

Acústica de la veu i els sons musicals



Publicacions CRECIM
Col·lecció REVIR 2016



“Acústica de la veu i els sons musicals”, seqüència didàctica per a l’estudi del so. Creada per Marisa Hernández, Digna Couso i Roser Pintó. Maquetació i revisió: Maria Navarro i Maria Dalmases. Es distribueix sota una llicència Creative Commons Atribució-NoComercial-SenseDerivar 4.0 Internacional. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Citar com:

Hernández, M., Couso, D. I Pintó, R. (2016). *Acústica de la veu i els sons musicals. Seqüència didàctica per a l'estudi del so*. Barcelona: Publicacions CRECIM

El projecte REVIR és un projecte del CRECIM, amb el suport de l’Obra Social “La Caixa” i la Universitat Autònoma de Barcelona.

Indicacions per al professorat

Objectius didàctics de la seqüència

La seqüència pretén que l'alumnat de 2n de Batxillerat assoleixi una major comprensió del so mitjançant la seva caracterització (intensitat, to i timbre), la caracterització de les ones sonores i les seves magnituds associades (període, freqüència, amplitud i longitud d'ona), així com el reconeixement de la transferència d'energia sense transferència de matèria, els sons fonamentals i harmònics i les diferències entre so i soroll.

En la primera part s'analitza una simulació cinètic-molecular del desplaçament de les partícules quan es produeix un so, amb el programa Wave interference, per tal de definir els conceptes de període, freqüència, amplitud i longitud d'ona.

En la segona part, mitjançant el programa Audacity, els alumnes enregistraran i analitzaran diferents veus i notes d'instruments, per tal de poder definir les magnituds que els diferencien (intensitat, to i timbre). També, mitjançant la comparació entre so i soroll, posaran en evidència la característica que els diferencia. Tot i que en llenguatge col·loquial utilitzem la paraula soroll per definir sons desagradables o que estan a un volum molt alt, en el llenguatge físic un soroll es caracteritza perquè no té un patró repetit i, en canvi, un so sí.

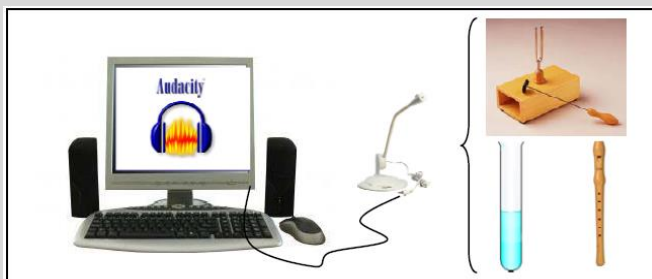
A continuació, amb diapasons de freqüències diferents es crearan sons complexos a partir de la superposició de sons purs i, després, s'utilitzarà la transformada de Fourier per veure que les dos freqüències principals del nou so generat són les freqüències dels dos diapasons.

Per últim, es compara la freqüència fonamental d'un instrument construït a partir d'un tub d'assaig amb un extrem obert i un altre amb els dos extrems oberts.

Material, muntatge experimentals i eines digitals que es fan servir

Per la realització d'aquesta seqüència es necessita:

- Un ordinador amb connexió a Internet
- Un micròfon
- Altaveus
- Una flauta dolça
- Un tub d'assaig
- Aigua



El software necessari és:

- Audacity (freeware que podeu descarregar en aquest [link](#))

També són necessaris arxius so de diferents instruments i que interpretin diferents notes. Aquests s'hauran de descarregar amb antelació per, després, poder-los obrir amb l'Audacity. Una possibilitat és descarregar-los de la següent web: <https://freesound.org/search/> Com a mínim seran necessaris els arxius de so amb les notes: DO, RE, MI, FA interpretades, separatament, per una flauta, un piano i un violí. (Com que la web és en anglès, caldrà buscar-los com: Single notes C, D, E, F, flute, piano, violin).

Estructura de la seqüència

La seqüència es divideix en 3 parts, amb una durada aproximada d'una hora i mitja les dues primeres i d'una hora l'última:

Primera part: Exploració de les característiques d'un so, caracterització dels conceptes intensitat/volum i freqüència/to.

1. Introducció
2. Què és el so?

Segona part: Anàlisi experimental dels sons produïts per la veu humana i de la diferència entre un so i un soroll, definició del concepte de timbre, formació de sons purs a partir de sons complexos.

3. Visualització d'ones sonores

Tercera part: Aplicació dels conceptes per predir la freqüència del so generat en funció de la longitud de la columna d'aire que vibra.

4. Aplicació
5. Conclusions

1. Introducció

Discuteix en grup:



- Com arriba la música des de l'altaveu fins a les teves orelles?
- Quines característiques té la teva veu que la fan diferent d'altres veus humanes?
- Com és que podem reconèixer diferents instruments tocant una mateixa nota o melodia d'una cançó?
- Com es produeixen diferents notes musicals amb un mateix instrument?

Completa al teu dossier:



1.a. Què creus que necessaries fer/saber per poder respondre a les anteriors preguntes?

Com que bàsicament els sons o els sorolls que produïm provenen de la nostra veu, d'instruments, amplificadors, entre d'altres màquines, si vols controlar-los et convé tenir alguns aparells o dispositius que et permetin analitzar i mesurar les característiques dels sons i sorolls que produeixis. Al llarg d'aquesta sessió, tractaràs de respondre les anteriors i altres qüestions sobre acústica, tot ajudant-te de dues aplicacions informàtiques diferents:

Primera Part

Simulació "WaveInterference"



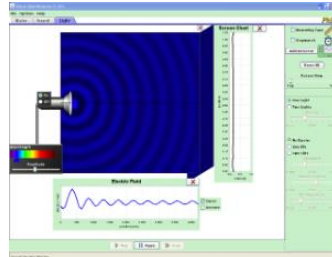
Segona Part

Audacity



2. Què és el so?

Per tal d'estudiar què és el so, utilitzaràs el següent programa de simulació:
http://phet.colorado.edu/sims/wave-interference/wave-interference_ca.jnlp



2.1. Característiques d'un so

Com podem diferenciar dos sons?

Fes ús de la simulació i contesta les següents preguntes.

Completa al teu dossier:



2.a. Quan augmentes l'amplitud, en què canvia el so que sents?

2.b. I quan augmentes la freqüència?

Com es produeix el so?

Observa ara com es mou la membrana de l'altaveu.

Completa al teu dossier:



2.c. Quan augmentes l'amplitud amb el lliscador, com varia el moviment de vibració de la membrana de l'altaveu?

2.d. I quan augmentes la freqüència?



Com podem descriure i caracteritzar els sons?

Com has pogut observar, el moviment que descriu la membrana de l'altaveu és periòdic ja que es repeteix d'una manera igual en intervals de temps iguals. Anomenem cicle o oscil·lació al moviment que es va repetint, és a dir, al fragment de moviment que es repeteix al llarg del temps. Després de cada cicle, la membrana de l'altaveu es troba de nou a la posició inicial.

Segons el que has pogut observar a la simulació:

Completa al teu dossier:



2.e. Què entens per freqüència d'un so?

2.f. Com definiries l'amplitud d'un so?

Com podem mesurar el període i la freqüència d'un so?

Selecciona un so de baixa freqüència i observa novament el moviment de vibració de la membrana de l'altaveu.

Completa al teu dossier:



2.g. Utilitza el cronòmetre per mesurar el període d'oscil·lació del so o temps que triga la membrana en fer una oscil·lació sencera.

Anota el valor obtingut: $T =$ ms

2.h. A partir del valor mesurat del període, calcula la freqüència:

2.2. Propagació d'un so

Com es propaga un so a través del medi fins arribar a les nostres oïdes?

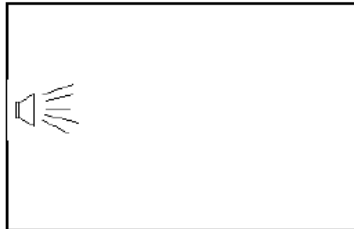
En l'apartat A, has hagut de posar en marxa els altaveus de l'ordinador per poder escoltar els sons. Aquests sons han arribat a les teves oïdes a través de l'aire. Imagina ara que poguessis veure les partícules de l'aire i fotografiar el seu estat, és a dir, on es troben a cada instant de temps.

Completa al teu dossier:

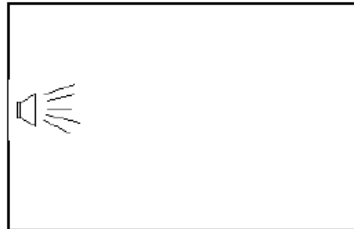


2.i. Dibuixa com creus que seria aquesta fotografia en tres instants de temps diferents:

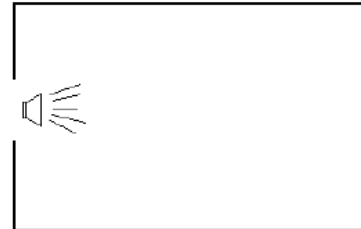
- Quan l'altaveu està apagat i, per tant, encara no ha emès cap so
- Quan l'altaveu emet un so
- Un instant després, mentre l'altaveu continua emetent el mateix so.



(a)



(b)



(c)

A continuació, fes clic damunt l'opció de visualització de la simulació anomenada **"Partícules"**, al mateix lloc on trobàveu l'opció escala de grisos. Aquesta opció representa el moviment vibratori o oscil·latori de les partícules del medi (aire) entorn d'una posició d'equilibri. Aquest moviment ondulatori consisteix en la propagació del moviment vibratori de les partícules del medi.

Què diu la ciència?

En Física, s'anomena ona a la propagació d'una pertorbació d'alguna propietat d'un medi (per exemple, pressió), que es propaga a través de l'espai transportant energia. Per això, parlem d'ones sonores.

Observa el moviment d'una de les partícules del medi marcada amb una **X**. Modifica novament la freqüència i l'amplitud amb els lliscadors i observa com varia el moviment de les partícules del medi.

Completa al teu dossier:



2.j. Quines semblances i quines diferències trobes entre el què has dibuixat a la pregunta anterior i el què observes a la simulació?

2.k. Quan augmentes l'amplitud amb el lliscador, com varia el moviment de vibració de les partícules? I quan augmentes la freqüència?

Com podem representar gràficament la vibració/oscil·lació de les partícules del medi pel qual es transmet un so?

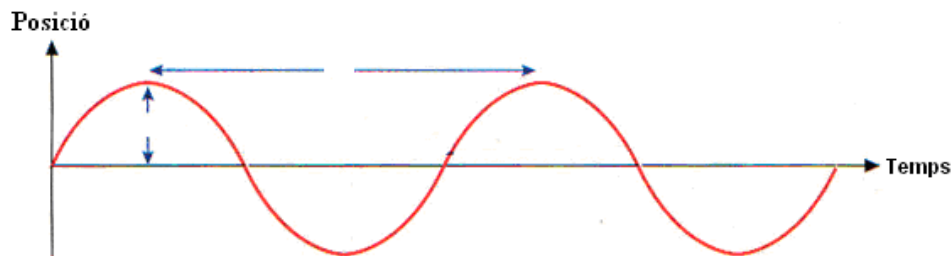
Finalment, fes clic sobre l'opció "afegeix un detector" a la part de dalt del menú de la dreta.

El gràfic que apareix representa la variació de la pressió sobre una determinada zona del medi al llarg del temps.

Completa al teu dossier:



2.1. El gràfic que visualitzes a la simulació és similar al que tens a continuació, que representa el moviment de vibració d'una partícula entorn de la seva posició d'equilibri al llarg del temps. Quines magnituds creus que indiquen les fletxes (vertical i horitzontal) que estan marcades en el gràfic?



Com podem representar gràficament la propagació de les ones sonores?

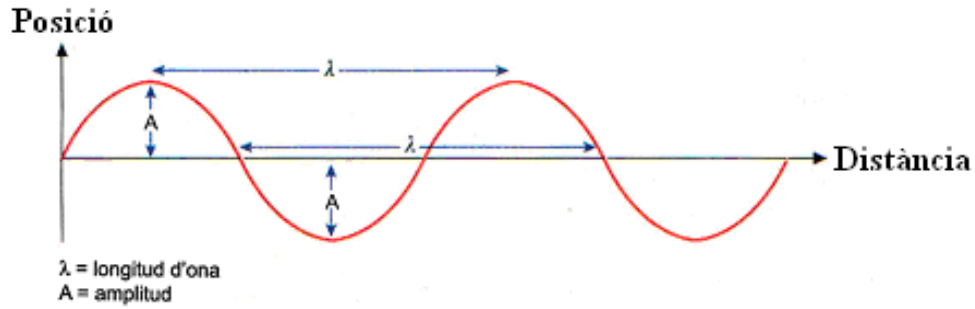
A la simulació, atura amb el botó de pausa el moviment de les partícules del medi. Tracta d'identificar a la finestra de "Partícules" dues zones consecutives on les partícules estiguin el màxim de comprimides, anomenades **fronts d'ona**. Finalment, mesura la distància que hi ha entre aquestes dues zones amb el regle que tens a la part dreta de la simulació. Aquesta distància és el que anomenem **longitud d'ona**.

Completa al teu dossier:



2.m. Anota aquí la teva mesura: $\lambda =$ cm

Podem representar gràficament la propagació d'una ona sonora dibuixant l'estat de vibració de les partícules del medi en un instant de temps determinat. Aquest tipus de representació indica quina és la posició de cada partícula respecte la seva posició d'equilibri segons el punt del medi on es troba (al llarg de la direcció de propagació de l'ona) en un instant de temps determinat. El gràfic que visualitzes a la simulació a l'opció "Mostra el gràfic" està relacionat amb el que tens a continuació.



Completa al teu dossier:



2.n. Després del que has fet fins ara, consideres que ha canviat en algun aspecte la idea que tenies sobre què és el so i com es propaga fins arribar a les nostres orelles?

3. Visualització d'ones sonores

Per estudiar el so ens convé muntar un dispositiu experimental adient. Tal com el que es pot observar en la fotografia.



Fig.1. Esquema del sistema i el material utilitzat per la realització de l'experiència.

L'element bàsic que utilitzaràs és el micròfon acoblat a l'ordinador. El **micròfon** és un aparell dissenyat per captar el so i transformar-lo en senyals elèctrics que posteriorment puguin ser interpretats en un programa editor o reproductor de so. El micròfon està format per una membrana (semblant al timpà de la nostra orella) que es mou cap endavant i cap enrere ràpidament degut a la variació de la pressió que exerceixen les partícules de l'aire.

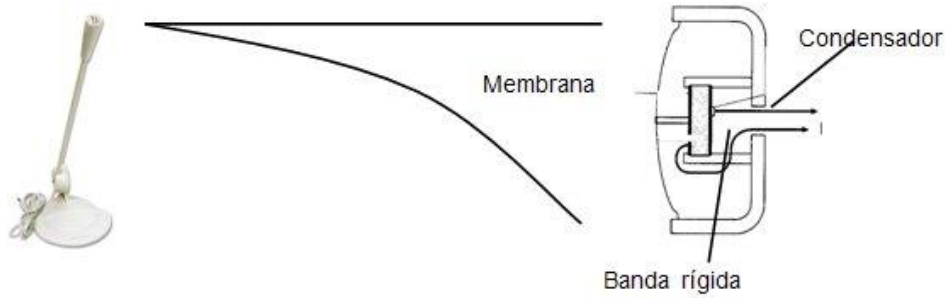


Fig.1. Esquema dels components d'un micròfon.

El software que et permetrà visualitzar les ones sonores captades amb el micròfon és el programa **Audacity**.

3.1. Ones sonores produïdes per una veu humana

Estudiarem com és el so produït pel cantant del nostre grup, i en general, com és el so produït per la veu humana.

Les cordes vocals fan vibrar l'aire i aquest fa vibrar la membrana del micròfon, és a dir, la membrana del micròfon vibra degut als impulsos que rep de les partícules que formen l'aire. La pressió de l'aire que hi ha al davant de la membrana va augmentant i disminuint contínuament mentre arriba el so.

Completa al teu dossier:



3.a. Dibuixa com creus que serà el gràfic posició-temps quan pronunciem la vocal A de forma sostinguda.



Procedeix a analitzar la vocal A amb l'equipament que tens: **micròfon i Audacity**.

Un membre del grup ha d'agafar el micròfon amb la mà i ha de començar a dir la vocal A de forma sostinguda mentre un altre membre del grup inicia la recollida de les dades.

Completa al teu dossier:



3.b. Observa i dibuixa l'ona que has obtingut:



3.c. Quines semblances i diferències hi ha entre la predicció i les dades?

Ara visualitzaràs altres vocals (**O / I**). Repeteix el procediment enregistrant noves pistes d'àudio pronunciant diferents vocals i observa els aspectes iguals i diferents en la forma.

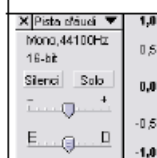
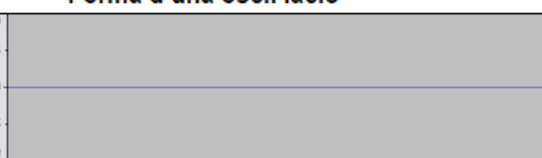
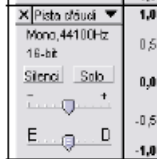
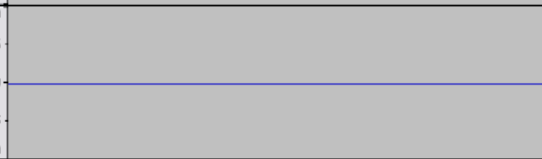

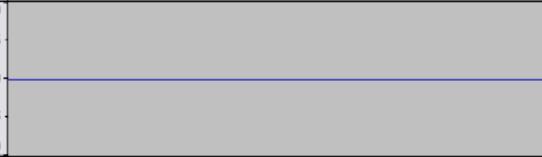

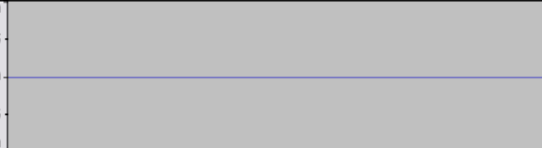
Completa al teu dossier:



3.d. En la següent taula, dibuixa el patró que es repeteix al llarg del temps i la freqüència obtinguda per cada cas:

Freqüència del so

Forma d'una oscil·lació

3.e. Tenint present el que has sentit i el que has llegit a les gràfiques, quin tipus de relació creus que existeix entre la freqüència d'un so i el fet de que els sons siguin aguts o greus?

3.2. Diferència entre un so i soroll

Ara visualitzaràs la representació gràfica d'un soroll.

Completa al teu dossier:



3.f. Et sembla que obtindràs un gràfic similar al de l'apartat anterior? Per què?

Deixa el micròfon sobre la taula i prem per iniciar la presa de dades. Aprofita el soroll de fons de la sala per prendre mesures durant uns 5 segons.

Completa al teu dossier:



3.g. Quines diferències de forma hi ha entre aquesta gràfica i les que has obtingut abans per a les vocals?

3.3. Diferències entre dos o més instruments

A continuació, visualitzaràs sons corresponents a diferents instruments musicals reproduïts a partir d'arxius de so.

Completa al teu dossier:



3.h. Et sembla que el gràfic de la nota Do a la flauta seria igual que el gràfic de la mateixa nota d'un piano? Per què?

3.i. I el gràfic de la nota Do i Re d'un violí? Per què?

Pots comprovar la teva predicció a partir dels arxius de sons musicals. Obre des del programa **Audacity** els arxius de so corresponents a cada instrument i a cada nota.

En primer lloc, visualitza la forma del gràfic obtingut per instruments diferents (piano, flauta, violí, etc.), reproduint la mateixa nota (DO) i prenent les mesures dels períodes corresponents a cada so.

Completa al teu dossier:



3.j. A partir dels gràfics obtinguts d'aquests arxius de so, omple la següent taula:

Instrument	Període (s) d'un DO	Freqüència (Hz) d'un Do

A continuació, visualitza el gràfic obtingut per un mateix instrument (piano) tocant diferents notes.

Completa al teu dossier:



3.k. A partir dels gràfics obtinguts d'aquests arxius de so, omple la següent taula:

Instrument / Nota	Període (s) de la nota	Freqüència (Hz) de la nota
Piano / RE		
Piano / MI		
Piano / FA		


3.l. Quina conclusió en pots treure de comparar les tres freqüències per tots tres instruments (3.j)? I per les 3 notes (3.k)?

3.m. Per què creus que pots identificar diferents instruments encara que donin la mateixa nota?

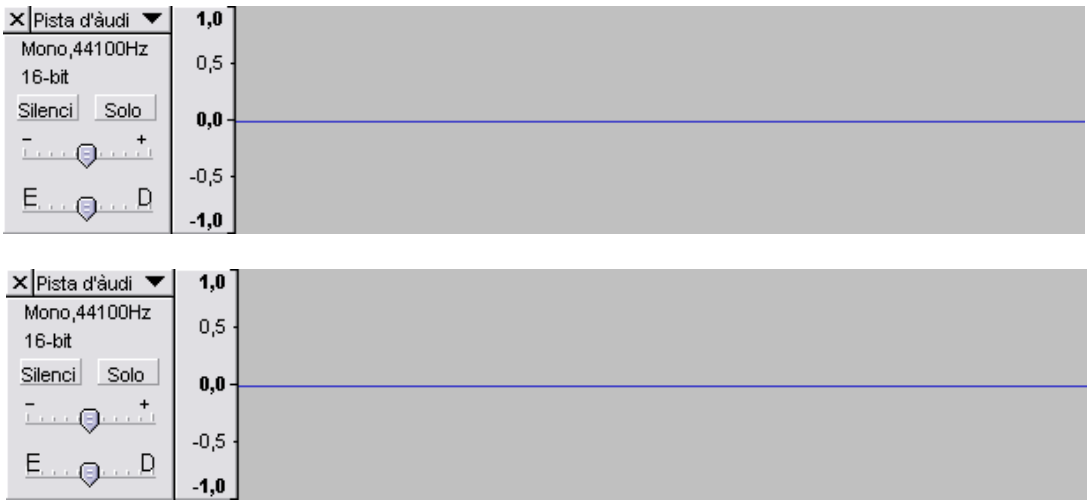
3.4. Com podem crear sons complexos a partir de sons purs?

Analitzant el gràfic de la veu d'una persona, veiem que aquest sembla complex, ja que no és un gràfic sinusoidal, que correspondria a un so pur. No obstant, hem vist que tant els gràfics dels sons complexos presenten un patró que es repeteix de forma periòdica.


Produeix ara dos sons amb dos diapasons de freqüències diferents (440Hz i 660Hz). Enregistra'ls amb el micròfon i visualitza'ls a la pantalla amb el programa **Audacity**, tenint les dues pistes d'àudio obertes alhora.

Completa al teu dossier: 

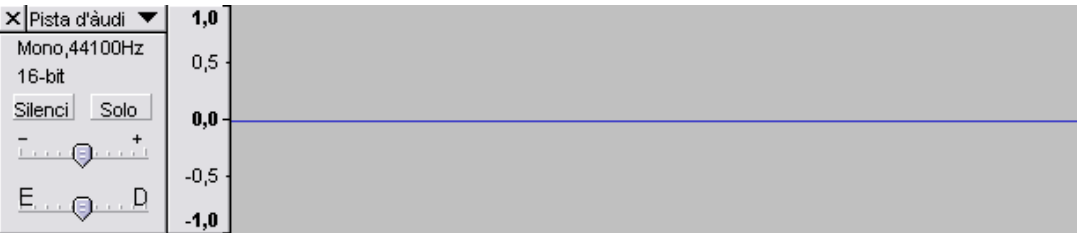
3.n. Com són els gràfics d'aquests sons?



Amb la lupa horitzontal redueix la imatge de manera que les dues gràfiques siguin de la mateixa mida. Selecciona les dues pistes corresponents a les dues ones alhora. Posteriorment activa l'opció del menú Projecte | Barreja Ràpida. Es forma una nova pista amb la barreja, amplifiqueu-la degudament fins que s'observi la forma.

Completa al teu dossier: 

3.o. Dibuixa i descriu el que observes al gràfic resultant: Què ha canviat? Digues si es tracta d'una funció periòdica o no, si té la forma d'un so pur o no, etc.



Què diu la ciència?

Tot i que el gràfic d'un so complex sembla que no tingui res a veure amb una funció sinusoidal, aquesta funció pot descompondre's en la suma d'un gran nombre de funcions sinusoidals. El matemàtic francès J. Fourier (1768-1830) va demostrar que qualsevol moviment periòdic pot representar-se com una combinació de moviments harmònics simples. És a dir, un so complex es pot descompondre en un conjunt de sons purs. Aquesta descomposició és el que s'anomena **Transformada de Fourier**.

L'espectre de Fourier o **espectre de freqüències del so** permet mostrar les freqüències i amplituds de cadascun dels sons purs que cal superposar per crear un so complex. L'espectre de la veu humana té un gran nombre de components, però dominen les freqüències de pocs Hz.

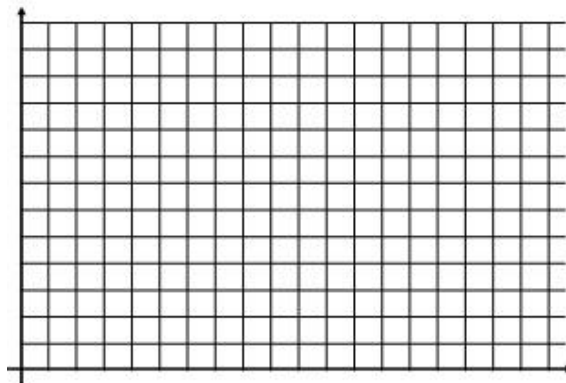
Sons de la mateixa nota però de diferents instruments tenen diferent **timbre**: estan formats per freqüències semblants, però cada so té el seu espectre característic.

El programa **Audacity** permet visualitzar l'espectre de Fourier a través de l'opció del menú Anàlisi o Mostra / Dibuixa espectre. Utilitza aquesta opció per visualitzar l'espectre de freqüències del so resultant de la mescla dels sons dels dos diapasons.

Completa al teu dossier:



3.p. Dibuixa l'espectre que obtens. Explica què representa aquest gràfic. Quin és el valor de les freqüències dels dos primers pics de l'espectre?

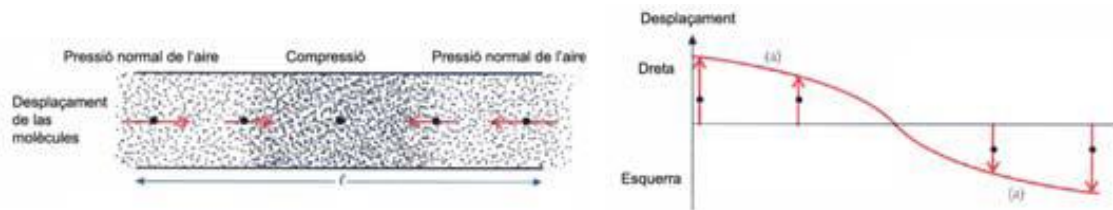


4. Aplicació

4.1. Quina relació hi ha entre la freqüència produïda per una flauta i la distància que hi ha des de l'embocadura al primer forat obert?

En la següent experiència, hauràs de calcular la freqüència d'un so produït per la flauta, que es pot considerar aproximadament com un tub cilíndric obert per ambdós extrems.

Per això, pots utilitzar l'expressió matemàtica $v = \lambda \cdot f$, considerant que la velocitat del so en l'aire és de **340 m/s** i que la longitud d'ona és 2 vegades la distància des de l'embocadura fins al primer forat obert després de tapar el primer forat.



Completa al teu dossier:



4.a. Calcula primer la freqüència teòrica del so que es produeix si es tapa el primer forat de la flauta.

$f_{\text{teòrica}} =$

Posteriorment, tapa el primer forat de la flauta, bufa i enregistra el so emès amb el programa **Audacity**.

Completa al teu dossier:



4.b. Quina és la seva freqüència? Compara-la amb la que teòricament has calculat.

$f_{\text{experimental}} =$

4.c. Si tornessis a repetir la mesura però tapant més forats de la flauta, obtindríes un valor de la freqüència major, menor o igual? Justifica la teva resposta.

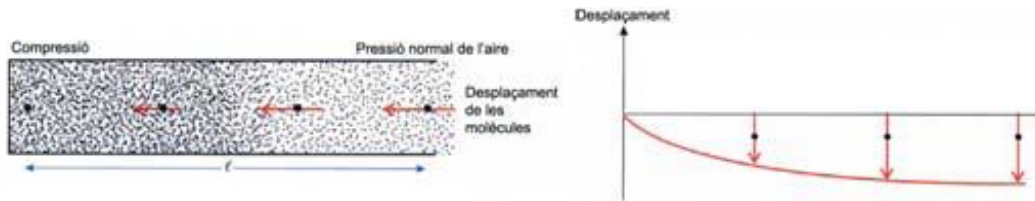
Comprova si la teva predicció ha estat adequada realitzant l'experiència.

4.2. Com varia el so produït en bufar dins d'un tub d'assaig segons la longitud del tub?

Repeteix la mateixa experiència que amb la flauta però en aquest cas amb un tub d'assaig, que és un tub cilíndric obert només per un extrem. Així, podrem contestar a la pregunta:

Com varia el so produït en bufar dins d'un tub d'assaig segons la longitud del tub?

Per això, considera aquest cop que longitud d'ona és 4 vegades la longitud del tub.



Completa al teu dossier:



4.d. Mesura la longitud del tub d'assaig. Calcula la freqüència teòrica.

$f_{\text{teòrica}} =$

4.e. Bufa en el tub i enregistra el so emès amb l'**Audacity**. Quina és la freqüència mesurada? Compara-la amb la que has obtingut en calcular teòricament.

$f_{\text{experimental}} =$

4.f. Si tornessis a repetir la mesura omplint el tub d'assaig amb una mica d'aigua, obtindries un valor major, menor o igual de la freqüència? Justifica la teva resposta.

Comprova si la teva predicció ha estat adequada provant l'experiència.

4.3. Com es produeixen diferents notes musicals amb un instrument?

Completa al teu dossier:



4.g. Tenint en compte la relació existent entre la freqüència (**f**) i la longitud d'ona (**λ**) d'una ona sonora, calcula quina quantitat d'aigua hauries de posar en el tub d'assaig per tal d'aconseguir produir un so de freqüència 1000 HZ.

Longitud de la columna d'aigua =

Comprova si la teva predicció ha estat adequada provant l'experiència.

Què diu la ciència?

Les ones que es produeixen en els instruments musicals de corda o de vent són ones estacionàries. Aquestes es produeixen normalment degut a la interferència entre una ona incident i l'ona que resulta de la reflexió de la incident. Això provoca que les ones estacionàries es produeixin en espais amb límits, com pot ser una corda de guitarra fixa pels dos extrems o un tub obert o tancat.

Quan diem que una columna d'aire o una corda vibra en la **freqüència fonamental**, vol dir que emet el so o la nota corresponent a l'ona estacionària més llarga que es forma entre els seus extrems. De fet, una mateixa columna d'aire o corda pot vibrar d'altres maneres donant altres notes però de menys intensitat. El so resultant és la suma de la nota fonamental i de les altres notes anomenades **harmònics**. És la barreja d'harmònics la que dona el so particular o **timbre** de l'instrument. Les freqüències d'aquests harmònics són múltiples enters de la freqüència fonamental.

5. Conclusions

Si haguessis de tornar a respondre les preguntes de l'inici, què afegiries o canviaries?

Completa al teu dossier:



5.a. Com arriba la música des de l'altaveu fins a les teves orelles?

5.b. Quines característiques té la teva veu que la fan diferent d'altres veus humanes?

5.c. Com és que podem reconèixer diferents instruments tocant una mateixa nota o melodia d'una cançó?

5.d. Com es produeixen diferents notes musicals amb un mateix instrument de vent (o de corda)?

Revir 