

Bicidoppler

Currículum

Tavi Casellas. Professor de física i química de l'institut Montilivi de Girona des del 1981, actualment treballa al Centre de Recursos Pedagògics del Gironès. Formà part de l'equip directiu que posà en marxa l'IES de Llagostera en l'inici de la reforma. Formador del PIE, ara SGTI, al llarg de molts anys. La inquietud de resoldre amb agilitat els dibuixos de línies equipotencials, l'aprenentatge dels nous llenguatges de programació (Visual Basic i Java) i de disseny de pàgines web i l'obtenció d'una Llicència d'Estudis li han permès l'elaboració del portal www.FisLab.net. Forma part del grup d'experimentadors i d'adaptació dels materials de Física en context.

Maria Gubert. Professora de Física i Química des de l'any 1984. En aquests moments forma part del cos de catedràtics de física i química d'ensenyament secundari, i imparteix aquestes matèries a l'Institut Vescomtat de Cabrera d'Hostalric. També exerceix el càrrec de coordinació de medi ambient i estada a l'empresa en el mateix centre. El seu estudi de doctorat en les tecnologies del medi ambient a la UdG (Girona) li han ofert la possibilitat d'endinsar-se en aquesta recerca i poder coordinar estratègies de percepció mediambiental en grups d'adolescents, col·laborant, en especial, amb l'Observatori de la Tordera (ICTA), en el qual fa referència als sistemes físics i químics de la conca. El seu esperit inquiet i curiós li ha permès conèixer i formar part del grup de treball de Física en Context, de Girona, en el qual les connexions del món físic amb la realitat diària permeten avançar en la investigació i el coneixement del nostre entorn.

Xavier Muñoz. Professor de Física i Química de l'Institut Ramon Coll i Rodés de Lloret de Mar. Actualment forma part de l'equip directiu de l'Institut com a secretari i col·labora amb la Universitat de Girona com a professor associat del màster interuniversitari en Enginyeria Tèxtil, Paperera i Gràfica impartint alguns crèdits de l'assignatura Física del Paper i Avaluació de Propietats de Pastes i Papers. El seu tarannà pràctic l'ha portat a utilitzar els materials de Física en Context i a dissenyar algunes experiències que permeten acostar els continguts curriculars a la realitat física.

Resum

A les classes de física de batxillerat expliquem l'efecte Doppler ajudant-nos d'algun esquema dels fronts d'ona i posant com a exemple el soroll d'un tren o d'un cotxe quan s'acosta i posteriorment s'allunya, és el típic: iiiiiiiauuuuuuuu. Aquí presentem una experiència que no solament ens permetrà escoltar l'efecte Doppler sinó que podrem mesurar les freqüències i comprovar que les fórmules teòriques es compleixen (amb els errors experimentals corresponents). Aquesta és una activitat que pot servir de síntesi en finalitzar la unitat d'ones, com a cas pràctic per a l'ús de les noves tecnologies o, fins i tot, pot ser l'embrió d'un treball de recerca.

Construcció

Primerament es va intentar portar a terme l'experiència amb un ventilador de sostre (l'article s'hauria d'anomenar "Ventiladoppler", figura 1) amb un mòbil enganxat a la punta d'una aspa però va comportar un seguit de problemes:



Figura 1. El Ventiladoppler

- Dificultat per fixar el telèfon intel·ligent a la punta de l'aspa i possibilitat que aquest sortís disparat (tal com efectivament ens va passar) i quedés inservible.
- La ubicació del ventilador dificulta l'experiència.
- El telèfon intel·ligent trenca la simetria del ventilador de manera que aquest comença a oscil·lar perillosament en augmentar la velocitat de rotació.
- La proximitat al sostre i la seva geometria fan que en el so capturat hi hagi un conjunt d'interferències que en dificulten enormement l'anàlisi posterior. Els resultats no concorden gaire amb la teoria.

En un segon intent, aquest més reeixit, es va utilitzar una bicicleta amb el telèfon intel·ligent enganxat a la perifèria de la roda del darrere (figura 2).



Figura 2. Smartphone



Figura 3.
Brunzidor

En un tercer intent, que és el que recomanem, utilitzarem un brunzidor alimentat a 6 volts que es pot adquirir en qualsevol botiga especialitzada en material d'electrònica (figura 3).

Així doncs, per al bicidoppler, necessitem una bicicleta (cap per avall), un emissor petit d'un so periòdic (telèfon intel·ligent o brunzidor) i una càmera fotogràfica o de vídeo.

Orientacions per al professorat

Temporització

- Podem dedicar-hi entre una i tres hores en funció de l'enfocament (més obert o més tancat) que donem a l'experiència i del treball que realitzi l'alumnat a casa i a l'aula/laboratori.

Alumnes als quals s'adreça l'experiència

- Alumnat de segon curs de batxillerat. També pot ser interessant per alumnat de física dels primers cursos universitaris.

Metodologia

Com a element motivador i també per acabar d'aclarir el concepte de l'efecte Doppler podem facilitar a l'alumnat (o donar-los l'enllaç perquè el visualitzin) el vídeo "The doppler effect", que pertany a una sèrie *-The Big Bang Theory-* en què els protagonistes n'aclareixen la definició i el soroll (en el cas del so) que podem escoltar:

- <http://www.youtube.com/watch?v=O5dj1gbX1kQ>

La gravació del vídeo amb l'experiència del bicidoppler la podem realitzar a l'aula (millor a l'exterior per evitar interferències sonores produïdes per les parets i el sostre) i proposar-la a l'alumnat per fer-la en grups a casa o bé podem utilitzar el vídeo ja gravat que podeu trobar aquí.

A l'aula d'informàtica podem realitzar per grups el treball amb l'Audacity: enregistrament del so del vídeo, anàlisi del so (període, freqüència en repòs, freqüències en diferents intervals dins d'un període).

A l'aula o a casa l'alumnat ha de fer:

- Càlcul teòric dels valors esperats: freqüència màxima i mínima per l'efecte Doppler.
- Comparació dels resultats de l'experiència amb els càlculs teòrics.
- Anàlisi final i valoració de l'experiment amb propostes de millora.

També podem realitzar tota l'experiència (gravació, captura, anàlisi, càlculs, comparació i conclusió final) plegats a l'aula (o a l'aula d'informàtica) tot aprofitant l'ús de la pissarra digital. Fer l'experiència d'una manera o altra dependrà, entre altres aspectes, del temps que hi vulguem dedicar i de les infraestructures que tinguem al centre.

Orientacions tècniques

- Cal dominar mínimament l'Audacity per saber generar un so d'una freqüència determinada i exportar-lo en format mp3 (si utilitzem un telèfon intel·ligent), capturar el so provinent d'un vídeo, seleccionar-ne intervals temporals i analitzar-ne l'espectre sonor.
- Cal disposar d'un brunzidor o bé d'un mòbil o reproductor en què puguem carregar-hi un so d'una freqüència determinada generat per l'Audacity. En el nostre cas, en les experiències amb el telèfon intel·ligent, varem generar un fitxer mp3 amb un so de 1.000 Hz.

- S'ha de tenir en compte la possibilitat que aquest mòbil o aparell tingui un *accident de laboratori* (surti disparat tangencialment, rebi alguna patacada...).
- Si s'opta per enregistrar el so a l'exterior, convindria triar un espai poc transitat i un dia que no faci vent per evitar interferències sonores.

Full de l'alumnat

Objectiu

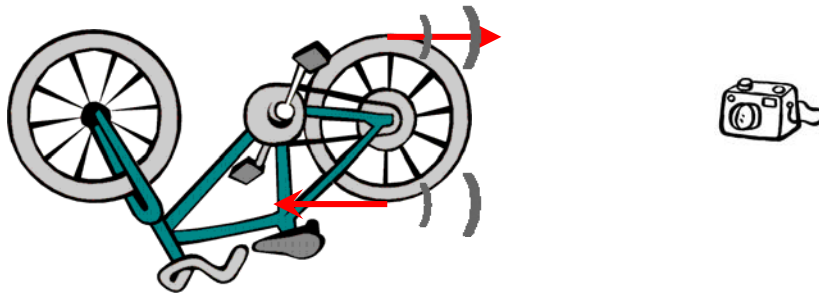
Comprovar, quantitativament, l'efecte Doppler.

Introducció

L'efecte Doppler consisteix en la variació de la freqüència de qualsevol ona emesa per un objecte en moviment.

En aquesta experiència emetrem un so audible des d'un bronzidor (o un mòbil) situat en la perifèria d'una roda de bicicleta (col·locada cap per avall).

Situats darrere la bicicleta, en girar la roda el so ens arribarà provinent del bronzidor (mòbil) primer movent-se cap a nosaltres i, després de mitja volta, allunyant-se de nosaltres. Aquests moviments s'aniran repetint de forma periòdica.



Gravarem un vídeo per poder analitzar-ne el so després (amb l'Audacity) i molt especialment la variació de la seva freqüència de forma periòdica a causa de l'efecte Doppler.

Material

- Bicicleta
- Bronzidor o mòbil (on es pugui introduir un so generat per l'ordinador)
- Càmera fotogràfica o de vídeo
- Cinta mètrica
- Ordinador amb l'Audacity instal·lat

Realització

- ✓ Si utilitzeu un mòbil:
 - Amb l'Audacity, genereu un so d'una freqüència determinada (us proposem 1.000 Hz) i exporteu-lo a format mp3.
 - Introduïu al mòbil el so generat.
- ✓ Situeu la bicicleta cap per avall i enganxeu el bronzidor o el mòbil a la perifèria de la roda del darrere. Vigileu que en donar voltes l'aparell no toqui el quadre de la

bicicleta i que estigui fixat convenientment per evitar que surti disparat tangencialment a causa de la velocitat de rotació.

- ✓ Disposeu un petit tros de plàstic o cartró en algun punt de la roda que toqui l'estructura de la bicicleta en passar-hi. D'aquesta manera tindrem un senyal sonor cada vegada que la roda faci una volta.
- ✓ Mesureu la distància entre l'eix de la roda i l'altaveu del brunzidor o del mòbil.
- ✓ Engegueu el so i comenceu a pedalar amb la màxima velocitat possible (plat gran i pinyó petit).
- ✓ Enregistreu un vídeo durant uns quants segons des del darrere de la bicicleta, en una posició perpendicular a l'eix de la roda.
- ✓ Enregistreu també un vídeo del brunzidor o del mòbil quan està quiet.
- ✓ Necessiteu mesurar el radi de rotació, la distància des de l'eix de la bicicleta fins a l'altaveu del brunzidor o del mòbil.

Anàlisi i tractament de les dades

Amb el programari Audacity captureu el so del vídeo: comenceu la gravació del so intern de l'ordinador i posteriorment engegueu la reproducció del vídeo.

Elimineu els intervals sonors que no us interessin: inici i final de la gravació.

Observeu el so amb detall, augmentant l'eix temporal amb la lupa +, per observar les repeticions causades per la rotació.

- Mesureu aleshores el període de rotació.

Retalleu el so corresponent a quatre o cinc períodes de rotació.

Dividiu els períodes de rotació en una dotzena o quinzena d'intervals cadascun, aneu-los seleccionant consecutivament i obteniu per a cadascun la freqüència fonamental del so (Analitza // Traça l'espectre).

Podeu emplenar una taula d'un full de càlcul amb els valors obtinguts com ara:

I tot seguit representeu gràficament els valors amb un full de càlcul.

- Quin tipus de gràfica s'intueix?
- Expliqueu el perquè de la forma gràfica que observeu i la seva relació amb l'efecte Doppler.
- Obtingueu, de forma aproximada, els valors màxims i mínims de la gràfica així com el seu valor mitjà.

Interval (ms)	Freqüència fonamental (Hz)

Captureu ara el so del vídeo que heu gravat amb el brunzidor o mòbil quiet. Analitzeu-lo amb l'Audacity per obtenir la freqüència fonamental d'aquest so.

- La freqüència fonamental obtinguda és:
- Sabent el període de rotació i el radi podeu calcular la velocitat del brunzidor.

Podeu fer una cerca a Internet per contestar la pregunta següent.

- La fórmula que permet calcular les variacions de freqüències per l'efecte Doppler és:

Calculeu ara les freqüències teòriques esperades en el punt de màxima velocitat d'apropament i d'allunyament del brunzidor o del mòbil.

- Freqüència quan s'acosta:
- Freqüència quan s'allunya:
- Feu un comentari global sobre els valors obtinguts i els valors esperats.

Ampliació: anàlisi gràfica

Podeu fer un pas més en l'experiència: buscar la funció matemàtica que més s'ajusti als valors experimentals per comprovar-ne la validesa.

Per fer-ho podeu utilitzar el programari CurveExpert Basic 1.4 (versió d'avaluació) que permet obtenir una regressió sinusoidal d'un conjunt de valors (com és el nostre cas). Podeu obtenir-lo a:

- <http://www.curveexpert.net/products/curveexpert-basic/>

Abans de fer-ho cal que, amb el full de càlcul, calculeu la mitjana de les freqüències obtingudes i obtingueu una nova columna amb la desviació de les freqüències respecte d'aquesta mitjana.

En el programa CurveExpert Basic introduïu els valors del temps i les desviacions.

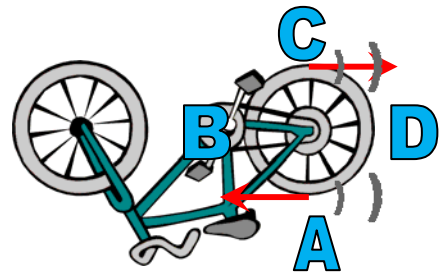
Realitzeu seguidament l'anàlisi Apply Fit / Miscellaneous / Sinusoidal...

- Comenteu la funció obtinguda a partir de les dades experimentals i la seva relació amb les dades teòriques.
- Calculeu l'error absolut i relatiu de les freqüències obtingudes.

Qüestionari

- Podeu explicar la variació de l'amplitud de l'ona sonora al llarg d'un període?
- Relacioneu el moviment del brunzidor amb les dades experimentals.

Trieu un període del gràfic experimental i situeu les lletres A, B, C i D en el lloc més probable.



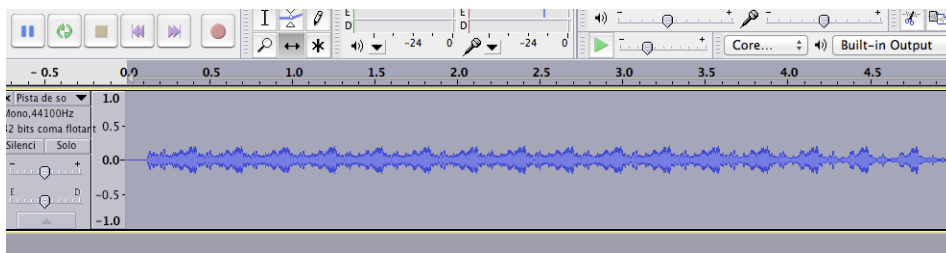
- Què passaria amb la freqüència si en comptes d'enregistrar el so alineats amb la bicicleta ho féssim alineats amb l'eix de gir de la roda?
- Podeu proposar altres experiments per comprovar l'efecte Doppler?
- Esmenteu algunes aplicacions que té l'efecte Doppler en la vida quotidiana.

Soluciones

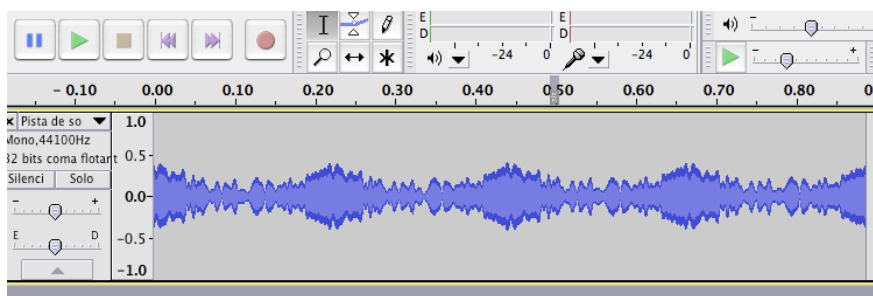
Amb el programari Audacity captureu el so del vídeo: comenceu la gravació del so intern de l'ordinador i posteriorment engegueu la reproducció del vídeo.

Elimineu els intervals sonors que no us interessin: inici i final de la gravació.

Observeu el so amb detall, augmentant l'eix temporal amb la lupa +, per observar les repeticions causades per la rotació.



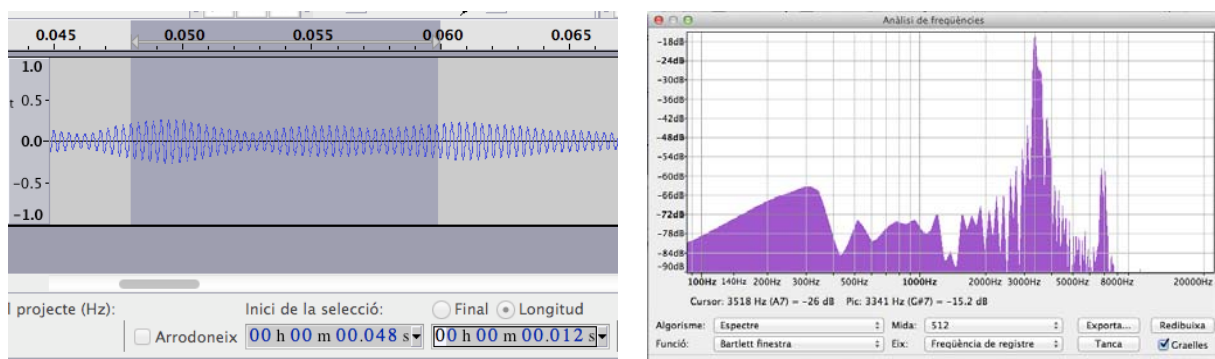
Retalleu el so corresponent a quatre o cinc períodes de rotació.



- Mesureu aleshores el període de rotació.

888 ms correspon a 4 períodes
 $T = 888 \text{ ms} / 4 = 222 \text{ ms}$

Dividiu els períodes de rotació en una dotzena o quinzena d'intervals cadascun, aneu-los seleccionant consecutivament i obteniu per a cadascun la freqüència fonamental del so (Analitza // Traça l'espectre).



Podeu emplenar una taula d'un full de càlcul amb els valors obtinguts com ara:

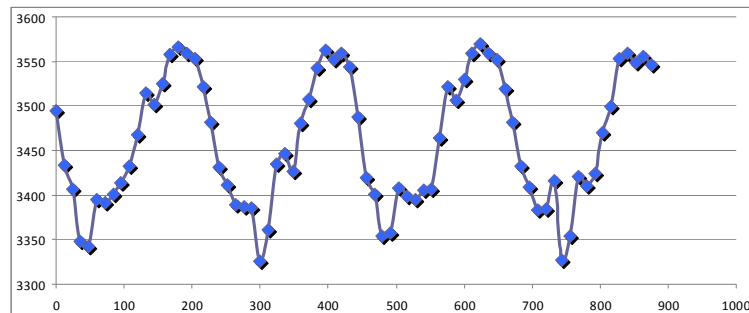
Interval	Freqüència fonamental
(ms)	(Hz)
0	3495

12	3434
24	3407
36	3348
48	3342
60	3395
72	3391
84	3401
96	3414
108	3432
...	...

I tot seguit representeu gràficament els valors amb un **full de càlcul**.

- Quin tipus de gràfica s'intueix?

S'observa clarament una tendència sinusoidal.



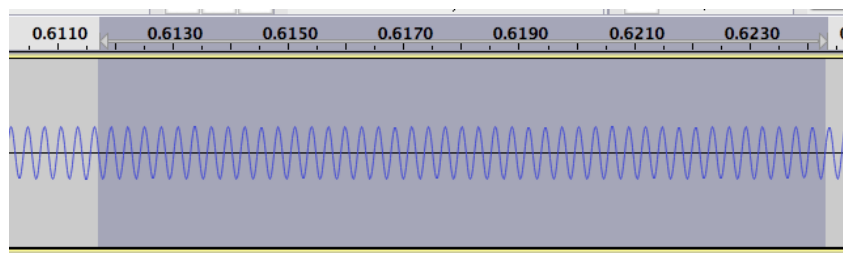
- Expliqueu el perquè de la forma gràfica que observeu i la seva relació amb l'efecte Doppler.

S'observa que el valor de la freqüència fonamental augmenta i disminueix al voltant del valor mitjà. En relació amb l'efecte Doppler, quan la freqüència augmenta indica que el focus emissor s'acosta a l'observador. En cas contrari, una disminució de la freqüència indica un allunyament del focus emissor respecte de l'observador.

- Obtingueu, de forma aproximada, els valors màxims i mínims de la gràfica, així com el valor mitjà.

*Observant la gràfica i de manera aproximada:
Màxim = 3.550 Hz
Mínim = 3.350 Hz
Mig = 3.450 Hz*

Captureu ara el so del vídeo que heu gravat amb el bronzidor o mòbil quiet. Analitzeu-lo amb l'Audacity per obtenir la freqüència fonamental d'aquest so.



- ☑ La freqüència fonamental obtinguda és:

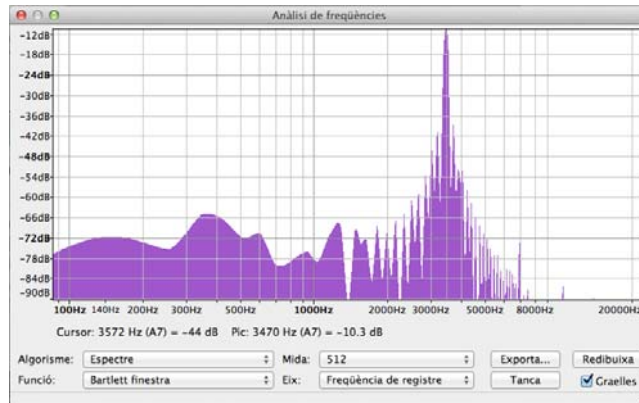
3470 Hz

- ☑ Sabent el període de rotació i el radi podeu calcular la velocitat del brunzidor.

$T = 0,222 \text{ s}$

$R = 34 \text{ cm}$

$v = 2 \cdot \pi \cdot R / T = 9,62 \text{ m/s}$



Podeu fer una cerca a Internet per contestar la pregunta següent.

- ☑ La fórmula que permet calcular les variacions de freqüències per l'efecte Doppler és:

$$f' = f \cdot \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right)$$

*La fórmula és extreta de la Wikipedia en castellà:
http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Doppler*

On

v: velocitat del so

v_o: velocitat de l'observador (zero, en el nostre cas)

v_s: velocitat de l'emissor

f: freqüència de l'emissor en repòs

f': freqüència aparent observada

Calculeu ara les freqüències teòriques esperades en el punt de màxima velocitat d'apropament i d'allunyament del brunzidor o del mòbil.

- ☑ Freqüència quan s'allunya:
 $f' = 3.450 \text{ Hz} \cdot 340 \text{ m/s} / (340 \text{ m/s} + 9,62 \text{ m/s}) = 3.355 \text{ Hz}$
- ☑ Freqüència quan s'acosta:
 $f' = 3.450 \text{ Hz} \cdot 340 \text{ m/s} / (340 \text{ m/s} - 9,62 \text{ m/s}) = 3.550 \text{ Hz}$
- ☑ Feu un comentari global sobre els valors obtinguts i els valors esperats.

Els resultats obtinguts experimentalment (de forma gràfica i aproximada) concorden de manera sorprenent amb la predicció teòrica.

Ampliació: anàlisi gràfica

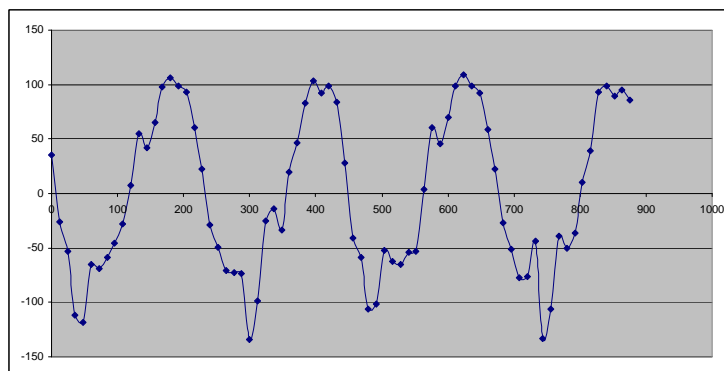
Podeu fer un pas més en l'experiència: buscar la funció matemàtica que més s'ajusti als valors experimentals per comprovar-ne la validesa.

Per fer-ho podeu utilitzar el programari CurveExpert Basic 1.4 (versió d'avaluació) que permet obtenir una regressió sinusoidal d'un conjunt de valors (com és el nostre cas). Podeu obtenir-lo a:

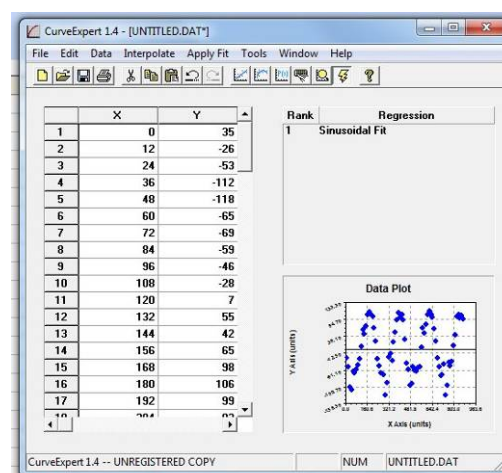
- <http://www.curveexpert.net/products/curveexpert-basic/>

Abans de fer-ho cal que, amb el **full de càlcul**, calculeu la mitjana de les freqüències obtingudes i obtingueu una nova columna amb la desviació de les freqüències respecte d'aquesta mitjana.

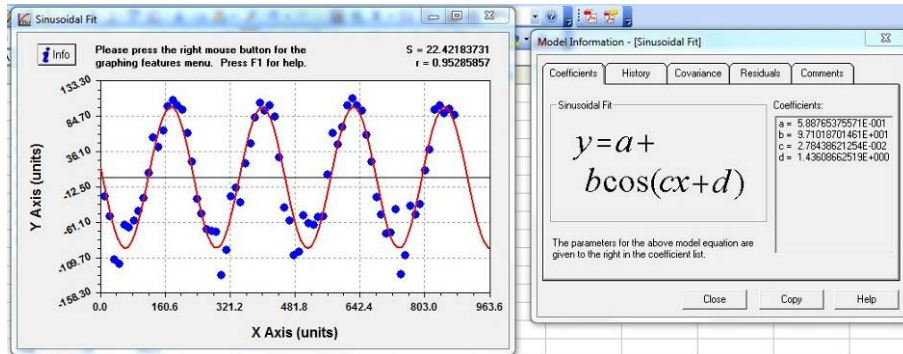
Interval (Hz)	Freqüència fonamental (Hz)	Freqüència mitjana (Hz)	Desviació (Hz)
		3460	
0	3495		35
12	3434		-26
24	3407		-53
36	3348		-112
48	3342		-118
60	3395		-65
72	3391		-69
84	3401		-59



En el programa CurveExpert Basic introduïu els valors de temps i de les desviacions.



Realitzeu seguidament l'anàlisi Apply Fit / Miscellaneous / Sinusoidal...



- ☑ Comenteu la funció obtinguda a partir de les dades experimentals i la seva relació amb les dades teòriques.

$$f' = 0,589 + 97,1 \cos(0,0278 \cdot t + 1,44)$$

Si tornem a sumar-hi la mitjana obtenim

$$f' = 3460,6 + 97,1 \cos(0,0278 \cdot t + 1,44)$$

Així doncs el valor màxim (el brunzidor s'acosta) de freqüència seria

$$f' = 3460,6 + 97,1 = 3.557,7 \text{ Hz}$$

I el valor mínim (el brunzidor s'allunya)

$$f' = 3460,6 - 97,1 = 3.363,5 \text{ Hz}$$

$$T = 2 \cdot \pi / \omega = 2 \cdot \pi / 0,0278 = 226 \text{ ms} = 0,226 \text{ s}$$

Dades que també concorden molt amb els valors esperats

- ☑ Calculeu l'error absolut i relatiu de les freqüències obtingudes.

Freqüència màxima

$$E_a = 3.557,7 \text{ Hz} - 3.550 \text{ Hz} = 7,7 \text{ Hz}$$

$$E_r = 7,7 \text{ Hz} / 3.550 \text{ Hz} = 0,0022 = 0,22 \%$$

Freqüència mínima

$$E_a = 3.363,5 \text{ Hz} - 3.355 \text{ Hz} = 8,5 \text{ Hz}$$

$$E_r = 8,5 \text{ Hz} / 3.355 \text{ Hz} = 0,0025 = 0,25 \%$$

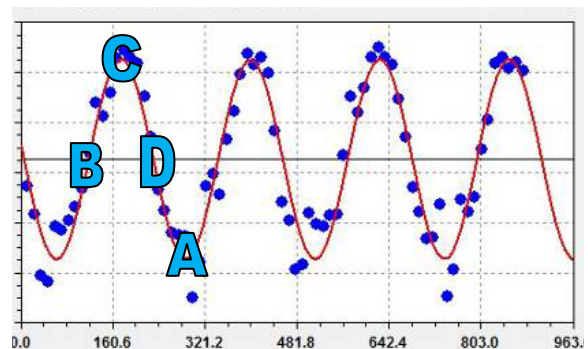
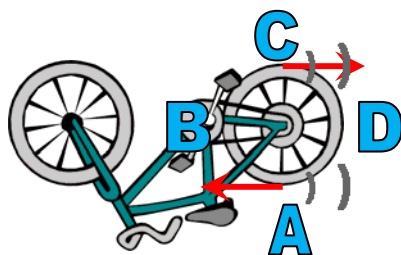
Qüestionari

- ☑ Podeu explicar la variació de l'amplitud de l'ona sonora al llarg d'un període?

L'amplitud varia per diferents motius. D'una banda, a causa de la variació de la distància respecte de la càmera i, de l'altra, a causa de les interferències del so amb les reflexions que fa en l'estructura de la bicicleta i en els objectes propers (parets, terra...).

- ☑ Relacioneu el moviment del brunzidor amb les dades experimentals.

Trieu un període del gràfic experimental i situeu les lletres A, B, C i D en el lloc més probable.



La freqüència més alta s'aconsegueix quan la component x de la velocitat del brunzidor té un valor positiu i és més gran: posició C que correspon a la cresta del gràfic.

La freqüència més baixa s'aconsegueix quan la component x de la velocitat del brunzidor té un valor negatiu i és més gran: posició A que correspon a la vall del gràfic.

- Què passaria amb la freqüència si en comptes d'enregistrar el so alineats amb la bicicleta ho féssim alineats amb l'eix de gir de la roda?

Si ens situem alineats amb l'eix, el brunzidor pràcticament no s'allunya ni s'acosta i, en aquest cas, no es produeix l'efecte Doppler. La freqüència no variaria.

- Podeu proposar altres experiments per comprovar l'efecte Doppler?

Es podria realitzar amb l'ajut d'un cotxe que circulés a una velocitat constant en una carretera recta mentre toca el clàxon. Una persona hauria de gravar el cotxe mentre s'apropa i s'allunya. Dins del cotxe una persona ha de mesurar la velocitat amb l'ajut d'un navegador amb GPS o d'un telèfon intel·ligent amb una aplicació adequada (el velocímetre dels cotxes sempre tenen errors importants).

Una altra experiència que pot ser interessant: deixar oscil·lar (moviment harmònic) el brunzidor lligat a una molla llarga.

I encara una tercera: deixar caure lliurement el brunzidor durant alguns segons des d'un segon o tercer pis, capturant el so des dalt. Cal preveure la possibilitat que el brunzidor en acabar deixi de funcionar!

- Esmenteu algunes aplicacions que té l'efecte Doppler en la vida quotidiana.

El radar, les ecocardiografies, mesures de distàncies en astrofísica, els ratpenats per evitar col·lisionar...