



Ones sonores a l'aire.

1 Objectiu

Estudi de les ones estacionàries en una columna d'aire. Determinació de la velocitat del so.

2 Material

Tub de longitud variable, generador de freqüències, altaveu, micròfon i oscil·loscopi.

3 Fonament teòric

El so és una ona longitudinal que es propaga en un medi material (gasós, líquid o bé sòlid). Una corda de violí, un diapasó o la membrana d' un altaveu fan que les molècules d'aire més properes oscil·lin respecte a la seva posició d'equilibri de manera que la direcció de la vibració de les molècules d'aire és paral·lela a la direcció de propagació de l'ona sonora. Si l'instrument que genera el moviment de les molècules realitza un MHS, l'ona generada és una ona sonora harmònica que es pot caracteritzar per la seva longitud d'ona, λ , i la seva freqüència, f . En aquest cas, la funció d'ona que descriu el **desplaçament** longitudinal de les molècules $s(x, t)$ es pot escriure:

$$s(x, t) = s_o \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

on s_o és el màxim desplaçament respecte a la posició d'equilibri, k és el número d'ones ($k = 2\pi/\lambda$) i ω la freqüència angular ($\omega = 2\pi f$). Aquest desplaçament de les molècules genera sobrepressions i depressions en el medi, de manera que quan les molècules s'apropen augmenta la pressió en aquell punt i quan s'allunyen disminueix. Una ona sonora comporta l'existència d'una ona de variació de **pressió** en el medi:

$$p(x, t) = p_o \sin(kx - \omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

on p és la variació de pressió i p_o la variació màxima. Observeu que l'ona de desplaçament i l'ona de pressió tenen un desfasament de $\pi/2$.

La velocitat de propagació del so depèn de les propietats del medi, en el cas d' un gas, es pot expressar en funció de la constant universal dels gasos, R , la massa molar del gas, M , una constant que depèn del gas, γ , i T , la temperatura absoluta mesurada en Kelvins:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (3)$$

També es pot expressar únicament en funció de la temperatura i, en el cas de l'aire, obtenim la següent expressió per la velocitat (en m/s)

$$v = 331,5 + 0,607t_c \quad (4)$$

on t_c és la temperatura en graus Celsius.

3.1 Ones estacionàries

La interferència entre dues ones (ones sonores, mecàniques o bé electromagnètiques) en fase i que es propaguen en sentits oposats, genera una **ona estacionària**. Una ona estacionària es caracteritza per l'existència de punts que no vibren, anomenats **nodes**, i punts que vibren amb amplitud màxima, anomenats **ventres**.

En general, les ones sonores es propaguen en totes direccions però per simplificar-ne l'estudi ens restringim a una sola dimensió. Si col·loquem un altaveu en un extrem d'un tub, l'ona sonora es propaga per la columna d'aire i es reflecteix en l'altre extrem del tub. Si l'ona reflectida està en fase amb l'ona incident la interferència dóna lloc a una ona estacionària i la intensitat del so s'amplifica (fenomen de **ressonància**).

Perquè que es formin ones estacionàries cal que es verifiqui una relació (condició de ressonància) entre la longitud del tub i la longitud d'ona, per tal que l'ona reflectida estigui en fase amb la incident. La **condició de ressonància** per un tub amb els dos extrems oberts és la mateixa que correspon a una corda fixa pels dos extrems:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

La condició de ressonància per un tub amb un extrem obert i l'altre tancat és:

$$L = m \frac{\lambda}{4} \quad m = 1, 3, 5, \dots \quad (6)$$

Les expressions 5 i 6 són teòriques, en l'experiment els extrems del tub no són exactament nodes o ventres, de fet, el tub es comporta com si tingués una longitud efectiva, L_{ef} , més gran que la longitud real; de tota manera, però, prendrem les relacions 5 i 6 com una bona aproximació.

Podem observar com, en un tub obert pels dos extrems les ones estacionàries presenten ventres de desplaçament en els extrems, vegeu al Figura 1.

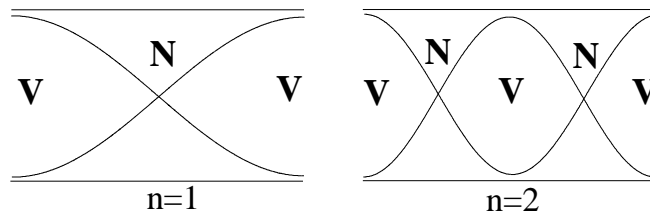


Figura 1: Ones estacionàries en un tub obert pels dos extrems.

Si el tub és tancat per un dels seus extrems, les molècules d'aire properes a l'extrem tancat no vibren i l'ona estacionària presenta un node de desplaçament en aquest extrem, vegeu la Figura 2.

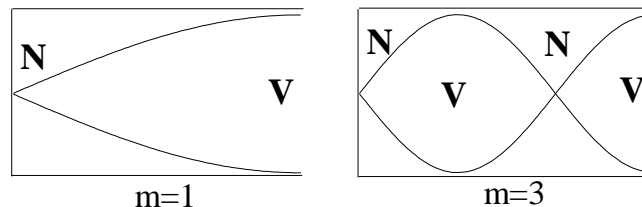


Figura 2: Ones estacionàries en un tub obert per un extrem i tancat per l'altre.

3.2 Freqüències de ressonància

Donada una longitud d'ona, o freqüència determinada, existeixen certes longituds de la columna d'aire per les quals el tub està en ressonància. De la mateixa manera, en una columna d'aire de longitud fixada L , existeixen determinades freqüències per les quals les ones interfereixen constructivament, aquestes freqüències s'anomenen **freqüències de ressonància**.

Un tub d'orgue és un exemple d'ones estacionàries en una columna d'aire, les freqüències de ressonància del tub depenen de la seva longitud i de que el tub estigui obert o bé tancat. La flauta, com l'orgue està basat en tubs cilíndrics, d'altres instruments com el fagot o l'oboe en tubs cònics; però la majoria dels instruments de vent són una combinació de tubs cilíndrics i cònics.

4 Mètode experimental

4.1 Freqüències de ressonància

Deixa l'extrem del tub obert, sense el pistó. Col·loca el micròfon en el foradet just a sota l'altaveu. Encén el micròfon i connecta'l a l'oscil·loscopi (aproximadament a $5ms/div$ i $50mV/div$). Connecta el generador de freqüències aproximadament a 100Hz, amb una ona sinusoidal i una amplitud inicial petita. Ajusta l'amplitud fins que el senyal sigui clar a l'oscil·loscopi.

ALERTA: El so de l'altaveu ha de ser audible però no massa elevat! podria fer malbé el micròfon.

Augmenta lentament la freqüència fins que el so s'amplifiqui. En general el volum també augmenta amb la freqüència ja que el generador és més eficient a altes freqüències, però cal que busquis un màxim relatiu en la intensitat del so o un màxim en l'amplitud de la lectura de l'oscil·loscopi. Ajusta la freqüència de ressonància més baixa de puguis trobar (al voltant de 100Hz), aquesta és la **freqüència fonamental**, f_o , i correspon al valor $n = 1$ de l'expressió 5. Anota f_o i, tot augmentant la freqüència, determina i anota les cinc primeres freqüències de ressonància del tub.

Col·loca el pistó a la posició de 80cm. Seguint el mateix procediment, i començant novament per la f_o (també en aquest cas es troba a prop dels 100Hz), determina les cinc primeres freqüències de ressonància pel tub amb pistó.

4.2 Ones estacionàries

Deixa l'extrem del tub obert, sense el pistó. Tria, en el generador de freqüències, una de las freqüències de ressonància pel tub sense pistó trobades en l'experiència anterior que estigui al voltant de 800Hz. Anota la freqüència utilitzada. Ajusta la lectura del micròfon a l'oscil·loscopi i augmenta l'amplitud del generador fins que el senyal aparegui de forma clara a l'oscil·loscopi. Amb l'ajuda de la barra metàl·lica, mou el micròfon lentament al llarg del tub i pren nota de les posicions on detectis màxims i mínims relatius en la lectura de l'oscil·loscopi. Recorda que el micròfon és sensible a la pressió i que els màxims observats corresponen a màxims de pressió (per tant, mínims de desplaçament, ja que l'ona de pressió està desfasada $\pi/2$ respecte a l'ona de desplaçament).

Repeteix l'experiència per a una altra freqüència de ressonància.

Tanca l'extrem del tub tot col·locant pistó a la posició de 80cm. Tria una altra de les freqüències de ressonància pel tub amb pistó trobades en l'experiència anterior, i que estigui al voltant dels 800Hz. Desplaça el micròfon tot anotant la posició dels màxims i dels mínims.

4.3 Longitud d'ona

Col·loca el pistó vora l'inici del tub (prop de l'altaveu) i el micròfon en el foradet just sota l'altaveu. Tria una freqüència d'aproximadament 2kHz en el generador i ajusta l'amplitud fins que el so sigui audible i

aparegui un senyal clar a l'oscil·loscopi.

ALERTA: El so de l'altaveu ha de ser audible però no massa elevat! podria fer malbé el micròfon.

Determina amb la màxima precisió el període de l'ona sonora utilitzada amb l'ajuda de l'oscil·loscopi. Calcula'n la freqüència. Allunya lentament el pistó de l'altaveu fins que s'amplifiqui el so, indicant que s'ha establert una ona estacionària. Ajusta la posició exacta del pistó tot buscant un màxim en la lectura de l'oscil·loscopi i pren nota de la posició. Continua movent el pistó fins trobar una nova posició on es produeixi una ona estacionària. Repeteix l'experiència prenent nota de les posicions i de l'ordre, m (segons la relació 6), de cada posició fins arribar a l'extrem del tub. Finalment, anota la temperatura del laboratori.

4.4 Velocitat del so

Amb el pistó a 80cm, connecta el generador, amb un senyal d'ona quadrada, a 10Hz, i col·loca el micròfon en el foradet just sota l'altaveu. Ajusta l'amplitud fins que el so sigui audible. Connecta el senyal del generador en el trigger de l'oscil·loscopi i prem el botó de trigger exterior. Ajusta la freqüència de l'oscil·loscopi fins que aparegui a la pantalla un conjunt de polsos irregulars, que corresponen als salts de voltatge de l'ona quadrada. Augmenta la velocitat de l'oscil·loscopi (tot disminuint el TIME/DIV) fins que es distingeixin els detalls dins un pols. En cada pols es poden distingir d'altres polsos autosimilars decreixents en amplitud. Aquestes ones estan generades per l'ona inicial produïda en l'altaveu i els seus ecos en reflectir-se en el pistó. Determina, a l'oscil·loscopi, el temps transcorregut entre la generació del pols inicial i la detecció de l'eco, tal i com es mostra en l'esquema del la Figura 3.

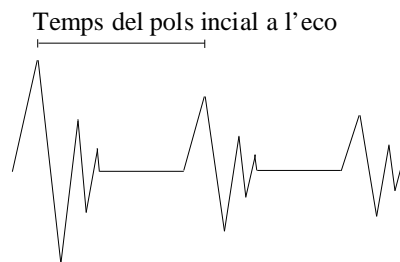


Figura 3: Figura que s'observa a la pantalla de l'oscil·loscopi.

Determina el temps entre l'ona inicial i l'eco per sis posicions diferents del pistó, tot prenent nota de la posició del pistó.

5 Resultats

5.1 Freqüències de ressonància

- Determina les freqüències de ressonància a partir de les expressions 5 i 6.
- Confecciona una taula amb dues columnes: una amb les freqüències de ressonància pel tub tancat i l'altra amb la divisió de les freqüències de ressonància entre la freqüència fonamental, f_o .
- Confecciona una taula amb dues columnes: una amb les freqüències de ressonància pel tub obert per un extrem i tancat per l'altre, i l'altra amb la divisió de les freqüències de ressonància entre la freqüència fonamental, f_o .
- **Comenta els resultats obtinguts.**

5.2 Ones estacionàries

Tant pel tub obert com pel tub tancat:

- Indica la freqüència de l'ona sonora utilitzada.
- Confecciona una taula amb les posicions dels màxims i mínims de pressió.
- Representa gràficament, de forma qualitativa, l'amplitud en funció de la posició tant per l'ona de **pressió** com per l'ona de **desplaçament**.
- **Comenta els resultats obtinguts.**

5.3 Longitud d'ona

- Indica la freqüència de l'ona sonora utilitzada.
- Confecciona una taula amb les posicions del pistó i l'ordre m de cada lectura.
- Representa gràficament la posició del pistó en funció de m .
- Realitza la corresponent regressió lineal i calcula la longitud d'ona λ , a partir de la longitud d'ona λ_m i la freqüència, la velocitat del so.
- **Comenta els resultats obtinguts.**

5.4 Velocitat del so

- Indica la freqüència de l'ona sonora utilitzada.
- Confecciona una taula amb quatre columnes: els temps determinats, les posicions del pistó, la distància recorreguda per la ona sonora (que és dues vegades la distància entre el pistó i l'altaveu) i la velocitat del so en cada cas.
- Determina la velocitat mitjana del so amb el seu error corresponent.
- **Comenta els resultats obtinguts.**

6 Qüestions

1. Calcula la longitud d'un tub d'orgue tancat per un extrem i obert per l'altre de freqüència fonamental 256Hz.
2. Sabent que per l'aire $\gamma=1,4$ y $M=0,029$ Kg/mol dedueix l'expressió 4. Comprova si la velocitat del so obtinguda està d'acord amb aquesta expressió. Comenta les causes de les possibles discrepàncies.
3. Es veuen afectades les freqüències de ressonància d'un tub d'orgue quan disminueix la temperatura?
4. Quina flauta és capaç de produir sons més aguts, la flauta dolça o la contralt? Nota: la flauta contralt és més llarga que la flauta dolça.