

L'ordinador als laboratoris de física dels instituts

Josep Panadès Martí*
I.E.S. "Jaume I". Salou

Introducció

En aquest article presentem un exemple de treball al laboratori referit a diverses activitats de l'ensenyament i l'aprenentatge de la física, en el qual es dona especial importància als treballs pràctics realitzats amb els alumnes. L'exemple se centra en l'estudi de fenòmens relacionats amb les molles a nivell del BUP i COU: la llei de Hooke, el moviment vibratori harmònic simple, l'amortit i el forçat. Precisament en aquests temes apareixen una colla de qüestions bàsiques de l'actual currículum, a la vegada que s'hi poden trobar altres fenòmens (ones longitudinals i transversals, circuits elèctrics oscil·lants, etc.) que aprofundiran més els alumnes que continuïn estudis universitaris relacionats amb la física. L'exemple que presentem utilitza possibilitats generades pels recursos informàtics de l'experimentació assistida per ordinador (EXAO) tal com han estat subministrats i desenvolupats pel Programa d'Informàtica Educativa (PIE) del Departament d'Ensenyament.

La utilització de l'EXAO, conjunt de dispositius i programes que fan servir l'ordinador com a eina d'adquisició de dades, obre la possibilitat de l'estudi de molts fenòmens interessants des del punt de vista didàctic que altrament serien molt difícils d'estudiar per la via experimental (Aranda i Ruiz, 1991). Per mitjà dels programes de tractament de dades subministrats amb l'equipament d'EXAO, o amb programes més generals de l'entorn Framework també subministrats pel PIE, podem estudiar ràpidament i còmodament el tipus de dependència entre les variables que intervenen en un fenomen, la qual cosa permet la recerca de la llei o bé fixar l'atenció de forma qualitativa en els trets essencials de la dependència sense haver de passar gaire estona en la determinació experimental (Regalés, 1992), la qual, però, no és eliminada del tot de l'activitat, cosa diferent del que passa amb el mètode de les simulacions informàtiques d'experiències. L'esment fet a anteriors articles publicats a la *Revista de Física* sobre EXAO em dóna peu a subratllar que aquest que ara es presenta deixa els termes generals de presentació de la metodolo-

gia i del material que tenien els anteriors (i que anaven a càrrec d'autors que hi havien col·laborat directament) per centrar-se específicament en la forma com s'ha pogut aplicar el material a un cas concret en uns centres determinats.

L'aplicació que es presenta té en compte que és convenient apropar els alumnes de secundària als mètodes de treball que caracteritzen avui la recerca en els laboratoris i la indústria. Però per tal que sigui possible, caldrà usar un sistema conceptual ben delimitat, un llenguatge adequat i una elecció convenient del tipus d'experiències que realitzar (Vidal, 1991). Vegeu, per situar-vos, l'esquema de la figura 1.

El mitjans utilitzats

En general, cal que responguin als criteris d'ampli abast de tècniques experimentals bàsiques, i que siguin senzills, comuns i també adaptats al nivell de formació de l'alumne.

Maquinari informàtic: com a maquinari d'EXAO s'utilitza un ordinador PC 386 o superior, equipat amb placa PC-LAB-812PG, la placa externa (EXAO1 i EXAO3) i el joc de sensors que l'acompanya.

Programari informàtic: com a programari específic d'EXAO utilitzem els programes (SENSORS, CORBES, SO, etc.) (Cortel, 1992) del paquet que normalment acompanya el maquinari que acabem d'esmentar.

També utilitzem programari procedent del conjunt general de programes FW3. Fem servir alguns programes (fulls de càlcul i esquemes) com a eines de tractament de dades, atès que permeten una introducció gradual de tècniques informàtiques adaptades al nivell de formació dels alumnes.

A més, i amb la finalitat de trobar el model experimental que més s'ajusti a les dades experimentals i estudiar les distribucions en dues dimensions pel mètode dels mínims quadrats utilitzem REGRESIO.FW3 (per als models lineals) i REGRENLF.W3 (comparació entre model lineal, potencial i exponencial). Amb aquests programes es troben paràmetres estadístics, paràmetres del model, representacions gràfiques de la corba de regressió i es generen possibilitats de prediccions. També fem servir CALCUL.FW3 per trobar la derivada o la integral d'una funció d'una variable i les seves representacions gràfiques; DENSITAT.FW3, que permet, do-

*Josep Panadès Martí (Montblanc, 1943) és llicenciat en física per la Universitat de Barcelona (1973) i professor de l'IES Jaume I de Salou. Ha col·laborat en el Programa d'Informàtica Educativa (PIE) del Departament d'Ensenyament

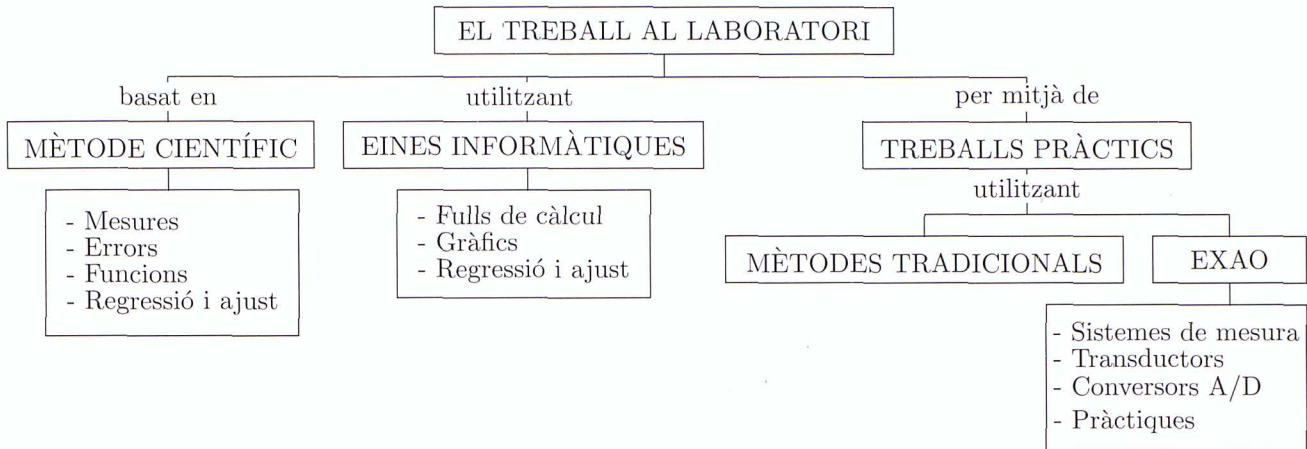


Figura 1: El laboratori, eina d'ensenyament i aprenentatge

nades les masses i els diàmetres de diverses boles, trobar les densitats, el valor millor i la desviació mitjana, i DIBUIX.FW3 per fer la representació gràfica d'una funció donada.

Altre material: a més del material obvi (molles, boles i suports que en cada cas s'aniran especificant), s'utilitza un *sensor bobina* que especificuem amb detall tot seguit. El sensor consisteix en una bobina de 2 000 voltes amb resistències en paral·lel, i equival a un circuit R-L. La bobina no és ideal, té resistència interna considerable i, de fet, es pot considerar com una resistència pura en sèrie amb una autoinducció ideal. Les mesures s'han fet utilitzant el programa ALTERN d'EXAO (Cortel, 1992) i mostren que la nostra bobina té un valor de L de 0,072 H i una resistència r_l de 75 Ω . En les experiències que presentem la freqüència no supera els 10 Hz, la qual cosa comporta per a la bobina una inductància molt petita, mai superior a 5 Ω , una impedància Z_l pràcticament igual a la resistència òhmica r_l , de molt aproximadament 75 Ω i un angle de desfasament no superior a 3°.

El sistema físic. L'oscil·lador harmònic

L'oscil·lador harmònic és un exemple important de sistema dinàmic amb un moviment periòdic que serveix de model exacte o aproximat per a molts problemes de física (Crawford, 1971).

Els exemples clàssics d'oscil·lador inclouen un sistema estable que es desplaça de la seva posició d'equilibri. Per esmentar-ne alguns, pensem en el circuit elèctric compost d'inductància i capacitància, en una massa que penja d'una molla, etc.

Un element —sigui elèctric o mecànic— és lineal si la resposta que presenta és directament proporcional a la força de sol·licitació. Molts fenòmens en física són lineals quan les variacions de les magnituds implicades són petites (lleï de Hooke, lleï d'Ohm...); llavors les corbes

característiques del fenomen es podran considerar línies rectes.

Si separem el sistema de l'equilibri es produiran oscil·lacions lliures. El comportament oscil·latori resulta de la combinació de dues propietats intrínseques del sistema físic amb tendències oposades: d'una banda la força de retorn (molla, condensador...), que intenta que el sistema retorni a l'equilibri imposant una velocitat adequada a la part mòbil; de l'altra la inèrcia, que s'oposa a qualsevol variació de la velocitat del sistema (massa, bobina...).

La freqüència de les oscil·lacions està relacionada amb les propietats físiques del sistema i en el cas de l'oscil·lador mecànic es compleix que la força de retorn (o recuperadora) per unitat de desplaçament i per unitat de massa és igual al quadrat de la freqüència pròpia d'oscil·lació del sistema.

Si un sistema que oscilla no el pertorbem continuàrament oscil·lant indefinidament, l'energia es va intercanviant entre el sistema inercial i el de retorn de tal manera que la suma es manté constant. Tanmateix, en qualsevol situació física real hi ha processos de fricció i d'altres tipus (fregament, resistència, radiació...) que amorteixen el moviment. En aquest cas les transferències internes d'energia en un oscil·lador són irreversibles i l'energia total disminueix, hi ha amortiment i el sistema és no conservatiu. El moviment amortit feble es pseudoperiòdic, amb una amplitud que disminueix exponencialment. El temps d'amortiment és el temps que tarden l'amplitud i la velocitat a disminuir en un factor $e^{-\pi}$ i l'energia en un factor $e^{-2\pi} = 0,00187$. El factor de qualitat és el nombre de períodes que triga a disminuir l'energia al mínim valor indicat abans.

Quan un oscil·lador amortit parteix del repòs i és impellit per una força sinusoidal, el moviment que en resulta és la superposició de l'oscil·lació lliure transitòria

(amortida) i de l'oscil·lació estacionària. Trobem així unes pulsacions transitòries inicials mentre s'amorteix l'oscil·lació lliure transitòria. Les oscil·lacions en l'estat estacionari són les que queden després d'haver decaïgut fins a un valor despreciable les transitòries. La resposta ressonant del sistema, a mesura que fem variar de manera gradual la freqüència impulsora, ve caracteritzada per l'amplitud i el desfasament entre la força impulsora i la resposta. Ambdues són funcions de la freqüència impulsora i dels paràmetres característics del sistema oscil·lant.

Determinació de la constant elàstica d'una molla

Aquesta primera experiència la fem sense l'auxili del material d'EXAO, però utilitzarem un dels programes (REGRESIO.FW3) per al tractament de les dades.

Material utilitzat: un suport, una nou doble, una barra amb ganxo, una molla ($m = 16,5$ g), masses diverses, un regle, paper mil·limetrat i el programa REGRESIO.FW3.

Objectius: estudi de l'allargament d'una molla, determinació de la constant elàstica i representació de l'energia potencial.

Realització: a una molla elàstica subjectada per un extrem li pengem de l'altre extrem pesos coneguts. La molla s'allarga fins a la posició d'equilibri caracteritzada en cada cas pel valor l de la llargària total de la molla.

Estudi de l'allargament: pengem pesos en ordre creixent i mesurem la longitud de la molla. Tabulats els resultats experimentals, fem la representació gràfica de les forces aplicades *versus* l'allargament (figura 2). Conclusions: per a valors petits de la massa la resposta no és lineal; a partir d'un valor determinat ($m = 50$ g) la resposta és lineal i compleix la llei de Hooke.

Determinació de la constant elàstica: entrem les dades experimentals (masses penjades, superiors a 50 g) en el programa REGRESIO.FW3 per tal de trobar la relació entre la força i l'allargament de la molla. Trobem:

$$P = K\delta l + b \quad (\text{figura 2})$$

$$K = 5,6 \pm 0,1 \text{ N/m}, \quad b = 0,0054 \text{ N}$$

(la precisió en la mesura de pesos és de 0,01 N o 1 g i per tant $b = 0$).

Conclusió: es compleix la llei de Hooke.

$$P = 5,6 \delta l \quad \text{unitats SI.}$$

Avaluació de l'energia potencial elàstica: si a la molla li pengem una massa $M = 86,5$ g, la posició d'equilibri és:

$$\delta l = 9 \text{ cm}$$

(vegeu-ne el gràfic).

La força recuperadora o elàstica és igual al pes de la massa M . Hi apliquem una força addicional i produïm un nou allargament x . El treball que això comporta el calculem per a diferents valors de x i l'anomenem energia potencial elàstica,

$$E_e = x^2/25,6,$$

que representem també en el gràfic de la figura 2.

Estudi experimental del moviment vibratori harmònic simple

Material: el mateix de la pràctica anterior i, a més, una bobina de 2 000 voltes ($L = 0,072$ H, $r_l = 75 \Omega$), un imant i l'equip EXAO.

Objectius: observació i estudi del moviment vibratori harmònic simple, relació entre el valor de la massa oscil·lant i el període per a una molla concreta.

Realització: a la molla de $K = 5,6$ N m⁻¹ li pengem una massa de $M = 86,5$ g. Posició d'equilibri $\delta l = 9$ cm. Separem la massa de la posició d'equilibri a una distància $A = 0,35$ cm (vol dir, força addicional $KA = 1,96$ N i energia potencial $E_e = KA^2/2 = 343$ mJ), i abandonem el sistema. Aquest començarà a oscil·lar amb un moviment harmònic simple que podem observar a la pantalla de l'ordinador, tal com es veu en la figura 3.

Experiència EXAO: usem el sensor bobina en paral·lel amb la gran resistència d'entrada de l'EXAO. El circuit dissipa molt poca energia. Amb l'EXAO observem V_e , caiguda de potencial a l'extrem de la bobina, que és una magnitud proporcional a l'acceleració (o a la posició, ja que $a = -\omega^2 x$). Es prenen 5 000 mesures a 100 mesures/segon. La precisió en la mesura de temps és de 0,01 s i en l'eix vertical és de 3 mV.

Mesures: hem fet mesures de l'amplitud, la freqüència i el període del moviment, la comprovació de la coincidència del valor de la freqüència mesurat amb el previst per la teoria i la determinació de l'equació de la velocitat en funció del temps. En els càlculs hem tingut en compte que la molla no és ideal i que, com veurem després, cal afegir-ne la massa efectiva, $m_{ef} = 5,5$ g, que és la tercera part de la massa real de la molla (figura 3).

Ens podríem fer les preguntes següents: les observacions a la pantalla corresponen a un moviment vibratori harmònic? Es conserva l'energia en el moviment estudiat? Les respostes a les qüestions anteriors són afirmatives. A *Tècniques informàtiques de laboratori* (Panadès, 1993) les dades experimentals EXAO d'aquesta experiència es traspassen a l'FW3 on es comparen amb la simulació d'un moviment vibratori harmònic simple, i la coincidència és completa. A més a més, allí es determina l'energia de cada valor experimental obtingut com a suma de l'energia cinètica i la potencial que és constant. Com que l'energia total proporcionada es manté constant, el sistema és conservatiu o no amortit. L'energia s'emmagatzema sota

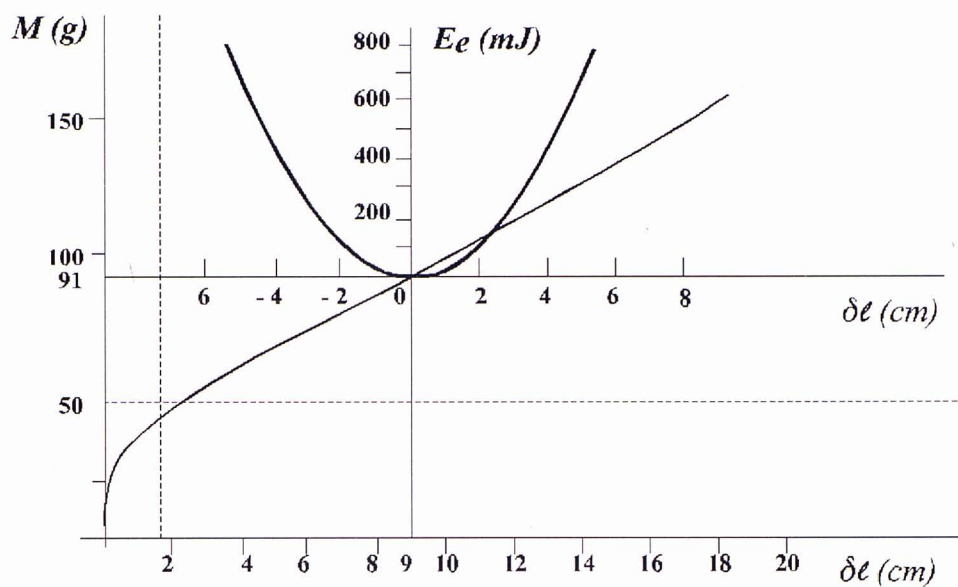


Figura 2: Gràfiques de la massa penjada i de l'energia en funció de l'allargament

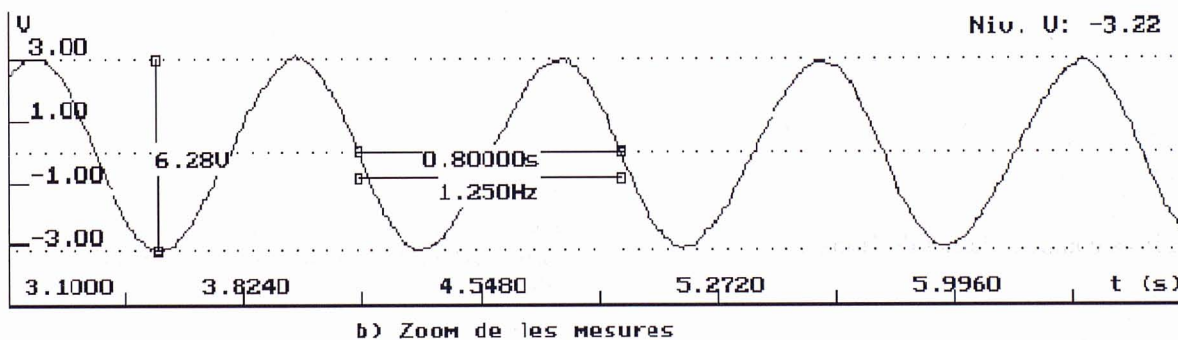
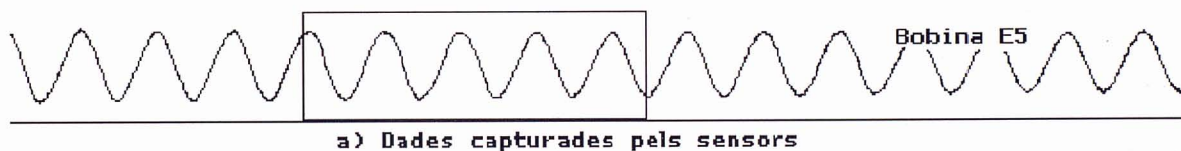


Figura 3: Moviment harmònic simple. (a) Mesures EXAO, (b) informacions i càlculs i (c) 'zoom' i mesures

dues formes que s'intercanvien mútuament de manera reversible, l'energia cinètica i l'energia potencial elàstica.

Relació T^2 versus M : hem realitzat diverses vegades l'experiència EXAO anterior fent variar el valor de la massa penjada a la molla de constant $K = 5,6 \pm 0,1$ N/m i hem mesurat els valors dels períodes T corresponents. Amb REGRESIO.FW3 hem buscat la relació entre T^2 i la massa penjada M .

Conclusió: per a una molla ideal, sense massa, s'hauria de complir $T^2 = 4\pi^2 M/K$. Fent servir REGRESIO trobem la relació $T^2 = 0,068M + 0,559$. La massa de la molla no és nul·la i les partícules de la molla també oscil·len encara que no totes amb la mateixa amplitud. Això fa que calgui afegir a la massa penjada tan sols una fracció de la molla m_{ef} , que s'anomena massa efectiva, i que es preveu que sigui un terç de la massa de la molla (CRAWFORD, 1971). L'expressió teòrica,

$$T^2 = \frac{4\pi^2(M + m_{ef})}{K},$$

comparada amb l'anterior dóna:

$$K = \frac{4\pi^2}{6,8} = 5,8 \text{ N/m}, \quad m_{ef} = \frac{0,559}{0,068} = 8,2 \text{ g},$$

resultats molt propers als esperats teòricament (figura 4).

Estudi experimental del moviment vibratori harmònic amortit

Material: el mateix que en l'experiència anterior i, a més una resistència de 75Ω que connectem en paral·lel al sensor bobina.

Objectius: observació i estudi del moviment vibratori amortit, determinació del temps d'amortiment, freqüència, equació del moviment i factor de qualitat.

Experiment EXAO: un sensor bobina amb la resistència d'entrada de l'EXAO i una resistència de 75Ω en paral·lel, amb la finalitat de dissipar energia. Els paràmetres del l'experiment EXAO són els mateixos que abans. Ara observem V_e , que es pot interpretar físicament de dues maneres: (a) com una magnitud proporcional a la intensitat del circuit L-R equivalent, i (b) com una magnitud proporcional a la velocitat del sistema ja que el ritme temporal de la variació del flux, la força electromotriu induïda, és proporcional a la velocitat de l'imant i aquesta és proporcional a V_e .

A la figura 5 observem el moviment vibratori amortit. Ara l'amplitud de les oscil·lacions no és constant, l'energia del sistema anirà disminuint i estem per tant davant d'un sistema no conservatiu o dissipatiu. Hem mesurat a la pantalla la freqüència (1,25 Hz) de les oscil·lacions, molt propera a la freqüència pròpia de l'oscil·lador. Això significa que les oscil·lacions que tenim són molt feblement amortides. Amb les eines de càlcul hem

ajustat les mesures dels valors màxims per tal de trobar-ne la variació en funció del temps.

Conclusions: l'equació del moviment del sistema és la que s'espera de la teoria, una ona harmònica amb l'amplitud exponencialment decreixent; el temps d'amortiment val 15,3 s, i el factor de qualitat Q del procés és 120.

Estudi experimental de les oscil·lacions forçades

Material: el mateix de l'experiència anterior, afegint-li dos imants petits, un potenciòmetre i una segona bobina de 2 000 voltes amb un generador de funcions.

Objectius: observació simultània de la velocitat d'un oscil·lador forçat i de la força. Observació dels batecs (pulsacions) inicials entre la part lliure del sistema i la part forçada que esdevindrà estacionària. Mesura, en la part estacionària, del desfasament entre la velocitat i la força aplicada. Activació de les ones estacionàries longitudinals i transversals.

Experiment EXAO: el sistema, com a les experiències anteriors, és d'antuvi una molla $K = 5,8$ N/m que arrossega una massa $M = 86,5$ g de la qual ara també s'espera un comportament amortit causat per la presència d'un coeficient de dissipació d'energia (o fregament) originat, com abans, per una bobina amb una resistència en paral·lel. La novetat és que ara excitem el sistema amb una força sinusoidal produïda per un generador de funcions connectat a una bobina de 2 000 voltes. Dos imants petits s'enganxen a l'extrem de la molla i se situen dins del camp magnètic de la bobina accionada pel generador per tal de produir un forçament sobre l'oscil·lador a la freqüència desitjada. Usem dos sensors, una bobina de 2 000 voltes amb una resistència de 75Ω en paral·lel (dissipació d'energia) per tal d'observar la velocitat del sistema i la bobina del generador, que, reduït amb un potenciòmetre, permet observar la força sinusoidal aplicada.

Amb l'EXAO es prenen 5 000 mesures a una velocitat de 100 mesures/segon (50 cada sensor). L'experiment dura 50 segons, la precisió en la mesura de temps és de 0,02 s i la precisió en l'eix vertical és de 3 mV. A la figura 6 hi ha les observacions fetes a la freqüència impulsora. Podem dir (CRAWFORD, 1971) que:

(i) Al principi s'observen batecs deguts a dues freqüències, la de forçament i la pròpia de l'oscil·lador. Per tant, el moviment és la superposició de dos moviments components: el moviment lliure i el moviment estacionari, el primer és un moviment que es va amortint i que és despreciable després d'un temps de $Q = 120$ oscil·lacions.

(ii) Cap al final (45 segons) el moviment és estacionari, i és un moviment harmònic simple defasat respecte de la força aplicada. N'hem determinat l'amplitud (0,83

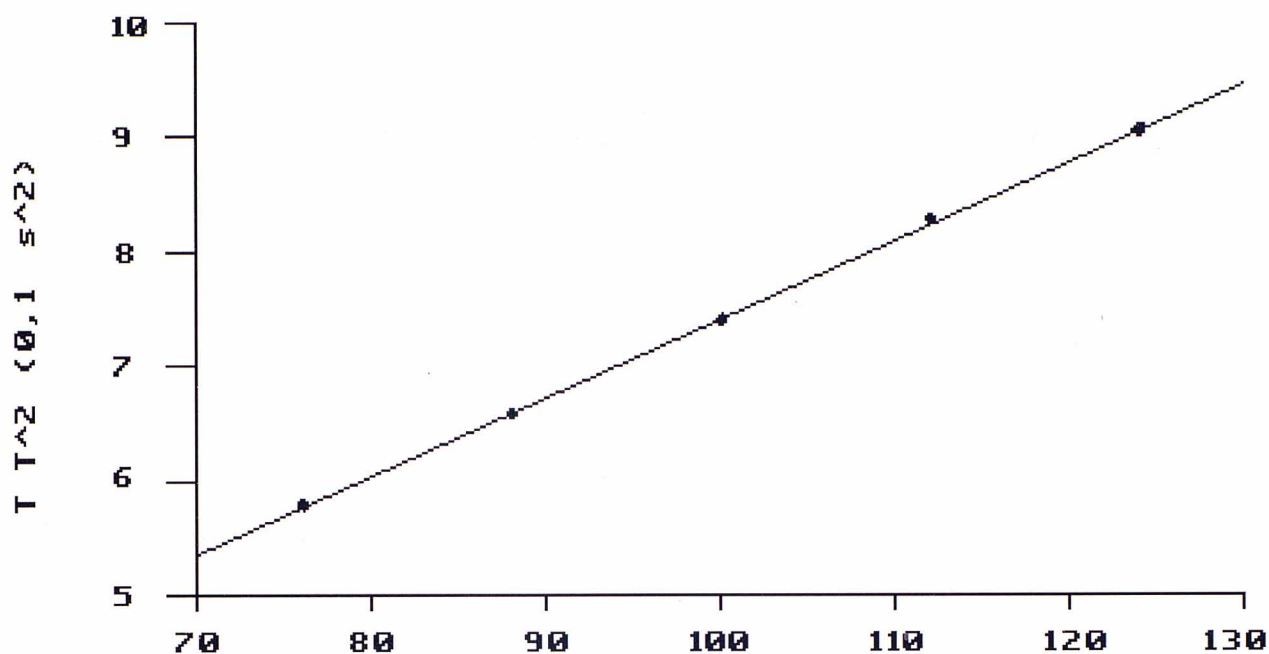
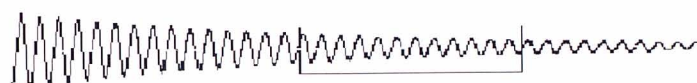
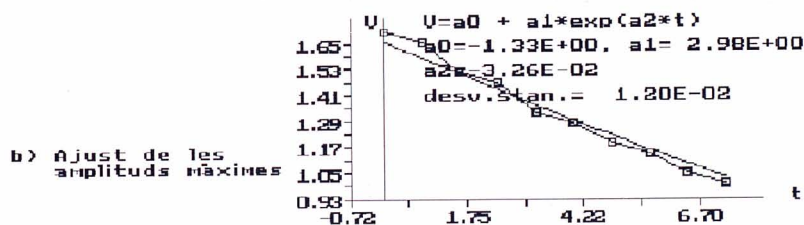


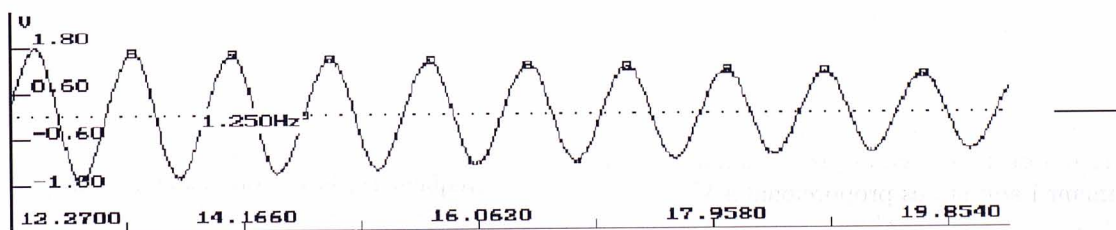
Figura 4: Determinació per regressió lineal de la relació entre el període i la massa penjada



a) Dades experimentals capturades pels sensors



b) Ajust de les amplituds màximes

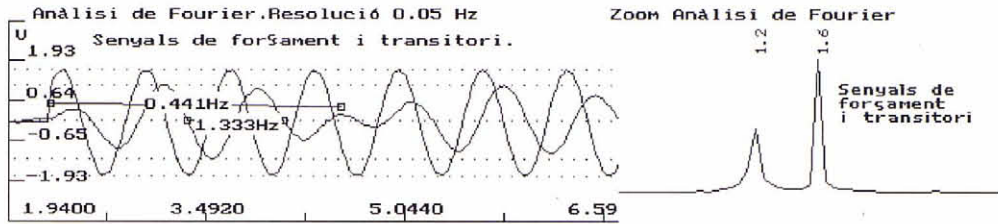


c) Zoom de les mesures

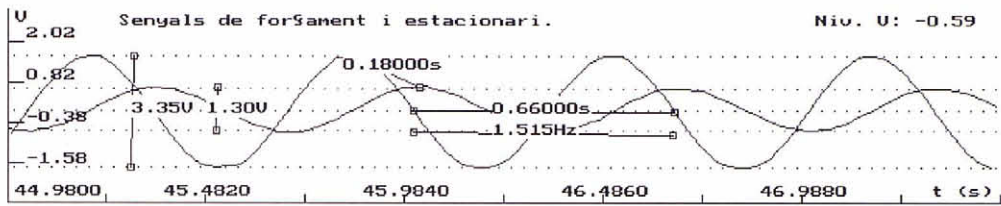
Figura 5: Moviment vibratori harmònic amortit. (a) Dades experimentals, (b) les amplituds màximes en funció del temps usant l'EXAO i (c) 'zoom' de les mesures



a)



b) Anàlisi de Fourier



c) Zoom de les mesures del moviment estacionari

Figura 6: Moviment vibratori harmònic forçat. (a) Dades experimentals, (b) anàlisi de Fourier i 'zoom' del transitori i (c) 'zoom' del moviment estacionari

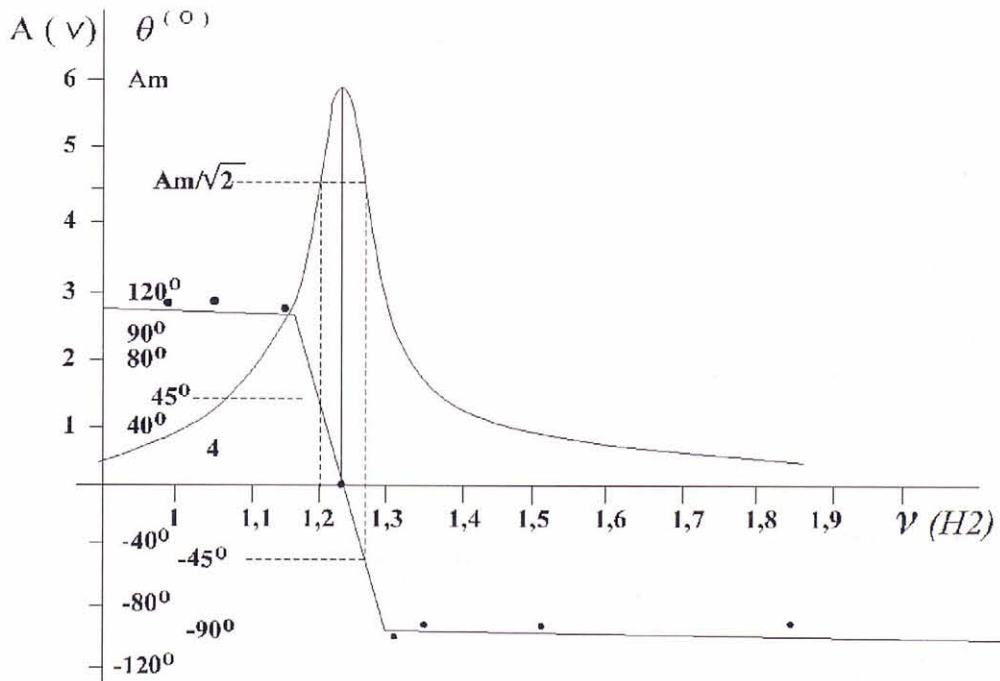


Figura 7: Amplitud de les oscil·lacions i angle de desfasament en funció de la freqüència

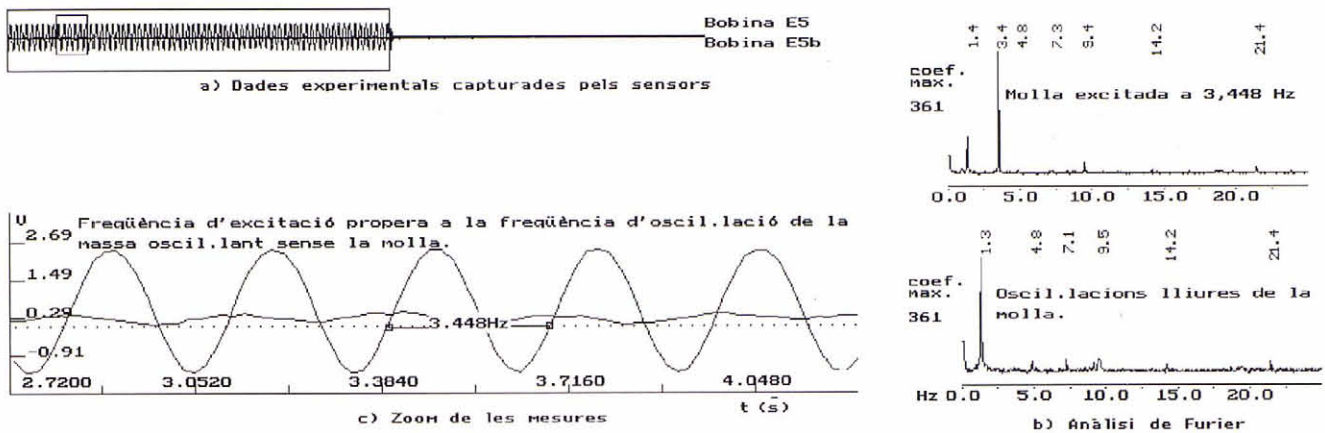


Figura 8: Molla forçada a 3,448 Hz i oscil·lacions lliures. (a) Dades experimentals, (b) anàlisi de Fourier dels dos casos i (c) 'zoom' del moviment forçat

V), la freqüència (1,538 Hz) i el desfasament, mesurant el retard t entre els dos senyals, amb el resultat de $\theta = 360t/T = -83$ (θ en graus sexagesimals).

(iii) hem repetit per a valors de la freqüència impulsora d'entre 0 i 10 Hz i hem representat els valors de l'amplitud de les oscil·lacions i de l'angle de desfasament entre la velocitat i la força (figura 7). Per a freqüències properes a la freqüència pròpia (que és de 1,24 Hz) l'amplitud de les oscil·lacions creix i el desfasament passa bruscament de $+90^\circ$ a -90° quan s'assoleix la freqüència de ressonància.

(iv) En les discontinuïtats produïdes en la connexió i la desconexió del generador s'activen les freqüències pròpies del sistema. Hem activat la molla a la freqüència d'oscil·lació de la massa (sense comptar la de la molla) i després hem parat el generador donar pas a oscil·lacions lliures. Hem analitzat per Fourier tant la part forçada com la lliure (figura 8). Cal observar que en l'espectre de les oscil·lacions lliures ha desaparegut la freqüència de forçament i, en canvi, pren importància la freqüència pròpia. La resta de les freqüències són les mateixes en les dues parts analitzades. Si activem la molla amb aquestes freqüències, presents tant a la part forçada com a la lliure, podem observar fenòmens com ara oscil·lacions transversals i ones estacionàries longitudinals.

Bibliografia

- ARANDA, J. i RUIZ, F., "L'EXAO: l'ordinador al laboratori", *Revista de Física*, **1**, 50 (1991).
 CORTEL, A., *Manual de l'equip i Experiències I i II (EXAO)*, PIE, Barcelona (1992).
 CRAWFORD, F., *Ondas. Berkeley Physics Course, vol. 3.*, Reverté, Barcelona (1971).
 PANADÈS, J., *Tècniques informàtiques de laboratori*, PIE, Barcelona (1992).
 REGALES, J., "EXAO: Jornada de presentació als professors", *Revista de Física*, **3**, 57 (1992).
 VIDAL, F., "La física en els ensenyaments de ciències experimentals ...", *Revista de Física*, **1**, 42 (1991).

Consideracions finals

Tal com posàvem en evidència a l'inici d'aquest article, creiem haver palesat que l'equipament d'EXAO, situat en el context adequat en els centres, permet d'aprofundir en l'observació molt més enllà que no ho permeten les tècniques experimentals tradicionals, amb una considerable economia de temps i amb un augment de possibilitats d'aprofundiment. En aquest sentit, estem segurs que altres professors, des d'altres centres, podran fer moltes més aportacions, de les quals aquest article és només una mostra incipient.

Però creiem que en el treball que permet l'EXAO és totalment decisiva la incorporació de la feina i de les iniciatives dels usuaris (professors, almenys). Conduir correctament els alumnes a través de la munió de dades que resulten de les deteccions experimentals és una feina important per treure'n bon profit. Considerem, per exemple, els molts factors diversos que apareixen a l'estudi de les oscil·lacions forçades. Quin alumne, per si sol, seria capaç d'escatir la presència d'oscil·lacions transversals en el sistema? D'altra banda, sempre és possible d'afegir petits perfeccionaments casolans als dissenys generals que se'ns subministren. Considereu, per exemple, el sensor bobina al qual ens referim en aquest article. És en la confiança que el conjunt d'aquestes aportacions "menors" són cabdals que animo altres professors a contribuir, amb el seu treball, a l'aprofitament conjunt de l'EXAO.