánicas producidas polas ondas sonoras en outras formas de enerxía que permitan o análise e a interpretación das frecuencias e intensidades. O oído humano actúa como receptor de moitos sons que interpreta o noso cerebro. Noutros casos úsanse detectores electrónicos que transforman a onda sonora nun sinal eléctrico que se pode visualizar.

2. Velocidade de propagación das ondas sonoras

As ondas sonoras son ondas mecánicas, e como tales, para propagarse nun medio, este debe ter dúas propiedades: inercia e elasticidade. En xeral, a velocidade de propagación dunha onda mecánica ven dada por:

$$v = \sqrt{\frac{\text{propiedade elástica}}{\text{propiedade inercial}}}$$

A velocidade das ondas sonoras é independente da fonte sonora, pero depende da natureza do medio de propagación. Canto maior sexa a rixidez do medio, maiores serán tamén as forzas restauradoras que fan que as partículas recuperen as súas posicións orixinais. Dese modo, en xeral, as ondas sonoras propagáranse con maior velocidade nos medios máis ríxidos, polo que a velocidade de propagación é máis elevada nos sólidos ca nos líquidos e gases.

2.1. Velocidade nos sólidos

A velocidade de propagación dunha onda sonora nun sólido (cando se trata dunha barra longa e delgada) ven dada por:

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{d}}$$

- E = módulo de Young. É unha constante que mide a elasticidade e rixidez do material.
(Unidade no SI : $\frac{N}{m^2} = Pa$)
- d = densidade do sólido

Exemplo

Calcula a velocidade con que se propaga o son nunha barra de ferro. (Datos: módulo de Young para o aceiro $9 \cdot 10^{10} \frac{N}{m^2}$; densidade do ferro $7,9 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$).

Solución: a velocidade das ondas sonoras nos sólidos depende do módulo de Young e da densidade do material de acordo coa igualdade:

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{d}}$$

que para o caso do ferro toma o valor $v_s = \sqrt{\frac{9,0 \cdot 10^{10} \frac{N}{m^2}}{7,9 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}}} = 3,4 \cdot 10^3 \frac{m}{s}$

2.2. Velocidade nos líquidos.

A velocidade de propagación dunha onda sonora nun líquido ven dada pola expresión:

$$v_l = \sqrt{\frac{Q}{d}}$$

- Q = módulo de compresibilidade do líquido. (Unidade no SI : $\frac{N}{m^2} = Pa$)
- d = densidade do líquido

Exemplo

Calcula o valor da velocidade das ondas sonoras na auga sabendo que a súa densidade é $1,0 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$ e o seu módulo de compresibilidade vale $2,16 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$. Cal é a lonxitude de onda das ondas sonoras na auga se a súa frecuencia é 1000 Hz?

Solución: A velocidade de propagación das ondas sonoras na auga é:

$$v_l = \sqrt{\frac{Q}{d}}; v_l = \sqrt{\frac{2,16 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}}{1,0 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}}} = 1470 \frac{m}{s}$$

A lonxitude de onda será:

$$v = \lambda f; \lambda = \frac{v}{f}; \lambda = \frac{1470 \frac{m}{s}}{1000 \text{ Hz}} = 1,47 \text{ m}$$

2.3. Velocidade nos gases

Nos gases resulta ilustrativo relacionar a velocidade de propagación con factores como a temperatura xa que ó aumentar esta, as moléculas dos gases chocan con maior frecuencia e transmiten máis rapidamente a perturbación.

Tendo en conta que a propagación do son nun medio gasoso ten lugar a través de compresións e enrarecementos, pode considerarse, dada a súa rapidez, un proceso adiabático no que non se transfere calor ao medio. No caso dos gases ideais, podemos substituír o módulo de compresibilidade pola seguinte expresión:

$$Q = \gamma p_0$$

onde p_0 é a presión do gas antes de sufrir calquera perturbación, e γ , o coeficiente adiabático, (que para o aire ten un valor de 1,4) que relaciona os calores específicos ca presión e volume constante da seguinte forma:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

co que a expresión para a velocidade de propagación nos gases queda

$$v_g = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{d}}$$

Posto que, para 1 mol de gas, $p_0 = \frac{RT}{V}$, e como, ademais $d = \frac{M}{V}$ onde M é a masa molar, podemos substituír na expresión anterior co que obtemos:

$$v_g = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

R = constante universal dos gases ideais ($8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$)

T = temperatura absoluta

Exemplo

Calcula a velocidade á que se propaga o son no aire á temperatura de 30 °C ($M = 28,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$).

Solución: supoñamos que o aire se comporta como un gas ideal. A temperatura kelvin correspondente a 30 °C é:

$$T = 30 + 273 = 303 \text{ K}$$

A velocidade do son obterémola aplicando a expresión:

$$v_g = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8,314 \frac{J}{mol K} \cdot 303 K}{28,8 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}}} = 350 \frac{m}{s}$$

3. Calidades do son

A resposta auditiva ten lugar no oído, que é sensible a lixeiros cambios de presión producidos pola propagación da onda sonora. A resposta do oído varía dunha persona a outra.

Os sons caracterízanse e distínguense uns dos outros por unha serie de calidades subxectivas: a sonoridade, o ton e o timbre, que deberán estar relacionadas con propiedades físicas obxectivas das ondas.

Esta relación indícase na táboa seguinte:

Efecto sensorial	Propiedade física da onda
Sonoridade	Intensidade da onda
Ton	Frecuencia da onda
Timbre	Forma da onda

3.1. A sonoridade

A sonoridade, tamén coñecida como sensación sonora, intensidade subxectiva ou nivel sonoro, é unha sensación asociada á percepción do son, podendo ser débil e forte.

Por experiencia sabemos que canto maior sexa a distancia do foco emisor, r , menos se oí; e que o son dunha corda de guitarra é tanto máis forte canto maior é a separación ou amplitude, A , da mesma. Isto indícanos que a sonoridade diminúe coa distancia e aumenta coa amplitude, magnitudes estas que se relacionan coa intensidade I da onda:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}, \frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1^2}{A_2^2}$$

Para a frecuencia de 1000 Hz, o umbral de audición ou intensidade mínima audible, I_0 , no aire, para o oído humano, é de $10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ (son débil) e o nivel de sensación desagradable para a maioría das persoas (umbral de dolor) aparece para unha intensidade, I , de 1 W m^{-2} (son forte). Os sons de intensidade superior producen sensacións dolorosas.

Na audición non existe unha proporcionalidade directa entre a causa que produce a excitación, é dicir, a intensidade da onda sonora, I , e a sensación fisiolóxica que percibimos, β . Segundo a lei de Weber-Fechner, esta relación é:

$$\beta = \log \frac{I}{I_0}, \text{ sendo } I_0 \text{ a intensidade inicial mínima: } I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}.$$

A unidade de sensación sonora é o bel ou belio, B, aínda que en acústica se utiliza o decibel ou decibelio, dB, adoptando, neste caso, a lei de Weber-Fechner a forma de:

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

Segundo o que acabamos de dicir, ao límite inicial de intensidade correspóndelle unha sonoridade de 0 dB: $\beta = 10 \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 0 \text{ dB}$ e ao límite máximo 120 dB: $\beta = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 \text{ dB}$. Os sons de menos de 10 dB son dificilmente audíbles, mentres que os superiores a 100 dB producen molestias; a partir de 140 dB experimentamos dolores agudos.

Exemplo

Un altafalante ten unha potencia de 200 W. Calcula a intensidade de onda para distancias de 2 m, 10 m e 30 m e os correspondentes niveis sonoros.

Dato: intensidade inicial mínima $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$.

Solución: a intensidade dunha onda sonora obtense substituíndo na expresión:

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

$$I_2 = \frac{P}{S_2} = \frac{200}{4\pi 2^2} = 3,98 \text{ Wm}^{-2}$$

$$I_{10} = \frac{P}{S_{10}} = \frac{200}{4\pi 10^2} = 0,16 \text{ Wm}^{-2}$$

$$I_{30} = \frac{P}{S_{30}} = \frac{200}{4\pi 30^2} = 0,02 \text{ Wm}^{-2}$$

Vemos que a intensidade diminúe coa distancia, pero non de forma lineal.

Para o cálculo do nivel sonoro utilizamos a lei de Weber-Fechner: $\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$.

$$\beta_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{3,98}{10^{-12}} = 126 \text{ dB}$$

$$\beta_{10} = 10 \log \frac{I_{10}}{I_0} = 10 \log \frac{0,16}{10^{-12}} = 112 \text{ dB}$$

$$\beta_{30} = 10 \log \frac{I_{30}}{I_0} = 10 \log \frac{0,02}{10^{-12}} = 103 \text{ dB}$$

Exemplo

O nivel de intensidade sonora da serea dun barco é de 60 dB a 20 m de distancia. Supoñendo que a serea é un foco emisor puntual, calcula:

- O nivel de intensidade sonora a 2 km de distancia.
- A distancia á que a serea deixa de ser audible.

Dato: intensidade umbral de audición, $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$.

Solución:

a) Necesitamos coñecer a intensidade da onda sonora en cada caso:

$$\beta_1 = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \rightarrow 60 = 10 \cdot \log \frac{I_{20}}{10^{-12}} \rightarrow \log \frac{I_{20}}{10^{-12}} = \frac{60}{10} = 6 \rightarrow \frac{I_{20}}{10^{-12}} = 10^6 \rightarrow$$

$$\rightarrow I_{20} = 10^6 \cdot 10^{-12} = 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Tendo en conta que o son é unha onda tridimensional, a relación entre a intensidade e a distancia ao foco é:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \rightarrow I_{2km} = \frac{I_{20m} \cdot r_{20m}^2}{r_{2km}^2} = \frac{10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 20^2 \text{ m}^2}{(2 \cdot 10^3)^2 \text{ m}^2} = 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

O nivel de intensidade sonora a 2 km de distancia será:

$$\beta_2 = 10 \cdot \log \frac{I_{2km}}{I_0} \rightarrow \beta_2 = 10 \cdot \log \frac{10^{-10}}{10^{-12}} = 20 \text{ dB (audible)}$$

b) A serea deixa de ser audible cando a intensidade da onda sonora coincide co umbral de audición:

$$\frac{I_{20m}}{I_0} = \frac{r_0^2}{r_{20m}^2} \rightarrow r_0 = \sqrt{\frac{I_{20m} \cdot r_{20m}^2}{I_0}} = \sqrt{\frac{10^{-6} \cdot 20^2}{10^{-12}}} = 2 \cdot 10^4 = 20 \text{ km}$$

3.2. O ton

Permite distinguir os son graves dos agudos. Depende da frecuencia do son, e por tanto, das compresións e enrarecementos que o oído percibe por segundo.

- Os sons graves ou tons baixos corresponden as ondas de baixa frecuencia (poucas vibracións por segundo).
- Os sons agudos ou tons altos corresponden as ondas de maior frecuencia (gran número de vibracións por segundo).

Resulta que a sensibilidade do oído humano a un son depende, ademais da súa intensidade, da frecuencia da onda. Para cada frecuencia é necesaria unha intensidade mínima, I_{\min} , por debaixo da cal non se produce sensación sonora. Igualmente, para cada frecuencia hai unha intensidade máxima, I_{\max} , por encima da cal o oído ten unha sensación dolorosa. Esta influencia da frecuencia na sensación sonora dun son pode verse na **figura 1**. Nel aparecen curvas de igual sonoridade para distintas frecuencias.

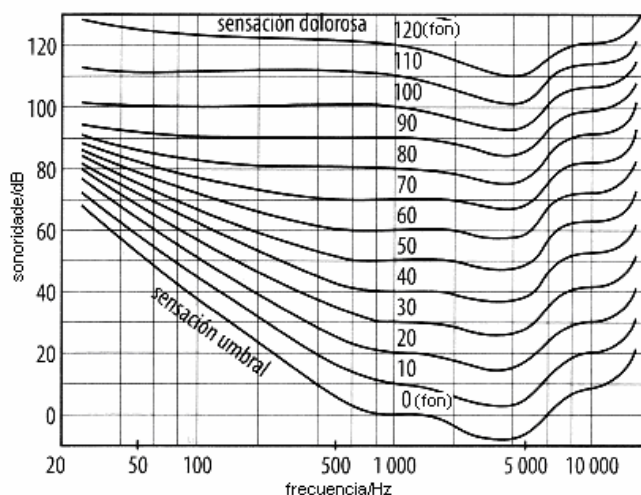


Figura 1

Para un son forte, o intervalo de frecuencias está comprendido entre 20 Hz e 20000 Hz, mentres que se o son é débil, este intervalo redúcese considerablemente. Por debaixo dos 20 Hz están os infrasóns e por encima dos 20000 Hz temos os ultrasóns.

A dependencia da sensación sonora coa frecuencia da onda fai que o decibelio perda importancia como unidade de sensación sonora. A sensación sonora para un valor de frecuencia exprésase na unidade de fonio, tamén chamada fon. O valor expresado en fonios, para a sensación sonora dun son de calquera frecuencia, coincide co valor expresado en decibelios doutro son de 1000 Hz de frecuencia, que produce no noso oído a mesma sensación sonora.

3.3. O timbre

Esta calidade permítenos distinguir dous sons de igual sonoridade e ton emitidos por dous focos distintos. O timbre depende da forma da onda sonora.

Normalmente, os sons non son puros, é dicir, as ondas sonoras correspondentes non son perfectamente sinusoidales, senón que son o resultado de varios movementos periódicos superpostos á onda fundamental e denomínanse harmónicos ou sobretóns. Así, cada son procedente dun instrumento musical, dunha persoa ou dun foco sonoro calquera é unha onda composta e ten unhas características específicas que o distinguen dos demais.

O timbre dun son depende do número, da intensidade e da frecuencia dos distintos armónicos que acompañan ao son fundamental.

4. Percepción do son: audición

O noso oído está capacitado para percibir as ondas sonoras. Cando unha onda sonora chega ao oído, éste convirte os cambios de presión da onda en impulsos nerviosos, que son posteriormente procesados e analizados polo cerebro. Aínda que este proceso é complexo, discutiremos algunhas características da audición. O oído divídese en tres partes: oído externo, medio e interno.

- Oído externo. Nel, as ondas sonoras son recollidas polo pabellón do oído, pasan polo conduto auditivo e chegan ao tímpano. As ondas fan vibrar o tímpano coa mesma frecuencia que a fonte emisora.
- Oído medio. Consta de tres ósos pequenos chamados martelo, yunque e estribo. Estes pequenos ósos transmiten as vibracións do tímpano ata unha ventana ovalada, de superficie moito menor que o tímpano, onde as variacións de presión das ondas multiplícanse aproximadamente por 50.

O Oído medio mantense á mesma presión ca o exterior, xa que está comunicado coa gorxa pola chamada trompa de Eustaquio.

- Oído interno. Contén un líquido acuoso incompresible que transmite as vibracións que chegan á ventana oval. Estas son recollidas por unha membrana flexible, chamada membrana basilar, situada ao longo do caracol e que o divide en dúas seccións. Sobre ela distribúense as fibras de Corti, que son filamentos terminais do nervio auditivo, dos que hai uns 30000 en cada oído.

Os cambios químicos producidos nas células destas fibras dan lugar a diferencias de potencial produtoras de correntes que, a través dos nervios transmisores, chegan ao cerebro, onde se covirten en sensacións sonoras.

5. O efecto Doppler

Seguramente notarías algunha vez cómo cambia o son do claxon dun coche que se achega, pasa ao noso lado e finalmente se alonxa; do mesmo modo, o pitido dun tren que se aproxima a nós é máis agudo, mentras que se fai máis grave cando se alonxa. O mesmo ocorre se ámbolos dous están parados e é o observador o que se move. Pois ben, todos estes fenómenos están relacionados co efecto Doppler, chamado así na honra do seu descubridor, o físico austríaco Christian Doppler no ano 1842.

Coñécese coma **efecto Doppler** o fenómeno debido ao movemento relativo da fonte sonora e o observador polo que cambia a frecuencia que se percibe dun son.

Para calcular a variación de frecuencia que ten lugar no efecto Doppler consideramos os seguintes casos

5.1. Fonte sonora en movemento e observador en repouso

Imaxinemos unha fonte sonora (F) que se despraza cara a dereita. Se o cabo de un tempo t representamos a situación dos distintos frentes de onda, obteremos unha gráfica como a que se mostra na **figura 2**.

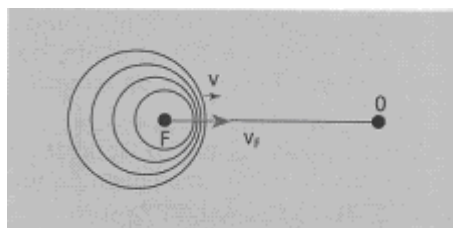


Figura 2

Nela apréciase como os frentes de onda non son circunferencias concéntricas. Polo contrario, a separación entre as ondas é menor no lado cara o que se move a fonte sonora e maior no oposto. Isto tradúcese en que, para un observador que se atopase en repouso á dereita e que vira achegarse a fonte, a lonxitude de onda efectiva sería menor e, en consecuencia, a frecuencia maior que a que lle correspondería ao son emitido pola fonte se esta estivese en repouso. É dicir, percibiría un ton máis agudo.

Se a fonte se move con unha velocidade v_F , e v é a velocidade do son, a velocidade aparente de propagación das ondas para ese observador será $v - v_F$ e, por tanto, a lonxitude de onda que medirá aquel será menor; en lugar de ser $\lambda = vT$, como correspondería a unha situación en repouso, teremos:

$$\lambda' = (v - v_F)T = \frac{v - v_F}{f}$$

Pola súa parte, a frecuencia que percibirá o observador cara o que se **achega a fonte** será:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f \left(\frac{v}{v - v_F} \right) \quad [1]$$

Así pois, $f' > f$, como previramos.

Polo contrario, para un observador que se atopase en repouso á esquerda e que vira a fonte alonxándose, a lonxitude de onda sería maior e a frecuencia menor, polo que percibiría un ton máis grave.

Así pois, a lonxitude de onda é:

$$\lambda' = (v + v_F)T = \frac{v + v_F}{f}$$

e a frecuencia que percibirá o observador a medida que a fonte se alonxa é:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f \left(\frac{v}{v + v_F} \right) \quad [2]$$

onde $f' < f$, o que correspondería a un ton máis grave ca o orixinal.

5.2. Fonte sonora en repouso e observador en movemento

Como podes ver na **figura 3**, a modificación que experimenta o ton neste caso non se debe á variación da lonxitude de onda, que sempre será a mesma, senón á distinta velocidade coa que lle chegan ao observador os frentes de onda según se achegue ou se alonxe da fonte sonora.

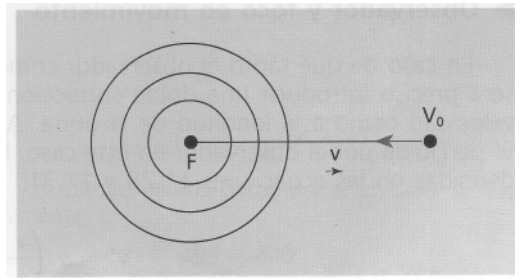


Figura 3

Se o observador se achega á fonte con velocidade v_0 , a velocidade coa que lle chegan os frentes de onda será maior ($v' = v + v_0$). Por tanto, a frecuencia que percibirá será:

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\frac{v}{f}}$$

É dicir:

$$f' = f \left(\frac{v + v_0}{v} \right) \quad [3]$$

Por tanto, $f' > f$, e o observador percibe un son máis agudo, como ocurría cando a fonte se achegaba a el.

Se o observador se alonxa, a velocidade á que lle chegan os frentes de onda será $v' = v - v_0$, polo que, dun modo análogo ao anterior, chegamos a que:

$$f' = f \left(\frac{v - v_0}{v} \right) \quad [4]$$

Polo tanto, $f' < f$, polo que o observador percibirá un son máis grave, ao igual que cando a fonte se alonxaba del.

5.3. Fonte sonora e observador en movemento

Combinado os casos anteriores, a fórmula xeral para o cálculo da frecuencia é a seguinte:

$$f' = \frac{v'}{\lambda'} = f \left(\frac{v \pm v_0}{v \pm v_F} \right) \quad [5]$$

onde

- f' = frecuencia percibida polo observador
- f = frecuencia emitida pola fonte
- v_0 = velocidade do observador
- v_F = velocidade da fonte

- v = velocidade do son

Exemplo

Unha serea emite un son a 500 Hz. Calcula a frecuencia que percibe un observador nos seguintes casos:

- a) O observador está en repouso e a serea aproxímase a el a 20 m/s.

Solución: se a serea, que se move cunha velocidade v_F , se achega ao observador, que está en repouso, a velocidade á que lle chegan as ondas a este é $v - v_F$ e, por tanto, a frecuencia que percibe vale:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f \left(\frac{v}{v - v_F} \right) = 500 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}} \right) = 531,25 \text{ Hz}$$

- b) O observador alónxase a 20 m/s da serea, que está en repouso.

Solución: se o observador, que se move cunha velocidade v_0 , se alonxa da serea, a velocidade á que lle chegan os frentes de onda é $v - v_0$, e a frecuencia que percibe vale:

$$f' = f \left(\frac{v - v_0}{v} \right) = 500 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \right) = 470,59 \text{ Hz}$$

- c) O observador e a serea aproxímanse un cara o outro a 20 m/s e 30 m/s, respectivamente.

Solución: a frecuencia que percibe o observador cando a serea e el se achegan á vez é:

$$f' = \frac{v'}{\lambda'} = f \left(\frac{v + v_0}{v - v_F} \right) = 500 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s} + 20 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}} \right) = 580,65 \text{ Hz}$$

6. Fenómenos asociados ás ondas sonoras

As ondas sonoras, como ondas que son, tamén presentan as propiedades xerais das outras ondas. Comentaremos tres delas: a reflexión, refracción e difracción.

6.1. A reflexión das ondas sonoras

A reflexión das ondas sonora da lugar a dous fenómenos interesantes: o eco e a reverberación.

- **Eco.** O ser humano é capaz de distinguir entre dous sons se chegan ó seu oído cunha diferenza de 0,1 s. Isto significa que, ao considerar como valor da velocidade do son o de 340 m/s, poderíamos distinguir entre dous sons simultáneos cuxas fontes emisoras se encontrasen entre si a unha distancia de 34 m. No caso de que a nosa propia voz se reflexase nunha superficie, percibiríamos dous sons diferentes (eco) cando a distancia

mínima á superficie reflectante fose de 17 m, de modo que o son (o incidente máis o reflexado) percorra en total os 34 m necesarios.

Exemplo

Calcula a profundidade dun precipicio se escoitamos o eco 3 segundos despois de berrar.

Solución: para calcular a profundidade do precipicio hai que ter en conta o percorrido de ida e de volta que realizan as ondas de son. Tomamos a velocidade do son como 340 m/s.

$$v = \frac{s_{total}}{t} \rightarrow s_{total} = v \cdot t = 340 \frac{m}{s} \cdot 3 s = 1020 m$$

$$s_{total} = 2 \cdot s_0 \rightarrow s_0 = \frac{1020 m}{2} = 510 m$$

- **Reverberación.** Cando o tempo que tarda en chegarnos o son reflexado é menor ca 0,1 s, non percibimos eco, pero si un peculiar efecto sonoro: como si o son reflexado se superpuxera ou se alongase.
É esa estraña sensación que se produce ao falar nunha habitación sen amoblar, onde as reflexións do son coas paredes non chegan a producir eco, senón o que coñecemos como reverberación.
Este fenómeno de reverberación determina as calidades acústicas ou sonoras dos locais, e en moitas ocasións é necesaria a existencia de certa reverberación coidadosamente calibrada para garantir a adecuada acústica, como sucede nos auditorios.

6.2. A refracción das ondas sonoras

O son refráctase cando pasa dun medio a outro no que se move a distinta velocidade; por exemplo, do aire á auga, ou viceversa.

A velocidade do son é moi sensible aos cambios de medio, como a temperatura ou a densidade, de aí que o son tamén sufra refracción cando atravesa unha certa altura de aire, porque poden ser importantes os cambios na temperatura e na presión (o medio non é homoxéneo), ou ao atravesar unha ampla campá de auga, como sucede coas ondas sonoras que se envían as profundidades mariñas.

6.3. A difracción das ondas sonoras

A onda sonora difractase cando se atopa un obstáculo ou unha pantalla cunha abertura de tamaño comparable á súa lonxitude de onda.

Cando un coche se achega a unha esquina e toca o claxon, podemos oílo porque a onda sonora se difracta. Pero non vemos a imaxe ata que o coche chega ao cruce. A razón está en que a lonxitude da onda luminosa é moi pequena (da orde de $10^{-7} m$), polo que non se aprecia a súa difracción, mentres que a abertura da rúa é dunha orde de magnitude similar á lonxitude da onda sonora, que si se difracta.

7. Resonancia e instrumentos musicais

O estudado na unidade anterior acerca das ondas estacionarias pode aplicarse o son e en concreto ós instrumentos musicais, tanto os de corda coma os de vento. As ondas sonoras que se xeran nos instrumentos de corda, así como as formadas nos tubos sonoros, son estacionarias.

7.1. Ondas estacionarias nunha corda fixa nos seus dous extremos

É o caso dos instrumentos musicais de corda. En efecto, un instrumento de corda consiste basicamente en varias cordas cos seus dous extremos fixos e unha caixa de resonancia onde se amplifican as ondas sonoras correspondentes aos armónicos ou frecuencias de vibración. A caixa dunha guitarra está deseñada de forma que a frecuencia das cordas se acople coa frecuencia do aire que vibra dentro da caixa e así aumente a intensidade do son. Este fenómeno coñécese co nome de resonancia.

Consideremos unha corda de lonxitude L fixa polos seus extremos. Ao apartala da súa posición de equilibrio e soltala, as forzas elásticas de recuperación fana vibrar. As ondas que se propagan en sentidos contrarios, debido ás reflexións nos extremos da corda, dan lugar a distintas ondas estacionarias.

Cada unha das ondas estacionarias compoñentes do movemento resultante que pode adoitar a corda na súa vibración ten unha frecuencia característica e denomínase modo normal de vibración.

Os dous extremos da corda, de abscisas 0 e L , deben ser nodos, xa que en estos puntos non hai vibración. Para determinar as lonxitudes de onda de cada un de estos modos normales de vibración, debemos ter en conta que en toda onda estacionaria a distancia entre nodos consecutivos vale $\frac{\lambda}{2}$. Polo tanto, a formación de esta require que a lonxitude da corda cumpla

$L = n \frac{\lambda}{2}$, de onde:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \lambda_1 = 2L; \lambda_2 = L; \lambda_3 = \frac{2L}{3} \dots$$

Esta expresión mostra que solo son posibles as ondas estacionarias cuxa λ é un submúltiplo do dobre da lonxitude da corda.

Cada modo normal leva asociada unha frecuencia que depende da velocidade de propagación das ondas na corda, $f = \frac{v}{\lambda}$:

$$f = n \frac{v}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad f_1 = \frac{v}{2L}; f_2 = \frac{v}{L}; f_3 = \frac{3v}{2L} \dots$$

A frecuencia menor denomínase frecuencia fundamental ou primer armónico; a seguinte, segundo armónico; e, así, sucesivamente constitúen unha serie armónica. Por tanto, como a velocidade á que se propagan as ondas pola corda depende da tensión da mesma, ó tensar ou destensar unha corda cambia o son que emite. Igualmente, diminuíndo a súa lonxitude, por exemplo presionando cun dedo nalgún dos seus puntos, facemos que aumente a frecuencia.

7.2. Ondas estacionarias en tubos: instrumentos de vento

Tamén poden establecerse ondas sonoras estacionarias no extremo aberto dun tubo que conteña auga no seu interior. O fundamento é moi similar ao das ondas estacionarias en cordas.

As vibracións dun diapasón de frecuencia f situado cerca do extremo aberto dun tubo producen ondas sonoras no seu interior que, ao reflexarse na superficie da auga, volve cara o diapasón. O son aumenta cando a columna de aire vibra coa mesma frecuencia que o diapasón. É dicir, cando diapasón e columna de aire están en resonancia. Isto ocorre se a onda reflexada na auga está en fase coa onda que sae do diapasón; entón ambas ondas se reforzan mutuamente. En tal caso prodúcese unha onda estacionaria.

a) Ondas sonoras estacionarias en un tubo aberto por un dos seus extremos

A maioría dos instrumentos de vento emiten sons por un mecanismo similar ao descrito na experiencia anterior. Imaxinemos un tubo con un extremo aberto, por onde entra ou soplamos aire, e outro pechado. No extremo cerrado formarase un nodo de desprazamento, mentres que no aberto haberá un ventre. Por tanto, ao igual que no caso anterior, estableceranse ondas estacionarias no interior do tubo cando:

$$L = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \text{ onde } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

As lonxitudes das ondas estacionarias que poden formarse son:

$$\lambda = \frac{4L}{2n + 1}$$

e as frecuencias ou armónicos permitidos estarán rexidos pola expresión:

$$f = (2n + 1) \frac{v}{4L}$$

expresión que indica que só aparecen os armónicos impares.

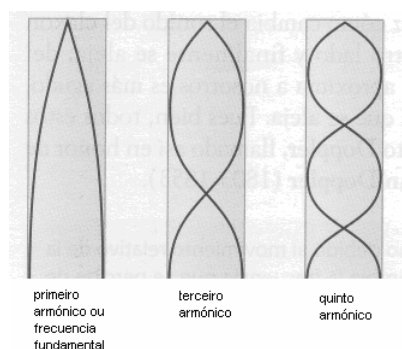


Figura 4

b) Ondas sonoras estacionarias nun tubo aberto por ambos extremos

Unha columna aberta tamén pode entrar en resonancia cunha fonte sonora. Neste caso, formaranse ventres de desprazamento en ambos extremos, polo que, como pode verse na figura 5, as condicións de establecemento de ondas estacionarias daranse sempre que:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Por tanto, as lonxitudes de onda estacionarias son:

$$\lambda = \frac{2L}{n}$$

e as frecuencias ou armónicos permitidos estarán rexidos polo expresión:

$$f = n \frac{v}{2L}$$

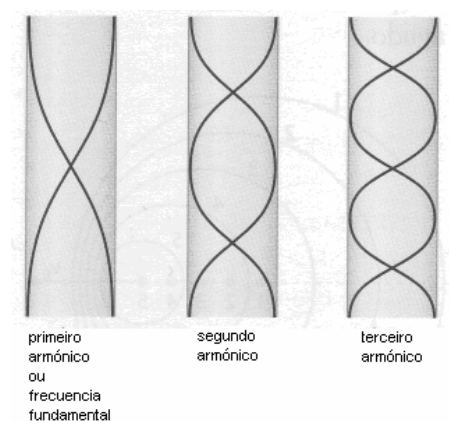


Figura 5

Observa a analogía existente entre este caso e o de una corda fixa por ambos extremos. É importante recalcar que en ambos casos, as vibracións compóñense dunha frecuencia fundamental xunto cos outros armónicos. É dicir, en realidade son ondas complexas producidas por superposición dos distintos armónicos.

Nos instrumentos de vento, as distintas notas obtéñense variando a lonxitude da columna de aire. Así, a distinta lonxitude dos tubos dun órgano determina as diferentes frecuencias fundamentais. En moitos outros casos, faise variar a lonxitude da columna por medio de buratos ou válvulas. Na frauta, a lonxitude da columna de aire modifícase ao tapar buratos, mentres que na trompeta, o saxofón e outros instrumentos de metal auméntase a lonxitude da columna accionando as válvulas.

Exemplo

Determina as tres frecuencias máis baixas dun tubo de 2,5 m que está aberto por ambos extremos se a velocidade do son é de 340 m/s.

Solución: as frecuencias máis baixas corresponden aos valores 1, 2 e 3 de n na seguinte expresión:

$$f = n \frac{v}{2L}$$

Así pois:

$$f_1 = \frac{v}{2L} = 68 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 2 \frac{v}{2L} = 136 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 3 \frac{v}{2L} = 204 \text{ Hz}$$

8. Contaminación acústica, fontes e efectos. Medidas de actuación

Tanto os organismos internacionais como os centros de investigación en materia de acústica recomendan que o son ambiental non supere os 65 dB. Os estudos que se levaron a cabo ata o momento demostran que exposicións máis ou menos prolongadas a niveis de intensidade superiores non soamente poden conlevar problemas auditivos (como a perda irreversible de capacidade auditiva), senón tamén outras complicacións, como irritabilidade, falta de concentración, estrés, fatiga, alteracións do ritmo respiratorio, problemas dixestivos, etcétera, coa conseguinte perda de calidade de vida.

Ruídos máis frecuentes	dB	Efectos do ruído
Reactor en pista Avión despegando	130 120	Umbral do dolor. Unha exposición breve a niveis de 140 ou 150 dB pode chegar a romper os tímpanos. A partir de 100 dB, o oído pode lesionarse gravemente.
Discoteca Pequeno taller mecánico	100 90	Ruido perigoso. Pérdida parcial da audición tras unha breve exposición. A conversación resulta imposible. Unha persoa exposta habitualmente durante o seu traballo a niveis de ruido de 90 dB pode experimentar unha perda permanente de audición do 25%.
Comedor escolar Fotocopiadora	80 80	Ruido molesto. Diminución da audición. Máis do 80% dos españois soporta sons superiores aos 80 dB, o que supón riscos psicolóxicos e fisiolóxicos: problemas auditivos, cardiovasculares, respiratorios e dixestivos.
Rúa animada Oficina ruidosa	70 60	Ruido molesto. Nas grandes cidades os pacientes con problemas de audición soen ter entre 30 e 45 anos; en cambio, ata fai pouco, estes problemas aparecían a partir dos 60 anos. As palabras enténdense mal e vese limitado o uso do teléfono
Conversación tranquila	50	Ruido lixeiro
Dormitorio tranquilo	30	Ruido moi lixeiro

O problema da contaminación acústica ten a súa máxima expresión nas zonas urbanas (en especial en aqueles puntos nos que a densidade do tráfico é elevada) e en áreas próximas a aeroportos. Os niveis de intensidade recomendados supéranse tamén amplamente tanto en locais de ocio (discotecas, pubs, etc.) como en numerosos centros laborais e industriais; a este respecto, a contaminación acústica converteuse nun dos problemas contemplados nas normativas de seguridade e hixiene no traballo.

A Organización Mundial da Saúde (OMS) catalogou a España coma un dos países máis ruidosos de Europa. A Unión Europea dirixiu repetidas recomendacións ao noso país para que sexa máis esixente na súa normativa e se rebaixen os niveis de son no tráfico de vehículos, a maquinaria e as instalacións industriais, os locais de ocio... De feito, existe unha normativa oficial para o control dos sons de alto nivel de intensidade; pero é moi grande a permisividade da nosa sociedade e non existe unha concienciación colectiva.

As medidas de actuación contra a contaminación acústica soen ser de dous tipos:

- **Pasivas.** Non actúan contra os focos emisores, senón que tratan de amortiguar a propagación do son e o seu impacto. Exemplos destas medidas serían a insonorización de locais e vivendas, os muros de apantallamento levantados en vías urbanas, as "barreiras verdes" (arbolado denso) ou as medidas de protección individual no traballo, como o emprego de cascos antirruído.
- **Activas.** Actúan contra os focos emisores de ruído. Nesta liña engólabanse o uso de silenciadores e filtros para reducir a emisión de ruidos nos motores, así como as investigacións para a optimización dos mesmo. Tamén pertencen a este tipo de medidas as tendentes a fomentar o transporte público ou a reducir ou prohibir o tráfico rodado nalgúns zonas dos cascos urbanos.

Non cabe dúbida de que resulta necesario aplicar ambos tipos de medidas nas zonas urbanas e industriais. Pero sería desexable que na loita contra a contaminación acústica se outorgara preferencia ás iniciativas de tipo activo.

9. Aplicacións das ondas sonoras ao desenvolvemento tecnolóxico e á mellora das condicións de vida

O maior campo de aplicación das ondas sonoras dase nos **ultrasóns**, debido a súa alta enerxía. Recordamos que a enerxía dunha onda é proporcional ao cadrado da súa frecuencia.

Pola súa pequena lonxitude de onda compórtanse de xeito semellante aos raios luminosos, de maneira que poden ser dirixidos en feixes moi converxentes. Isto permite a súa aplicación para enviar sinais. Entre as moitas aplicacións que teñen, podemos citar as seguintes:

1. Sondaxes, para medir a profundidade do mar. Esta aplicación motivou a investigación para obter ultrasóns. Un feixe de ultrasóns é dirixido cara abaixo desde un barco e reflíctese no fondo do mar. A profundidade calcúlase se se coñece a velocidade dos ultrasóns e o tempo transcorrido. Chámase **sonar** a esta técnica. O sonar ultrasónico úsase non soamente para determinar distancias ao fondo mariño ou a submarinos, senón tamén onde se atopa un banco de peixes e cara a onde se move ou onde hai un barco afundido, etc. O ultrasón fai posible a comunicación por radio debaixo da auga.

2. Limpeza ou aseo ultrasónico. Nos baños utilízase para limpar partes metálicas. As vibracións ultrasónicas serven para extraer fragmentos de materia estraña de lugares que pola contra resultarían inaccesibles. Os xoieiros vólense de baños ultrasónicos para limpar pezas de xoiaría.

3. Perforación ultrasónica. Para tradear materiais moi duros. Como o trade ultrasónico non xira, a punta do vibrador pode orientarse para facer buratos de calquera forma.

4. Soldadura ultrasónica. Os ultrasóns son particularmente útiles cando se solda aluminio. O ultrasón desprende a capa de óxido de aluminio acumulada sobre a superficie e entón xa non se necesitan fundentes.

5. Cirurxía ultrasónica. Os ultrasóns utilizáronse con éxito para desintegrar as pedras dos riles facilitando a súa extracción ou converténdooas en fina area para que o corpo as expulsara naturalmente. Con este fin utilízanse varias técnicas. Unha delas consiste en introducir un catéter pola uretra, ou tamén a través da pel, para atrapar o cálculo e seguidamente rompelo mediante o ultrasón.

6. Outras aplicacións do ultrasón en medicina. O sonar utilízase para visualizar tecidos internos e órganos como o fígado ou o bazo, os cales son case invisibles para os raios X.

Os ultrasóns serven, así mesmo, para "ver" o feto nas súas distintas etapas de desenvolvemento sen que ocorran os efectos perigosos que poden ocasionar os raios X, cun contido enerxético moitísimo maior.

Os diversos graos de reflexión das áreas exploradas recíbense cun monitor e almacénanse nunha computadora. Despois a computadora reconstrúe unha "ecografía" da rexión.

Outra das aplicacións máis actuais dos ultrasóns é a obtención de holografías acústicas, semellantes ás holografías ópticas, que permiten a visualización de obxectos en tres dimensións.

O método consiste na instalación de dous emisores de ultrasóns que se interferen logo de pasar un deles polo obxecto que se quere visualizar. Os fenómenos de interferencia entre o feixe do obxecto e o de referencia producen unha serie de diminutas ondas fixas que en conxunto constitúen o holograma.

As aplicacións da holografía acústica poden ser moi numerosas:

- En Medicina. Para obter imaxes tridimensionais de órganos e tecidos brandos.
- En Arqueoloxía. Permitiría o recoñecemento tridimensional dun xacemento antes de proceder á súa escavación.
- En Xeoloxía. Para sondaxes petrolíferas, prospeccións do subsolo, etc.
- No campo militar. Para detectar e obter a imaxe dun submarino, por exemplo.

Para rematar, os ultrasóns tamén se empregan para:

- Aumentar a velocidade de reacción en certas transformacións químicas.
- Depurar o aire, xa que producen a precipitación de aerosois.
- Destruír microorganismos (esterilización ultrasónica).