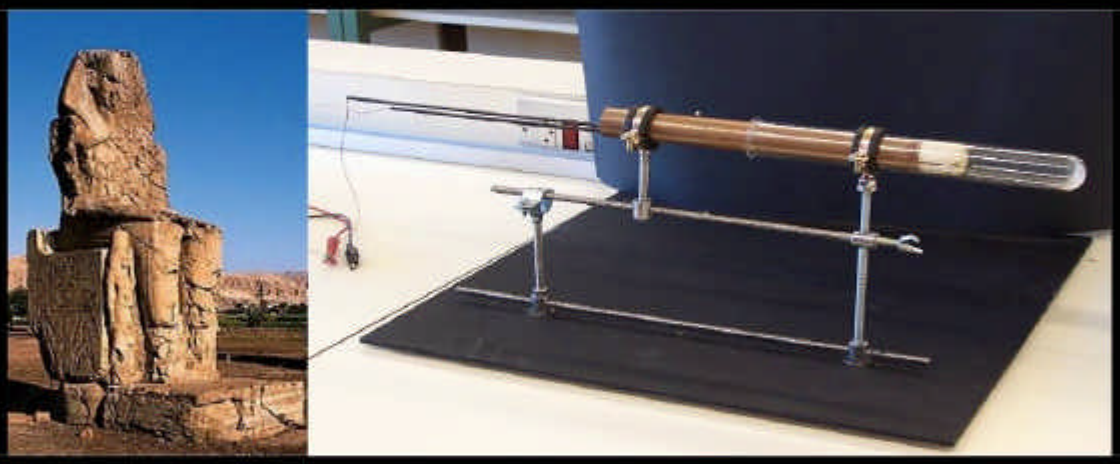
MEMNÒNIUM

LA TERMOACÚSTICA AL PALAU DELS CORRENTS D'AIRE



De Memnó al làser acústic

JAUME CLAPÉS INÉS ESCOLANO QUERALT SOLER

Treball de recerca

Física i Química

2n de Batxillerat

IES CASTELLAR

Curs 2009 – 2010

Aquesta memòria s'acompanya d'un CD amb un arxiu de vídeo on es pot sentir el so del Memnònium

Tutors: **Jaume Clapés Solé**

Inés Escolano Andrés

Queralt Soler Piñol

Tutors: **Antonio Cavero Barreu**

Miquel Calvet Solé

Febrer 2010

ÍNDEX

1. Introducció i objectius..... 1

1.1 Els perquès d'aquest treball..... 1

1.2 Els objectius..... 3

2 El precedent al món clàssic: la llegenda Memnó i el Memnònium..... 5

2.1 El mite..... 5

2.2 El monument..... 5

2.3 L'efecte termoacústic, la relació entre el mite i el monument..... 7

3 Estudi teòric del fenomen..... 9

3.1 Ones estacionàries en tubs sonors..... 9

3.2 L'efecte termoacústic..... 11

3.2.1 Descripció del fenomen..... 12

3.2.2 Una mica d'història..... 15

3.2.3 El làser acústic..... 16

3.2.4 El dispositiu termoacústic com a màquina i com a refrigerador..... 19

4 Disseny i construcció del nostres làsers acústics..... 20

4.1 Revisió dels dispositius ja existents..... 20

4.2 Primera aproximació: comprovació sobre tubs sonors comercials (singing pipes)..... 23

4.3 Segona aproximació: el nostre primer làser acústic..... 29

4.4 Els nostres prototipus finals..... 31

4.4.1 Disseny i construcció..... 31

4.4.2 Els dos prototipus finals..... 34

5 Anàlisis del so emès pels nostres làsers acústics..... 36

5.1 Estudis amb el "Memnònium 1"..... 36

5.1.1 Dependència del so emès amb la posició de l'stack..... 36

5.1.2 Estudi del so produït en diferents recipients..... 40

5.2 Estudis amb el "Memnònium 2"..... 42

6 Conclusions i projecció futura del treball..... 47

6.1 Conclusions..... 47

6.2 Projecció futura del treball..... 49

7 Bibliografia i webgrafia..... 51

1. Introducció i objectius

1.1. Els perquès d'aquest treball

El fil conductor d'aquest treball ens porta des d'un monument funerari dels temps dels faraons d'Egipte, passant per la mitologia grega, al recent dispositiu anomenat làser acústic, batejat així perquè els seus principis de funcionament tenen molt en comú amb el làser òptic. Per estrany que pugui semblar, el principi físic que hi ha al darrere del làser acústic, l'efecte termoacústic, és el mateix que produïa un curiós fenomen que tenia lloc al monument funerari fa uns 2000 anys.

El tema ens fou proposat pels nostres tutors del treball a finals del curs passat. A primera vista podria semblar d'una certa inconsciència comprometre's a hores i hores de feina sobre un tema que no sorgia de nosaltres mateixos i pel qual no sentíem una prèvia curiositat o interès. Malgrat això, d'ençà que se'ns presentà la idea a classe el vam trobar molt engrescador, sobretot un dels objectius que ens van proposar: dissenyar i construir un làser acústic nosaltres mateixos. Així mateix, la referència a la mitologia grega i la connexió amb el treball afegia al projecte un especial atractiu i en justificava la recerca.

L'argument suposa una certa continuació d'altres treballs realitzats al departament de Física i Química del nostre centre sobre temes relacionats amb l'acústica, com ara "/Construcció i estudi d'estructures sonores Baschet: Reixa i Cristall"/del curs 1998-99 i "/Estructures sonores Baschet: Plaques d'acer"/ del curs1999-2000. [1]

Pensar en el treball com l'evolució d'un fenomen natural que es donà segles enrere donava un cert grau de rellevància a la feina a realitzar. El fenomen que tenia lloc en el monument funerari tenia el seu origen en una esquerda provocada per un terratrèmol l'any 27 a.C. Resultava que, cada matí, l'escalfament produït per la sortida del Sol arrencava del monument uns sons que els visitants grecs van voler identificar amb els laments de Memnó, el personatge mitològic fill de la deessa de l'aurora que va morir al setge de

Troia, i d'aquí el nom de Memnònium. El monument sonava en virtut de l'efecte termoacústic, fet que va moure fa molt poc temps al professor Michael R. Duffey [2], de la Universitat George Washington de Washington, a traslladar les aplicacions de l'efecte termoacústic a l'àmbit musical, emulant en certa forma el cant del Memnònium. El professor Duffey porta un temps construint instruments capaços de produir música a partir de l'efecte termoacústic. Amb un d'aquests instruments, que es pot veure a la figura 1 i que es pot sentir a YouTube [2] es produeix allò que Duffey denomina com "música solar tèrmica".

El tema era prou atractiu com per llançar-nos a estudiar els detalls i realitzar el nostre propi instrument basat en l'efecte termoacústic, un instrument que actualment es coneix com làser acústic, per raons que hem citat abans i que explicarem en la memòria. De manera que també cal fer una petita referència a la coincidència que l'any 2010 es celebri el 50 aniversari de la invenció del làser òptic, la qual cosa pren rellevància donat el paral·lelisme entre ambdós dispositius.

Figura 1: Instrument per fer música solar tèrmica fabricat per M.R. Duffey [2]

Finalment, ja que el títol que hem donat al nostre treball es troba fora de la línia més formal i seriosa amb què hem fet la recerca, hem cregut convenient donar una petita explicació del seu perquè. "Memnònium, la termoacústica

al palau dels corrents d'aire" fa referència a la saga literària (i també cinematogràfica) d'origen suec, Millenium. Concretament, emula la tercera part de la trilogia de Stieg Larsson. La principal coincidència recau en la semblança, pel que fa a la fonètica, existent entre Millenium i Memnònium, això justifica la substitució d'una paraula per l'altra. De la mateixa manera, el fet que el tercer llibre tingui per títol *"La reina al palau dels corrents d'aire"* ens va acabar de convèncer, ja que en l'efecte que hem estudiat els "corrents d'aire" són els que produeixen les pertorbacions a dins del tub que donaran lloc a les ones sonores.

Fou així com vam decidir que aquest seria un bon títol pel treball, el qual sumaria atractiu al projecte pel públic no iniciat en el tema, ja que fa una clara referència a un món mediàtic i molt actual.

1.2. Objectius

Per dur a terme la nostra tasca ens vam fixar un programa amb unes etapes que exposem a continuació.

1. Havíem de realitzar una recerca històrica del fenomen a l'antiguetat clàssica, i relacionar-lo amb la mitologia.
2. Havíem de tenir els conceptes clars, i per tant havíem d'estudiar i entendre els fonaments tant de la teoria de les ones –sobre tot els tubs sonors- com de l'efecte termoacústic.
3. La següent etapa havia de ser una recerca a la web sobre els dispositius i els sistemes que ja utilitzen l'efecte termoacústic. Un cop feta aquesta recerca, havíem de provar el funcionament d'algun sistema ja existent.
4. La part més interessant del nostre programa: havíem de dissenyar i construir un dispositiu basat en l'efecte termoacústic, un làser acústic.
5. Finalment, havíem de posar-lo a punt, calibrar-lo i experimentar amb ell.

D'acord amb el que acabem d'enunciar, els objectius del nostre treball han estat els següents:

1. Posar-nos al dia, documentar-nos i realitzar un estudi dels aspectes mitològic i històric del fenomen que va tenir lloc entre els anys 27 a.C. i 199 d.C., relacionat amb el cant del Memnònium.
2. Analitzar els fonaments teòrics de la ressonància en tubs sonors i de l'efecte termoacústic. Igualment, informar-nos sobre els fonaments del làser òptic, per poder establir comparacions amb el làser acústic.
3. Analitzar els dispositius ja existents que utilitzen l'efecte termoacústic per convertir energia tèrmica en energia sonora. Fer-nos amb alguns models, fer-los sonar i analitzar el seu funcionament.
4. Dissenyar, construir i calibrar el nostre propi làser acústic.
5. Realitzar experiències amb el nostre làser i obtenir-ne conclusions.

2. El precedent al món clàssic: la llegenda de Memnó i el Memnònium

2.1. El mite

La mitologia grega ens explica que Memnó, rei d'Etiòpia, era fill d'Eos (la deessa de l'Aurora) i de Titón. Assabentat del setge de Troia, ciutat de la que el seu oncle era rei, Memnó va reunir un nombrós exèrcit d'etíops per acudir en ajut de la ciutat. Fou un brau guerrer i arribà a convertir-se en un heroi. Durant una de les batalles que lliurà va donar mort a Antíloc, quan aquest intentava cobrir la retirada del seu pare Nèstor. Aleshores Aquiles, fill de Peleo i Tetis i amic d'Antíloc, s'enfrontà a Memnó i el matà per venjar el seu gran amic.

La mort de Memnó va caure com un llamp sobre la seva mare Eos, que mai tornaria a ser la mateixa. En saber del combat entre el seu fill i Aquil·les, Eos havia anat a veure a Zeus, i aquest havia concedit, tot sospesant els destins d'ambdós herois, la vida eterna pel seu fill. En finalitzar el combat, la deessa va ordenar als seus altres quatre fills (els quatre vents: Nord, Sud, Est i Oest) que anessin a buscar el cadàver del seu germà. Eos va plorar tota la nit i es diu que la rosada que cada matí trobem són les seves llàgrimes. La història de la batalla de Memnó ha estat relatada més d'un cop, amb diverses variants, i en trobem exemples als poemes desapareguts de *La Petita Troia i de L'Etiòpida*.

2.2. El monument

Deixem de moment el mite grec, i ara ens centrem en un monument situat a les proximitats de Medinet Habu, a la ciutat de Thebes, propera a Luxor, a la ribera del riu Nil. Allà va ser on el faraó Ahmenhotep III se'l feu construir com a temple funerari pels volts de l'any 1350 a.C. Va ser un dels temples més grans i ostentosos de la regió. A l'entrada d'aquest edifici hi va fer construir dues rèpliques seves de mida gegant que guardarien l'entrada a la tomba.

Figura 2: Situació de Thebes, a l'antic Egipte

Figura 3: Els Colossos de Memnó, o Memnònium

Els dos colossos estan fets a base de blocs de quarsita que van ser transportats uns 675 kilòmetres des d'una pedrera al nord d'Assuan. Les dues estructures, amb un pes que volta les 700 tones cadascuna, tenen una alçada d'entre 18 i 21 metres. Estan separats per una distància de 15 metres i orientades a l'est, a la sortida del Sol i a les aigües del riu Nil. A la seva base trobem també les imatges de la reina Mutemuia i de l'esposa del faraó, Tiyi. Les representacions del faraó han suportat les adversitats climatològiques i turístiques al llarg dels temps i han pogut arribar a la nostra era en un estat força digne. És cert que les inscripcions que es troben a la part inferior del monument han canviat totalment i que s'hi ha afegit de noves per part dels nombrosos visitants que han rebut al llarg dels anys. Tot i que tenim constància, segons textos antics, de la inicial semblança d'ambdues figures, avui en dia és gairebé impossible apreciar els matisos de l'obra.

També cal dir que a l'actualitat és difícilment recognoscible el faraó egipci en els blocs de roques amorfes en que s'han transformat. Però, igualment, conserven la seva presència i imposa la seva grandesa. El conjunt és anomenat pels locals com *Es-Salamat* o *El-Colossat*, però generalment rep el nom de Memnònium, cosa que ens planteja la relació entre el monument que acabem de descriure i el mite a què hem dedicat l'apartat 2.

2.3. L'efecte termoacústic, la relació entre el mite i el monument

Efectivament, és en última instància la física, i més concretament l'efecte termoacústic, la que explica el nexe entre el mite i el monument. I, de retruc, serveix de base a aquest treball.

Ens situem a l'any 27 a. C., quan un fort terratrèmol que sacsejà la regió va produir una fractura vertical des de la part superior fins a l'altura dels malucs a l'estàtua d'Amenhotep III situada més a la dreta. A partir d'aquell moment, amb la sortida del Sol la figura emetia durant una estona un so especial, amb un to més o menys regular, semblant a un lament. Aquest so provocà que l'atenció dels habitants de la zona i també dels visitants recaigués en aquella construcció de quarsita. Va ser així com es va crear tota una llegenda sobre el monument. Els primers grecs que arribaren a la ciutat durant el període helenístic, en sentir parlar d'un so trist que només apareixia amb l'aurora, van voler relacionar-lo amb el mite de Memnó, i justificaven l'estrany so argüint que era un cant de salutació de l'estàtua a la seva mare, Eos, precisament deessa de l'aurora. La ressemblança entre la pronunciació del nom del primitiu titular de l'estàtua, Amenhotep, i el nom de Memnó ajuda també a explicar el canvi de nom. El fet és que qui estava representat a l'estàtua va passar a ser Memnó, i el conjunt a ser conegut com Memnònium.

Més tard, els romans el van convertir [3] en un indret de visita obligada quan viatjaven a Egipte, tot i que mai li van atribuir un caràcter sagrat com ho van fer els grecs. De fet, van ser els romans els que van descobrir una certa relació del fenomen del monument amb la física. L'explicació era que el canvi de temperatura, al començament del dia, provocava l'evaporació de l'aigua, que al sortir per les fissures del colós produïa el peculiar so.

Cada cop eren més les persones que s'apropaven a Thebes per tal de sentir el cant de Memnó. S'havia convertit en un lloc de pelegrinatge, en part degut a que es pensava que qui sentia el cant de Memnó tindria molta més sort al seu camí. Moltes personalitats es van apropar a veure el fenomen amb

els seus propis ulls i van deixar la prova de la seva visita i el testimoni de les seves impressions al respecte en forma d'inscripcions a la base de la figura.

Un exemple el trobaríem a l'emperador Hadrià i la seva dona, Sabina, que van visitar el Memnó l'any 130 d. C.

L'estàtua aturà el seu cant l'any 199 d.C. , quan l'emperador Septimus Severus ordenà la seva reparació i, en conseqüència, el final de l'efecte termoacústic en l'ídol. [4] i [5]

La llegenda ha estat així explicada en diverses fonts [6], [7] i [8], i cal ressenyar que la seva fama fou relativament gran, fins al punt que Schubert li va dedicar un dels seus lieder. [9]

La importància d'aquest fenomen, que va tenir lloc fa tants segles de forma totalment casual, recau en el fet que va ser el primer cop que l'ésser humà presenciava les conseqüències de l'efecte termoacústic de manera semi-natural.

3. Estudi teòric del fenomen

En aquest apartat, una vegada establert el precedent històric del fenomen que anem a estudiar, ens disposem a revisar les bases teòriques per poder explicar-lo. Així, necessitem el coneixement de les ones, i d'algun fenomen ondulatori com els modes de vibració. Però com que aquests temes formen part del currículum de segon de batxillerat, ens limitarem a recordar alguns aspectes que tenen incidència pel nostre treball, com els modes d'oscil·lació en tubs sonors. A les referències [10] a [20] podem trobar bona part de la informació sobre les ones que hem fet servir. En canvi analitzarem més detingudament l'efecte termoacústic, ja que es tracta d'una novetat per nosaltres en no ser recollit pel temari de segon de batxillerat. Igualment dedicarem una mica d'espai a la comprensió dels principis del làser òptic.

3.1. Ones estacionàries en tubs sonors

Les ones estacionàries es poden donar en tubs de tres maneres diferents, tenint en compte si els tubs són oberts pels dos extrems, per un o per cap. L'exemple més quotidià d'aquest tipus d'ones el trobem amb els instruments musicals de vent. Pel nostre treball és un tema fonamental ja que en el fons ens proposem construir un tipus de tub sonor en el qual la pertorbació es produirà per diferència de temperatures.

En un tub una pertorbació induïda provoca la compressió de les partícules de l'aire, que empenyen les contigües, i així successivament, produint el moviment ondulatori. La pertorbació es pot produir per exemple bufant per una escletxa com a la flauta, o per altres mètodes com veurem en aquest treball. Una vegada tenim l'ona sonora introduïda al tub, es poden produir els fenòmens de reflexió i superposició d'ones. Estudiarem ara les ones estacionàries produïdes en tubs tancats per un extrem, o oberts pels dos extrems, ja que són els dos tipus de tubs que apareixen en el nostre treball.

- Tubs tancats per un extrem

En el cas dels tubs tancats per un extrem, l'ona només es troba limitada per un cantó, i l'altre està obert. Això es tradueix en el fet que al cantó tancat hi ha un node (punt d'oscil·lació nul·la), ja que l'aire no pot oscil·lar, mentre que al cantó obert hi ha un ventre o antinode (punt d'oscil·lació màxima), ja que l'aire l'interior comunica plenament la seva oscil·lació a l'aire exterior.

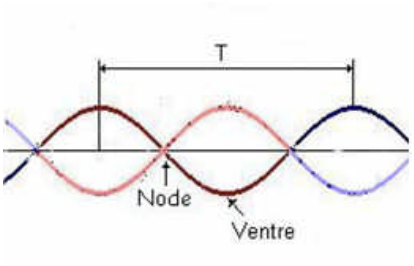
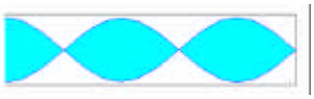


Figura 4. Configuració del medi en una ona estacionària [18]

L'espectre de longituds d'ona que poden ressonar en aquest tub ve donat per l'equació (1), i els primers tres modes es poden veure a la Taula 1.

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n-1} \qquad (1)$$

Gràfica	Nodes	Ventres	λ ?	ν ?	Harmònics
	1	1	4L	$\frac{v}{4L}$	Fonamental, 1
	2	2	$\frac{4L}{3}$	$\frac{3v}{4L}$	2
	3	3	$\frac{4L}{5}$	$\frac{5v}{4L}$	3

Taula 1: Modes de vibració d'un tub tancat per un extrem

- Tubs oberts pels dos extrems

Pel mateix raonament que en el cas anterior, en un tub obert pels dos extrems podem concloure que hi haurà un ventre a cadascun dels extrems. L'equació 2 ens permet obtenir l'expressió per les longituds d'ona ressonants en aquesta mena de tubs, i la Taula 2 ens mostra els tres primers modes d'oscil·lació.

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (2)$$

Gràfic	Nodes	Ventres	λ ?	ν ?	Harmònics
	1	2	2L	$\frac{v}{2L}$	Fonamental 1
	2	3	L	$\frac{v}{L}$	2
	3	4	$\frac{2L}{3}$	$\frac{3v}{2L}$	3

Taula 2: Modes de vibració d'un tub obert pels dos extrems

3.2. Efecte termoacústic

D'acord amb la definició estricta, l'efecte termoacústic és un fenomen que té lloc per la interacció d'un fluid compressible amb unes parets sòlides, i consisteix en la transformació entre l'energia tèrmica i l'energia mecànica d'una ona acústica [21]. Aquest efecte, descrit per primer cop de manera formal en 1975, continua essent avui objecte d'estudi per arribar a una comprensió total, i se'n van trobant encara noves aplicacions. Com que la

part teòrica del nostre treball es basa principalment en aquest efecte, l'estudiarem ara amb un cert deteniment. [22]

3.2.1. Descripció del fenomen

Considerem un tub de vidre que pugui fer de ressonador, com el de la figura 5. Si a l'interior hi posem una peça com la que es veu a la dreta, que disposa d'una gran quantitat de conductes pels quals pot circular lliurement l'aire, tindrem el dispositiu bàsic per observar l'efecte termoacústic. La peça interior que estem descrivint, que actua com regulador de temperatura i habitualment és de ceràmica, s'anomena correntment stack, i així l'anomenarem nosaltres. [23]

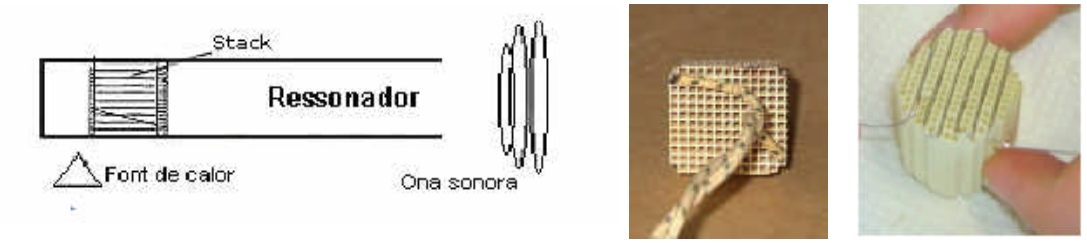


Figura 5 : Diagrama descriptiu d'un dispositiu que exemplifica l'efecte termoacústic [23], i detall de dos tipus de stack.

Quan en un tub tancat per un extrem es produeix una pertorbació, per exemple quan es bufa per l'extrem obert de forma esbiaixada, el tub ressona: es produeix una ona estacionària, de les que hem estudiat a l'apartat anterior, i podem sentir alguns dels modes de vibració. Això és el que passa, per exemple, en una flauta de bec, en la qual s'introdueix l'aire per un forat estret, i aquesta pertorbació genera les ones estacionàries. En un dispositiu termoacústic, el fonament és el mateix, però la pertorbació ara es produeix gràcies a un gradient de temperatura a l'interior del tub.

La figura 6 ens ajuda a entendre els moviments de l'aire en el tub ressonador, en el qual es produeixen ones longitudinals. L'aire entra i surt en el tub, i vibra longitudinalment en el seu interior. Com que es tracta d'un tub tancat per un extrem, en aquest extrem la velocitat de l'aire ha de ser nul·la (node), mentre

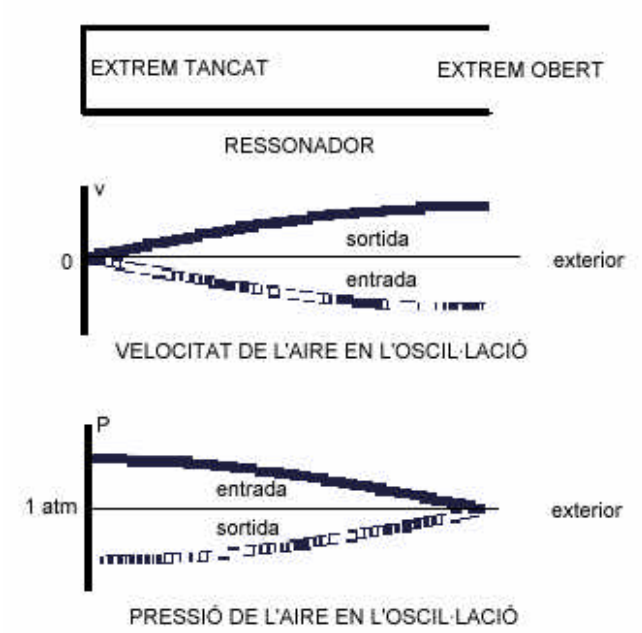


Figura 6: Diagrama de variació de la velocitat i la pressió de l'aire en funció de la posició en el tub. Quan l'aire entra, la velocitat de l'oscil·lació (cap a l'esquerra, negativa) es va reduint progressivament, i a l'extrem final (node) és nul·la. En canvi la pressió va augmentant, i és màxima en la zona propera a l'extrem tancat. Quan l'aire surt, la velocitat també és màxima (cap a la dreta) a l'extrem obert, mentre que ara la pressió de l'extrem tancat també es minimitza. [24]

que a l'extrem obert ha de ser màxima (ventre). El diagrama superior mostra les velocitats de l'oscil·lació de l'aire quan omple el tub (línia inferior més feble, velocitats negatives de dreta a esquerra), i quan torna a sortir (línia superior més forta, velocitats positives). En els dos casos es veu clar que la velocitat és nul·la a l'extrem tancat i màxima a l'extrem obert.

El diagrama inferior de la figura mostra les pressions de l'aire en el procés d'entrada i sortida. A l'entrada (línia superior més forta), l'aire queda comprimit a la zona de l'extrem tancat, i la pressió és superior a la de l'exterior (1 atm).

Pel contrari, a la sortida, en desplaçar-se l'aire cap a fora en la seva vibració, la pressió en la zona de l'extrem tancat queda per sota de l'atmosfèrica.

Fins aquí el procés normal que té lloc en qualsevol ressonador. Veiem ara quin és el paper de l'stack en la producció de l'efecte termoacústic.

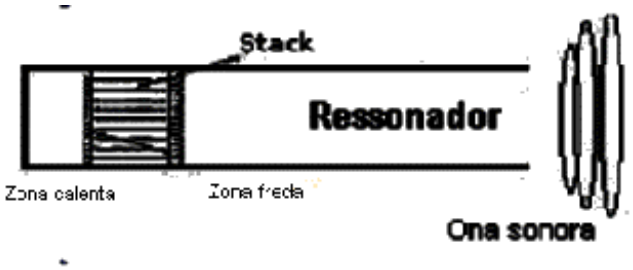


Figura 7: Esquema explicatiu del làser acústic.

Imaginem que aconseguim separar dues zones al ressonador, de manera que la que està a prop de l'extrem tancat estigui a més temperatura que l'altra. Quan l'aire arriba a la zona més interior, la seva pressió és més alta, com ja hem vist. Però si en aquesta zona mantenim una temperatura més alta que a la resta del tub, l'aire s'escalfarà i la seva pressió encara serà més gran. Com a conseqüència, fluirà cap a fora amb més velocitat de la que ho faria sense el gradient tèrmic. I és aquí on intervé l'stack. Serveix per separar dues zones del tub, una més calenta que l'altra, i l'aire és obligat a passar ràpidament pels seus conductes, produint una pertorbació que genera les ones estacionàries. La base és que els dos extrems de l'stack estiguin a temperatura diferent. El que està més a prop de l'extrem tancat ha d'estar més calent, i el que està més a prop de l'extrem obert ha d'estar més fred. L'energia tèrmica que subministrem al tub per mantenir el gradient tèrmic es transforma així en energia sonora i ja tenim l'efecte termoacústic.

L'efecte termoacústic té lloc doncs, quan en el curs de la vibració de l'aire entren en fase els canvis de temperatura, desplaçament i pressió dins del tub i, alhora, dins de l'stack. Això s'aconsegueix afegint escalfor a la part tancada del tub, que és on la pressió és màxima, és a dir, quan l'aire ha acabat d'entrar.

D'aquesta manera, incrementem la pressió per sobre del seu màxim. A continuació es dóna l'altra part del procés, quan l'aire continua el cicle i es dirigeix cap a l'exterior del tub, el gradient tèrmic creat per l'stack provoca que l'aire es refredi. Al moment en què l'aire ha acabat de sortir la pressió dins del ressonador és mínima, i a causa del refredament de l'aire la pressió disminueix per sota del seu mínim. És així com, mitjançant aquest procés d'escalfament i refredament de l'aire, l'ona acústica és amplificada pel fenomen de l'efecte termoacústic, aconseguint així que s'emeti un so de to regular audible. [24]

3.2.2. Una mica d'història

Figura 8: Bufador de vidre [25]

En aquest moment ja estem en situació d'entendre que el monument del Memnó, o Memnònium, va ser el primer exemple enregistrat a la història de l'efecte termoacústic. Quan el Sol escalfava al matí l'aigua que havia quedat retinguda dins les esquerdes, alguna cavitat feia de ressonador, i algun pas més estret feia de stack. És doncs la primera constatació del fenomen.

Segles més tard tornem a trobar referències. Els bufadors de vidre del segle XVIII utilitzaven uns tubs llargs, a un extrem es trobava el vidre fos a una gran temperatura, mentre que el cantó oposat l'aire de l'interior del tub es mantenia a temperatura ambient i era per aquí que bufaven. Quan el treballador deixava d'aplicar aquest corrent d'aire, l'extrem amb menor temperatura quedava obert i es podia sentir l'emissió d'un fort so (figura 8). El primer que va intentar donar una explicació d'aquest fet va ser Sondhauss

l'any 1850, i és per això que un tub d'aquestes característiques, com el que podem veure a la figura 9 rep el seu nom. Ell assegurà que es pot variar una ona acústica, atenuant-la o excitant-la, afegint o extraient calor en els moment de màxima i mínima pressió.

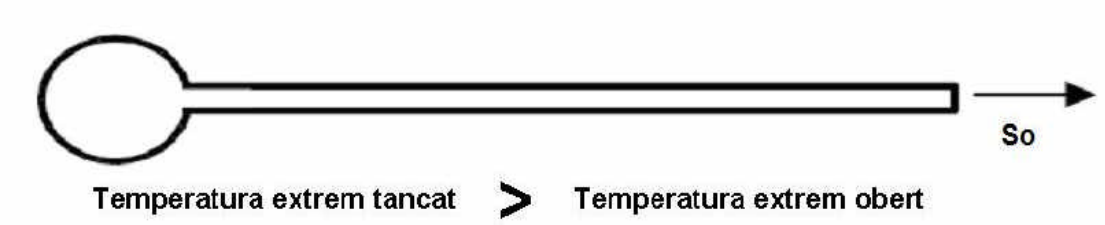


Figura 9: Tub de Sondhauss [21]. El seu funcionament es basa en certa manera en l'efecte termoacústic. Si l'extrem tancat del tub està a més temperatura que l'extrem obert, la sobrepressió de la zona de l'extrem tancat fa que l'aire flueixi cap a l'altra part, i es produeix el so, que dura mentre es manté la diferència de temperatura.

La recerca en aplicacions de l'efecte termoacústic ha rebut una empenta relativament recent. De fet, fou l'any 1962 quan Carter i col·laboradors van trobar la manera de millorar el so produït per aquest dispositiu introduint l'stack a dins del tub. Posteriorment, diversos equips d'investigadors analitzen les possibilitats d'utilitzar l'efecte en la forma oposada: a partir d'energia sonora obtenir energia mecànica o també produir refrigeració (Merkli i Thomann, 1975). [21]

3.2.3. El làser acústic

Darrerament s'ha introduït la denominació làser acústic per un dispositiu com el de la figura 7, capaç de produir una ona sonora a partir d'una diferència de temperatura. La denominació podria semblar una ocurrència sense fonament, però no ho és, perquè com veurem ara, entre aquest dispositiu i el làser òptic existeix un gran paral·lelisme, posat de manifest per la figura 10.

En primer lloc revisem les característiques del làser òptic. No es tracta de donar-ne una gran explicació, que no està al nostre abast, sinó simplement de revisar-ne els fonaments.

Entenem per làser òptic un dispositiu que produeix una ona monocromàtica i coherent a partir d'una situació de desequilibri energètic. Les inicials LASER volen dir textualment Amplificació de Llum per Emissió Estimulada de Radiació. Però veiem les característiques essencials d'un dispositiu làser:

1) Una cavitat de ressonància òptica on es puguin produir ones estacionàries, habitualment amb un mirall a cada extrem de forma que les ones lluminoses es reflecteixin i es superposin a l'interior.

2) Un medi material en "inversió de població", és a dir, en un estat de desequilibri energètic, i una font d'energia externa que mantingui aquest estat de dissimetria energètica. En el medi material ha d'haver més àtoms en estat energètic alt o excitat que baix. Gràcies a això es pot provocar l'emissió estimulada, en la qual la radiació electromagnètica estimula l'emissió de noves ones electromagnètiques a partir dels àtoms excitats. En travessar el medi material les ones provoquen així, que part de l'energia que té aquest medi per la seva inversió de població passi a les ones, i es produeix aleshores una amplificació.

3) Una sortida parcial de l'energia acumulada a la cavitat ressonant, que es fa per un dels dos miralls (parcialment reflectant) permet una certa transmissió.

Paral·lelament, aquestes característiques també les trobem en el làser acústic:

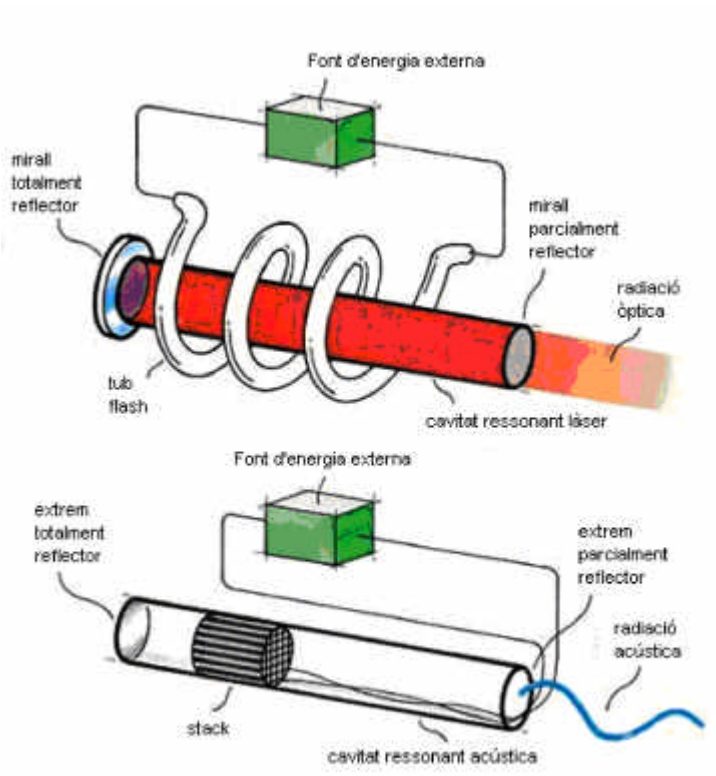
1) Hi ha una cavitat de ressonància, ara acústica, que és el tub, on es produeixen ones estacionàries a partir de les ones que van i que venen. Un dels dos extrems reflecteix totalment les ones (el tancat), i l'altre extrem les deixa sortir.

2) Existeix també una situació inicial de desequilibri energètic en el medi, aquesta vegada amb la temperatura. Hi ha un gradient tèrmic a ambdós

extrems de l'stack, i aquest gradient s'ha de mantenir per l'acció d'una aportació energètica externa.

3) Es permet una sortida parcial de l'energia sonora, per l'extrem obert del tub.

Les analogies són doncs considerables, i el nom està justificat. La taula de la figura 10 recull un resum d'aquest paral·lelisme.



TRETS COMUNS DELS LÀSERS ÒPTIC I ACÚSTIC

1) Cavitat de ressonància amb ones estacionàries

2) Medi material amb una situació de desequilibri energètic (inversió de població en el cas òptic i gradient de temperatura en el cas acústic), que cal mantenir amb una font d'energia externa

3) Un dels extrems de la cavitat permet la sortida parcial d'energia

Figura 10: Paral·lelisme entre el làser òptic i el làser acústic [25]

3.2.4. El dispositiu termoacústic com a màquina i com a refrigerador

Un làser acústic converteix energia tèrmica en energia acústica o sonora. En els darrers anys s'han posat en marxa diversos projectes per produir justament l'efecte contrari: a partir d'una ona sonora, provocada per un altaveu, aconseguir una diferència de temperatura, i en particular un efecte de refrigeració. El funcionament d'un refrigerador així és invers al d'un làser acústic, però es fonamenta en els mateixos principis. L'stack actua com intercanviador de calor. El dispositiu pot funcionar com un refrigerador i com una màquina, i tot i estar lluny dels objectius d'aquest treball, serveix per mostrar com aquest tema està de plena actualitat i pot tenir encara molt desenvolupament. En alguns dels treballs de la bibliografia es pot trobar abundant informació sobre aquestes tècniques. [25]

Figura 11: Imatge d'un petit dispositiu o màquina funcionant gràcies a l'energia calorífica d'una flama i l'acció de l'intercanviador de calor (stack), en aquest cas reduït a un petita quantitat de llana d'acer atapeïda.

4. Disseny i construcció del nostres làsers acústics

Al capítol anterior ja hem vist que els dispositius que produeixen efecte termoacústic amb un stack poden ser qualificats de làsers acústics. Doncs bé, ens hem posat a la feina per construir un de nostre, i fer-lo funcionar. Al final, enlloc d'un n'hem construït dos, després d'un llarg camí que explicarem en aquest capítol.

4.1. Revisió dels dispositius ja existents

Com a primera mesura, hem revisat la xarxa internet per trobar els dispositius ja existents que utilitzen l'efecte termoacústic, els possibles làsers acústics. Les nostres troballes es poden resumir en els següents apartats.

1) Dispositius de tub amb els dos extrems oberts.

S'anomenen "singing pipes", o tubs de Rubens, i es poden trobar comercialment per fer demostracions d'acústica, en particular de pulsacions o batecs. És possible trobar els fonaments i també vídeos demostratius tal com es veu a la figura 12. [26]

Figura 12: Alguns tubs de Rubens en funcionament. [27] i [28]

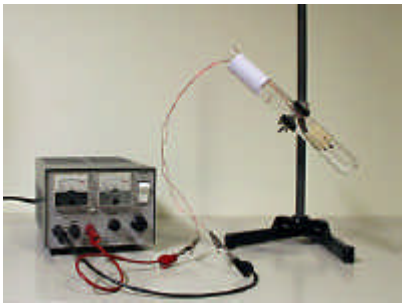
2) Dispositius amb tubs on el gradient de temperatura es produeix escalfant amb un bunsen o un bufador des de fora del tub.

Aquest tipus de làsers acústics, en general costa bastant aconseguir que sonin, perquè el sistema d'escalfament exterior és poc eficient (veure figura 13).

Figura 13: Un parell de tipus de làsers acústics accionats amb escalfament exterior, amb bufador de gas i cremador d'alcohol. [29] i [30]

3) Dispositius amb tubs que aconsegueixen el gradient de temperatura escalfant internament amb una resistència elèctrica (veure figura 14).

Aquesta categoria de làsers acústics és la més nombrosa, i se n'han desenvolupat diversos tipus, més o menys sofisticats, però sempre utilitzant una resistència de nicrom o un altre conductor dels habitualment emprats per calefactors.[31], [32] i [33]



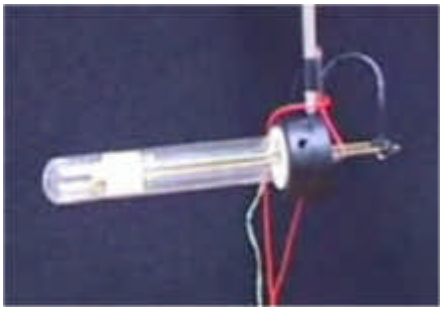


Figura 14: Làsers acústics que utilitzen una resistència calefactora interna per produir el gradient de temperatura. [34], [35], [36] i [37]

4) Dispositius amb tubs de vidre o parcialment de vidre que aconsegueixen el gradient de temperatura amb energia solar (veure figura 15).

Figura 15: Imatges de diferents exemples d'instruments termoacústics solars. [38], [39], [40] i [41]

Les quatre categories de dispositius que hem ordenat aquí constitueixen, en realitat, part del programa del nostre treball. Ens hem dedicat a posar a punt successivament dispositius de cada categoria. Però ens hem hagut d'aturar

en els làsers amb escalfament elèctric interior. La quarta categoria, la més ambiciosa, la del làser acústic amb gradient tèrmic produït per energia solar, supera les nostres disponibilitats de temps. Aquest treball constitueix un crèdit de recerca de batxillerat, i no pot ser més extens. Però queda obert a futurs aprofundiments.

4.2. Primera aproximació. Comprovació sobre els tubs sonors comercials (singing pipes)

Com a primera etapa del nostre projecte de disseny i construcció d'un làser acústic hem analitzat uns dispositius que ja existeixen en el mercat i que s'utilitzen per demostracions didàctiques. Es tracta dels tubs sonors o singing pipes. Se'n poden trobar referències [42], i també vídeos demostratius [43] i [44].

Característiques i funcionament

Els singing pipes que hem analitzat són uns tubs d'acer d'uns 0,40 metres d'alçada i un diàmetre exterior al voltant de 0, 05 metres, amb una reixeta d'acer inoxidable col·locada a l'interior com indica la figura 16.

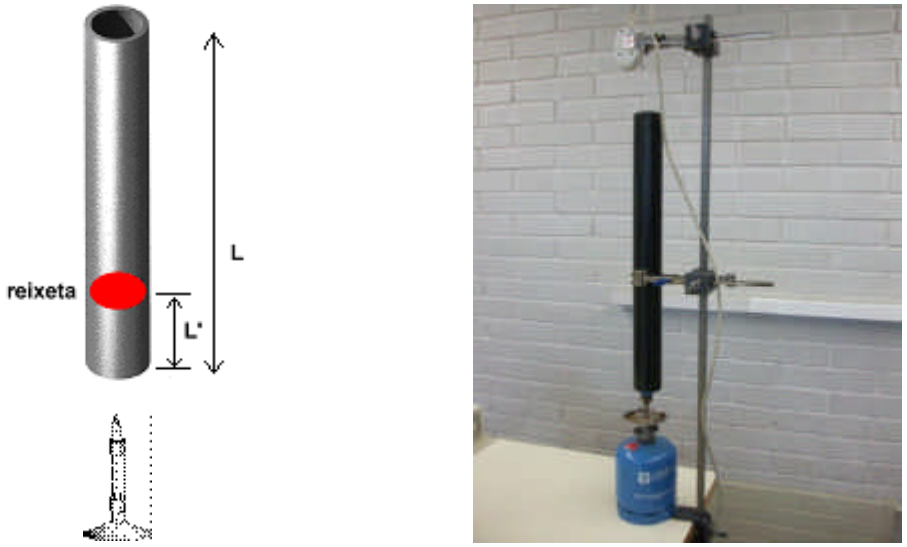


Figura 16: Esquema i imatge d'un tub sonor (singing pipe). La imatge mostra el muntatge que hem posat a punt amb el sensor micròfon per la captació de dades i el seu tractament per ordinador.

Estan oberts pels dos extrems, i en escalfar la reixeta amb un bec de Bunsen, tal com es mostra a la figura 16, comencen a sonar. L'efecte sonor, que pot durar fins a uns 30 segons amb un escalfament previ de 10 segons, es produeix perquè l'escalfament de l'aire de la part baixa del tub el força a pujar; en travessar la reixeta es produeixen unes turbulències que generen una pertorbació acústica. En funció de les dimensions del tub, algunes de les freqüències sonores produïdes poden ressonar, i es generen modes de vibració. Es tracta, per tant, d'un tub sonor dels que hem estudiat a l'apartat 3.3 amb la particularitat que la pertorbació que genera l'ona estacionària no es produeix bufant, com en la majoria de tubs musicals, sinó per la diferència de temperatura entre la part baixa i la part alta del tub. En aquest sentit, és un primer exemple de l'efecte termoacústic.

- Muntatge i material

Per analitzar el so emès per aquest tub disposem d'un equipament Multilab d'experimentació assistida per ordinador, amb software, consola i sensor micròfon (Rang dinàmic: -2,5 V a + 2,5 V; Sensibilitat: 57-117 dB; Freqüència de resposta: 35 a 5800 Hz). Aquest equipament ens permet processar directament les dades experimentals obtingudes. Hem utilitzat aquest equip

amb una configuració de mesura de 20800 mostres per segon, en mesures de 0,72 s, per tant en cada mesura hem analitzat 15000 punts, precisió més que suficient pels nostres propòsits.

El software permet processar directament el senyals sonors i obtenir-ne la distribució de freqüències mitjançant el teorema de Fourier.

El muntatge es mostra a la figura 16, on es pot veure el sensor micròfon que va connectat directament a la consola de captació de dades i a l'ordinador.

- Anàlisis i resultats

Per realitzar les anàlisis disposem de dos tubs sonors d'aproximadament la mateixa longitud L, i que només difereixen en la posició de la reixeta, caracteritzada pel paràmetre L' (veure figura 16). Amb aquests dos tubs ens hem proposat analitzar la freqüència del so emès per cadascun, la dependència amb els paràmetres L' i amb la posició (vertical, inclinada...) del tub, i també l'efecte que es produeix quan sonen els dos tubs simultàniament. La taula 3 recull les característiques dels dos tubs.

	Singing pipe 1	Singing pipe 2
L (m)	0,430	0,425
L' (m)	0,060	0,068
Diàmetre exterior (m)	0,048	0,047
Diàmetre interior (m)	0,040	0,040

Taula 3

Anàlisi de les freqüències emeses per cada tub

La taula 4 i la figura 17 mostren clarament que a l'espectre de freqüències dels tubs hi trobem només la freqüència fonamental o primer harmònic i el segon harmònic, de freqüència doble. Tot això està d'acord amb la teoria explicada a l'apartat 3.3 pels tubs oberts pels dos extrems, que recordem a la taula 5.

	Singing pipe 1	Singing pipe 2
Freqüència harmònic n=1 (Hz)	385,493	377,173
Freqüència harmònic n=2 (Hz)	770,987	755,733

Taula 4

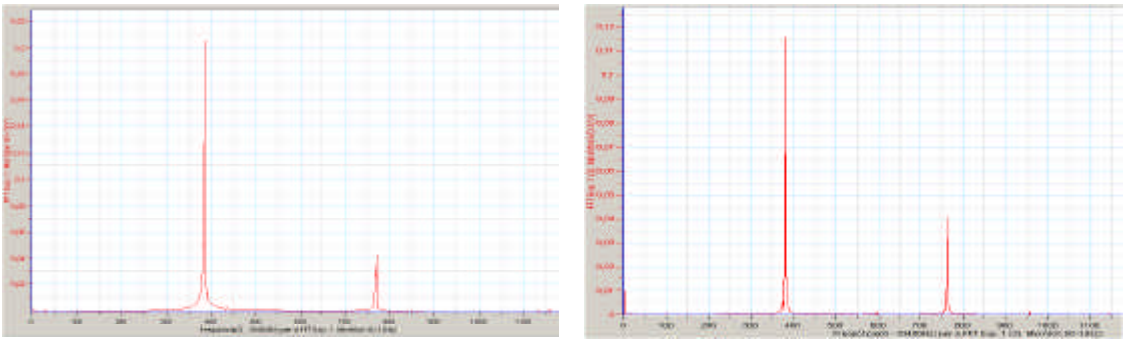


Figura 17: Espectre de freqüències dels singing pipes 1 i 2

Gràfic	Nodes	Ventres	λ	ν	Harmònics
	1	2	2L	$\frac{v}{2L}$	Fonamental 1
	2	3	L	$\frac{v}{L}$	2

Taula 5

En general

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \text{ i } \nu = \frac{nv}{2L} \quad (3)$$

on v és la velocitat de propagació del so en el tub.

En quant als resultats numèrics, per calcular la freqüència teòrica que correspondria a tubs de L=0,340 m i L=0,425 m cal conèixer la velocitat de propagació del so en el tub, que ve donada per l'expressió:

$$v_s \approx 331.4 + 0.61 \cdot t \quad (4)$$

i que varia de forma aproximadament lineal amb la temperatura per valors de l'ordre de la temperatura ambient. [45]

Si la temperatura de l'interior de tub fos uniforme i igual que la temperatura ambient, agafant per aquesta temperatura un valor normal com 20º C, la velocitat resultaria de l'ordre de 340 m/s i els valors teòrics esperats per la freqüència de l'harmònic fonamental en els dos tubs, segons l'expressió (3), serien de 395 Hz i 400 Hz.

Com es veu, aquests valors no acaben de quadrar amb els obtinguts experimentalment, però és evident que en aquest tipus de tub cal descartar la suposició de la uniformitat de la temperatura a l'interior, ja que pel propi disseny de l'aparell la temperatura és molt superior a la part inferior que a la superior, i a més, molt més gran que la temperatura ambient. Les prediccions teòriques no són, per tant, vàlides.

En quant a la diferència entre els valors trobats a les freqüències dels tubs 1 i 2 són el resultat, més aviat que de la diferència de longitud total L (que no arriba al 1%), de la diferent posició de la reixeta (L´), que modifica de forma significativa la distribució de temperatures a l'interior. (veure figura 18)

Figura 18: Imatge de les reixetes dels dos tubs sonors.

Hem realitzat proves amb els tubs inclinats o totalment horitzontals. Amb una mica d'inclinació es modifica lleugerament la freqüència dels harmònics, però posats en direcció horitzontal els tubs deixen de sonar. L'explicació és evident: el fenomen es basa en el corrent d'aire generat des de la part baixa, més calent, a la part alta, on és més fred. En posició horitzontal el flux avall-amunt no té sortida per les boques del tub, i el fenomen no es produeix.

- Anàlisis de les freqüències dels dos tubs alhora

Figura 19: Muntatge per l'estudi del so emès simultàniament per dos singing pipes

Amb un muntatge com el de la figura 19 hem analitzat també el so emès pels dos tubs alhora. Com que les freqüències són molt properes, es formen pulsacions, amb un interès afegit: pulsacions superposades entre els primers i

els segons harmònics de cada tub. L'interessant resultat es pot veure a les figura 20, on es mostren les pulsacions o batecs i l'espectre de freqüències.

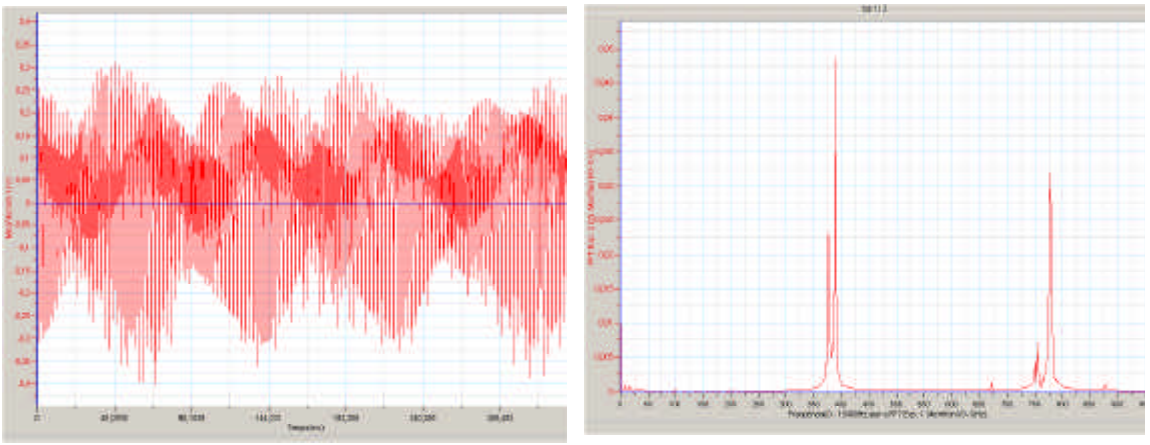


Figura 20: A l'esquerra, la gràfica de les pulsacions observades a partir del so dels dos singing pipes. A la dreta, l'espectre de freqüències. Mostra com hi ha dos sistemes de pulsacions, un pels primers harmònics i un altre pels segons. La superposició dels dos sistemes de pulsacions es pot intuir a la figura de l'esquerra.

4.3. Segona aproximació: el nostre primer làser acústic

Procedint amb el nostre programa, després d'analitzar els tubs sonors o "singing pipes", hem realitzat unes proves inicials per tal de comprovar la possibilitat de produir l'efecte termoacústic amb materials simples i quotidians.

L'aparent facilitat de construcció i la senzillesa de funcionament dels aparells que havíem vist en els vídeos [29] i [30], citats a l'apartat 4.1, ens va fer creure que seria fàcil obtenir so amb un muntatge d'aquest tipus.

El muntatge, mostrat a la figura 21, sí que sembla fàcil. Consta bàsicament d'un tub d'assaig, una mica de llana d'acer i un bec de bunsen o un assecador de cabell per escalfar, a part dels suports necessaris.

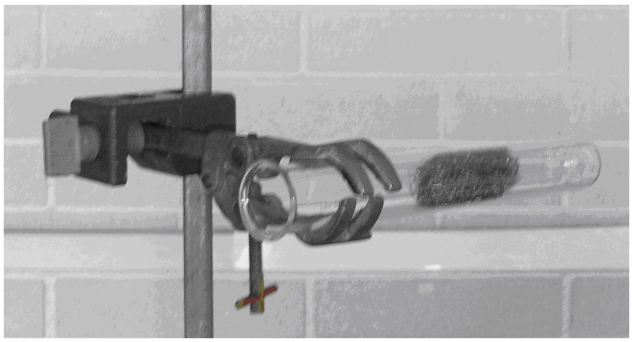


Figura 21: Esquema del muntatge per un làser acústic amb materials fàcils i casolans.

Sembla fàcil, però no va sortir a la primera. Varem utilitzar llana d'acer fina, però en veure que no obteníem cap resultat, varem canviar-la per una altra de més gruixuda. La funció de la llana d'acer és fer d'stack, però el fet que sigui fina o gruixuda, o que estigui més o menys atapeïda pot determinar que es produeixi o no el so. Igualment, varem començar per escalfar amb un assecador de cabell; tanmateix en no aconseguir suficient temperatura, vam utilitzar un bufador de bunsen, com es veu a la figura 22.

No vam aconseguir cap resultat després de moltes proves, fins que no vam aprendre a tenir una mica de paciència i escalfar durant l'estona suficient. Finalment va sonar amb un to net i clar. Així, vam adquirir un dels principals aprenentatges d'aquesta recerca: les experiències, per molt immediates i fàcils que semblin, s'han de fer sempre molt acuradament, i tenir molta paciència. Al final, tot acaba sortint.

Figura 22: Imatge del procés d'escalfament del tub d'assaig.

4.4. Els nostres prototipus finals

4.4.1. Disseny i construcció

La tercera i definitiva etapa del nostre projecte ha consistit en la realització d'un làser acústic amb alimentació elèctrica interna, seguint un model semblant als que es mostraven a l'apartat 4.1. Ens hem basat en el protocol [46] que té publicat la Universitat de Pennsilvanya (Penn State University), que també ens ha proporcionat alguns dels materials.

Els materials per la realització del nostre làser acústic han estat: un tub d'assaig de pyrex, cable de níquel-crom (nicrom), cables conductors de coure, fragment d'un catalitzador ceràmic de cotxe (per utilitzar-lo com stack), petites anelles o fasteners de connexió i una font d'alimentació.

La part més laboriosa ha estat la fabricació de l'stack. Aquesta peça, inicialment de forma quadrada, ha hagut de ser arrodonida per poder-la encabir en el tub d'assaig (veure figura 23). A més, per la realització d'aquesta tasca calia prendre algunes precaucions, ja que no convé respirar la pols que es desprèn en manipular aquest tipus de ceràmica.

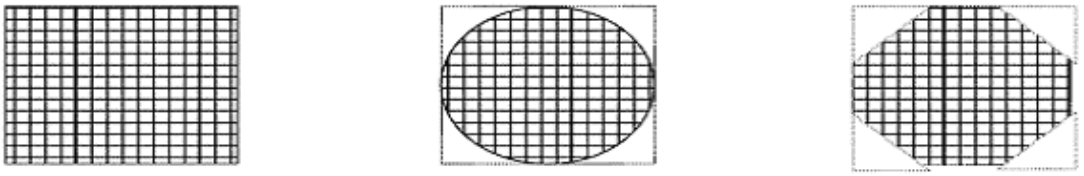
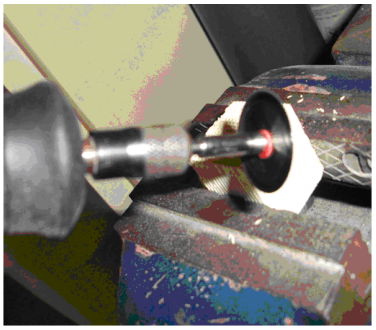
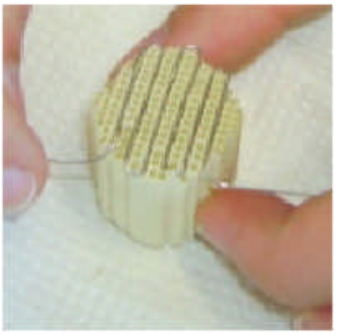
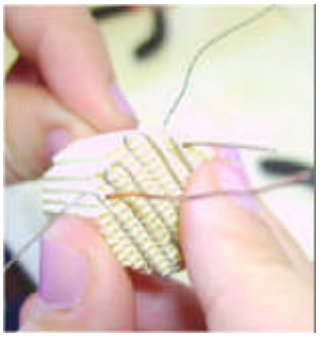
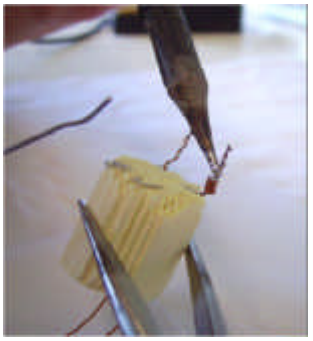


Figura 23: A l'esquerra forma original de l'stack. Al mig forma desitjable de l'stack. A la dreta, forma en la qual hem deixat l'stack.

La seqüència de construcció de les parts que havien d'anar a l'interior del tub de pyrex del nostre làser acústic es mostra en la següent taula:

		
Tallat de l'stack per aconseguir que tingui la forma arrodonida precisa per introduir-lo en el tub	Realització de solcs a la cara de l'stack que ha d'allotjar la resistència calefactora	Allotjament de la resistència calefactora de níquel-crom en els solcs
		
Fregat amb paper de vidre dels extrems dels cables de coure, per treure l'aïllament	Pas de dos cables de coure per dos dels conductes de l'stack	Soldadura dels cables de coure amb els de níquel-crom utilitzant un fastener

Taula 6: Seqüència de les etapes de construcció de la part interior del nostre làser acústic

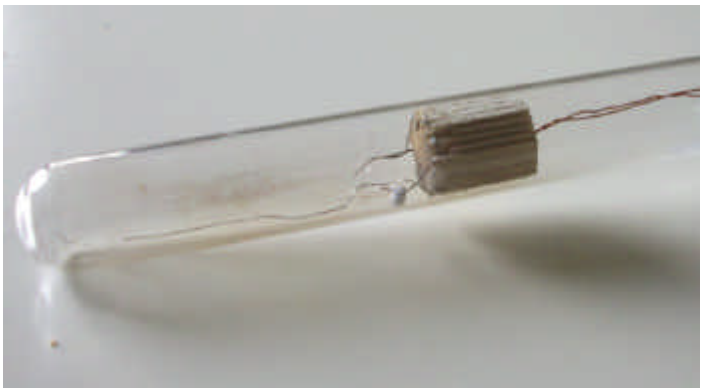


Figura 24: Stack introduït al tub de pyrex. És el nostre prototipus "Memnònium 1".

Una vegada llesta la part inferior (l'stack amb les seves connexions) només calia posar-lo a l'interior del tub de pyrex. El resultat es mostra a la figura 24. Finalment, perquè el làser funcioni, cal connectar els dos conductors de coure a una font d'alimentació de corrent continu. Hem provat amb diferents models, i finalment ens hem quedat amb la font que es mostra a la figura 25, que té diverses sortides de CC a 6 V, 8 V, 12 V, 18 V i 24 V.

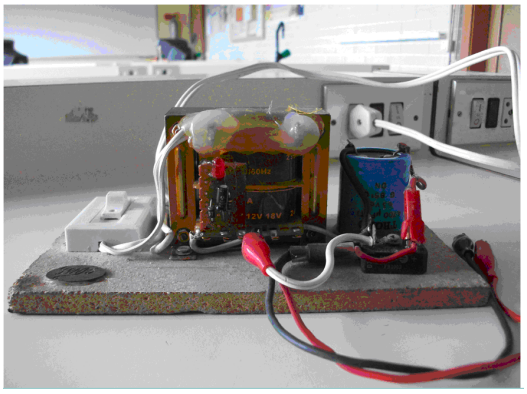


Figura 25: Font d'alimentació de CC pel nostre làser acústic

Les primeres proves ja van confirmar el bon funcionament del nostre làser acústic amb diversos voltatges d'alimentació, a partir de 6 V. El dispositiu emet un so de prou intensitat i suficient puresa com per donar per aconseguit el nostre objectiu.

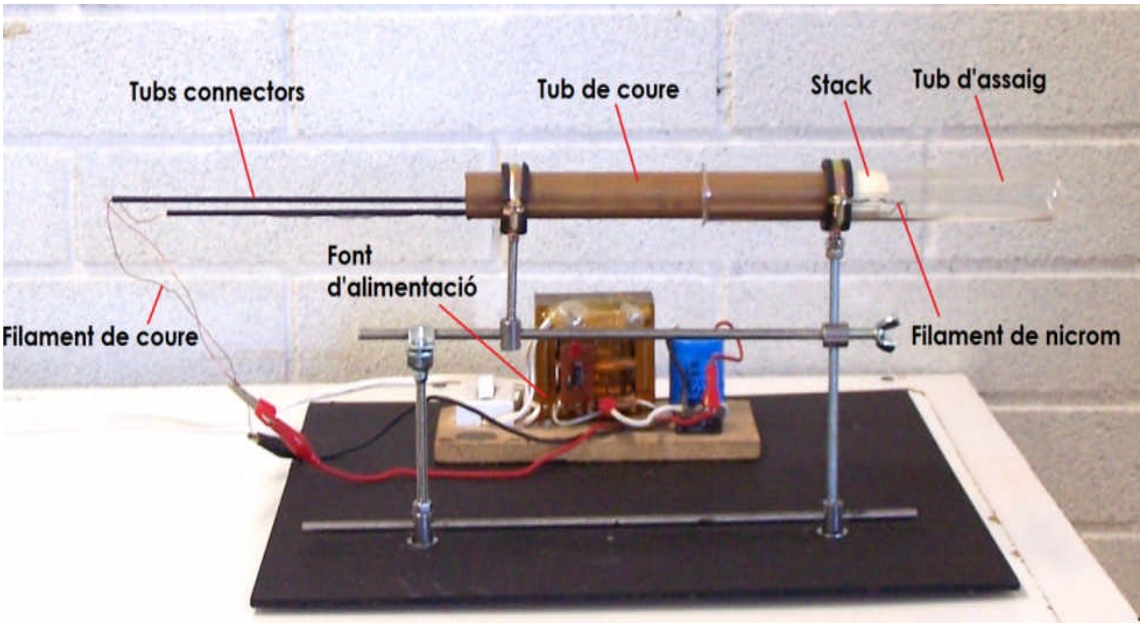
4.4.2. Els dos prototipus finals

Una vegada aconseguit que un primer làser acústic funcionés de manera raonable, hem passat a dissenyar alguna millora i alguna ampliació per tal d'aconseguir un aparell que ens permeti fer diferents anàlisis del so emès. Es tractava, per exemple, de facilitar l'estudi de la dependència del so emès amb factors com la longitud del tub, o també d'analitzar el so produït quan es substituïa el tub de pyrex per altres recipients de forma i dimensions diverses. Per dur a terme aquests propòsits hem posat a punt dos prototipus finals, un més sofisticat, que es mostren i descriuen a continuació.

En primer lloc, la figura el "Memnònium 1", que no és res més que l'estructura del làser acústic original, amb tub o sense tub, de manera que pot introduir-se en qualsevol recipient per analitzar el so produït, tal com es pot veure a la figura 24, alimentat amb la font de la figura 25.

En segon lloc, la figura 26 mostra el nostre "Memnònium 2", dissenyat per posar de manifest la dependència de la freqüència del so emès amb la longitud del tub. Bàsicament és un derivat del nostre làser inicial, amb una extensió del tub de vidre en forma de tub de coure, que permet variar la longitud total del tub. La variació de la longitud del tub es pot fer gràcies al recolzament de la part de coure en una guia metàl·lica, com es pot veure a la figura 26. Tot el conjunt forma part d'una estructura compacta dissenyada expressament per nosaltres.

Les anàlisis realitzades amb els dos prototipus constitueixen el contingut del darrer capítol d'aquesta memòria i el punt final, per ara, d'aquest treball.



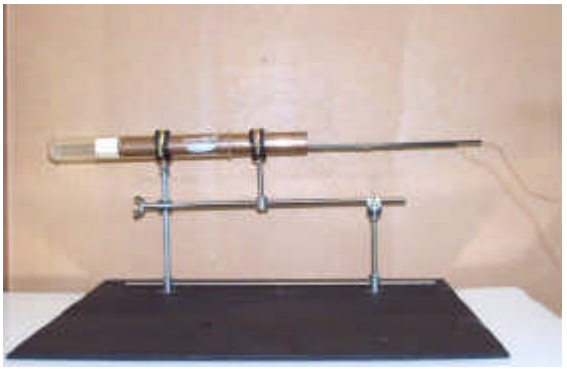


Figura 26: Imatges del Memnònium 2. A dalt, imatge de perfil del làser acústic amb les respectives parts que el composen indicades. A baix a la dreta, fotografia des de dalt del nostre dispositiu. A baix a l'esquerra, imatge del Memnònium 2 on es pot observar l'estructura que hem dissenyat i muntat.

5. Anàlisis del so emès pels nostres làsers acústics

Un cop hem completat la construcció dels dos prototipus dels nostres làsers acústics, hem passat a fer un seguit de proves i comprovacions per analitzar el seu funcionament. En particular, hem realitzat proves per valorar la dependència del so emès amb factors com la posició de l'stack o la longitud del tub, i també hem analitzat el so produït en recipients de diferents formes i grandàries.

5.1. Estudis amb el "Memnònium 1"

5.1.1. Dependència del so emès amb la posició de l'stack.

En primer lloc, hem analitzat com variava la freqüència del so emès en funció de la posició de l'stack al tub. Vam voler comprovar, així, si existia alguna posició particularment favorable per la producció de l'efecte termoacústic.

El muntatge utilitzat es mostra a la figura 27. L'stack està muntat en el tub de pyrex i hem disposat un sensor de so connectat a l'ordinador mitjançant l'equip Multilog, ja descrit a l'apartat 4.2.2. El tub té una longitud total de 20 cm.

També hem disposat d'un voltímetre per tal de poder mesurar el voltatge real que arribava a la resistència calefactora. Finalment, un reòstat ens permet variar el voltatge aplicat de forma gradual.

El software de l'equip de recollida de dades ens ha permès obtenir la freqüència del so emès a partir de la transformada de Fourier de la senyal obtinguda. D'altra banda el voltímetre ens ha informat del voltatge aplicat durant tot el procés.

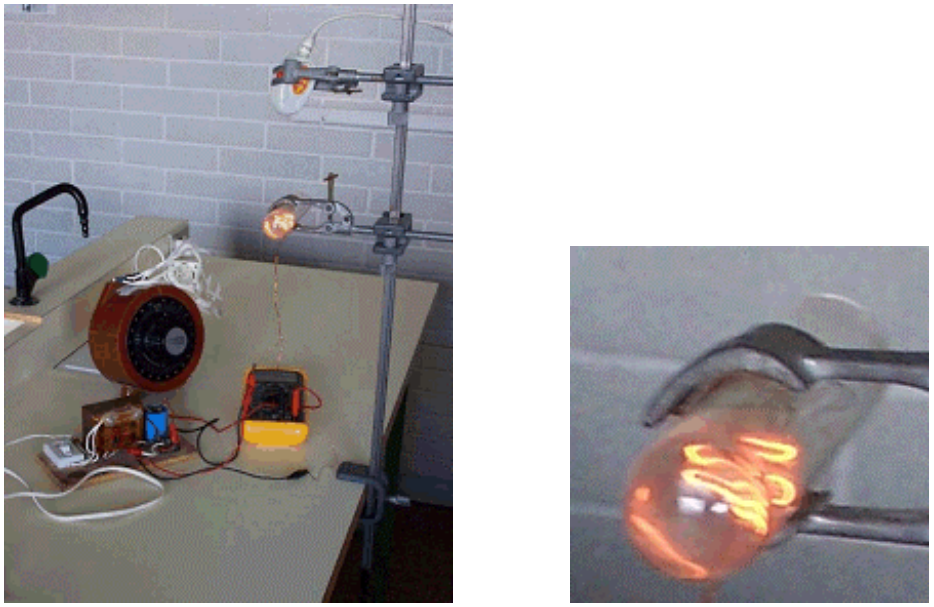


Figura 27: A l'esquerra, muntatge per analitzar la dependència d el so amb la posició de l'stack dins del tub. A la dreta, detall de la resistència en funcionament, incandescent.

Per realitzar la prova, hem anat variant la posició de l'stack dins del tub i hem mesurat en cada cas la freqüència del so i el voltatge mínim necessari per produir el so.

- Espectre de les ones sonores enregistrades

La figura 28 mostra la transformada de Fourier d'una de les mesures preses amb el sensor micròfon a partir del so emès pel "Memnònium 1". Com es pot veure, l'espectre de freqüències es redueix a una, en aquest cas de 436 Hz, cosa que indica que el "Memnònium 1" es comporta pràcticament com un diapasó. Hem mostrat l'exemple per una de les mesures, però hem de dir que totes les que vam prendre amb aquest muntatge han donat sempre un espectre de només una freqüència, i per tant cal concloure que el "Memnònium 1" en operació normal emet una ona harmònica.

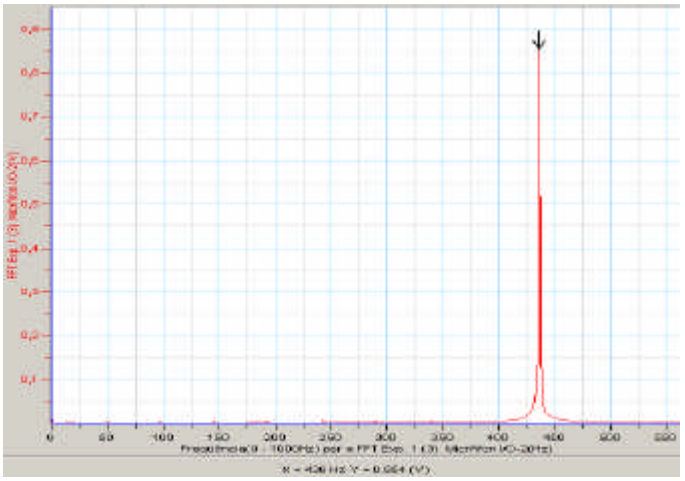


Figura 28: Transformada de Fourier d'una de les mesures preses amb el sensor micròfon a partir del so emès pel Memnònium 1. Es veu clarament que l'espectre de freqüències es limita a una única, de 436 Hz, i el tub es comporta virtualment com un diapasó.

- Resultats sobre la dependència de la freqüència amb la posició de l'stack:

Els resultats obtinguts es poden veure a la taula i la gràfica següents.

Distància de l'stack a l'extrem obert del tub (cm)	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5
Freqüència del so enregistrat (Hz)	437	435	436	433	433	436

Taula 7: Resultats sobre la freqüència del so obtingut en funció de la posició de l'stack

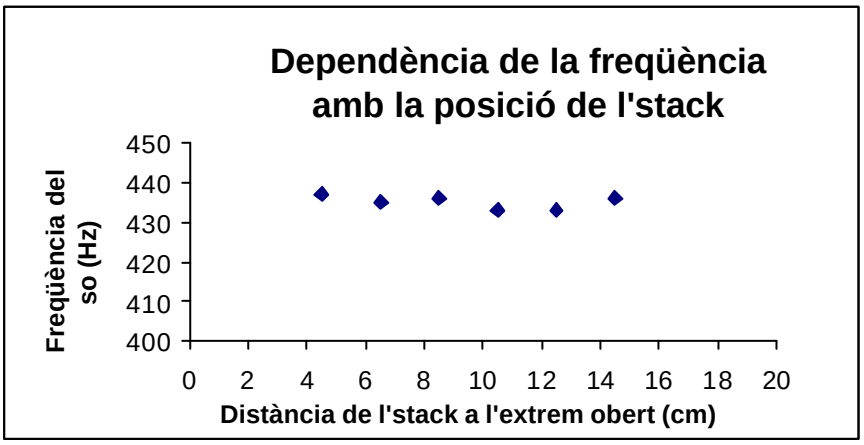


Figura 29: Resultats sobre la freqüència del so obtingut en funció de la posició de l'stack

Per distàncies a l'extrem obert inferiors a 4,5 cm o superiors a 14,5 cm el dispositiu no sonava. Tot i així, els resultats cobreixen una bona part del tub que, recordem, és de 20 cm.

Tant la taula 7 com la gràfica de la figura 29 mostren clarament que la freqüència del so no depèn de forma significativa de la posició de l'stack: el dispositiu sona amb una freqüència similar, entre 433 i 437 Hz, per qualsevol posició de l'stack. Aquest fet estaria d'acord amb la idea que la longitud que té alguna influència sobre la freqüència emesa és la longitud total del tub, que no variem, i no pas la longitud de les dues cavitats que delimita l'stack a l'interior. Malgrat que no es trobi reflectit al gràfic, sí que hem pogut constatar que existeix una posició de l'stack on el funcionament del tub presenta una singularitat, però no pel que respecta a la freqüència sinó a la intensitat del so. Efectivament, hem pogut comprovar que a la distància d'aproximadament 9 cm de l'extrem obert el so resulta particularment intens.

- Resultats sobre la dependència del voltatge d'alimentació mínim amb la posició de l'stack

La taula 8 i la figura 30 que segueixen informen sobre el voltatge mínim que ha estat necessari aplicar perquè el làser sonés a diferents posicions de l'stack.

Distància de l'stack a l'extrem obert del tub (cm)	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5
Voltatge mínim que cal aplicar a l'stack (V)	6,75	6,77	6,72	6,73	6,68	6,66

Taula 8: Resultats sobre el voltatge mínim necessari per produir so en funció de la posició de l'stack

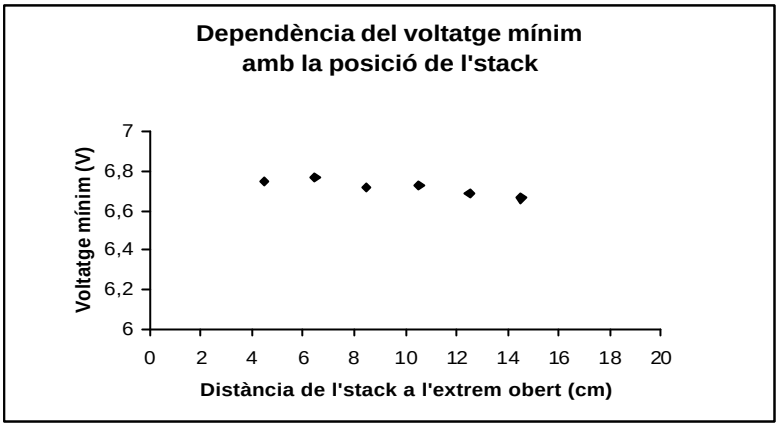


Figura 30: Resultats sobre el voltatge mínim necessari per produir so en funció de la posició de l'stack

Com es pot comprovar la posició de l'stack tampoc té una incidència apreciable en el voltatge mínim que cal comunicar a la resistència calefactora perquè l'aparell emeti un so.

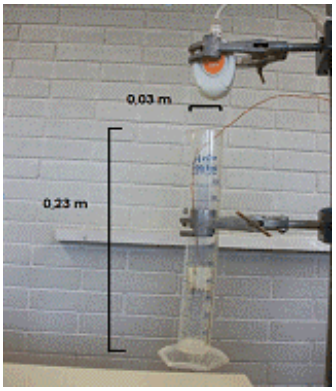
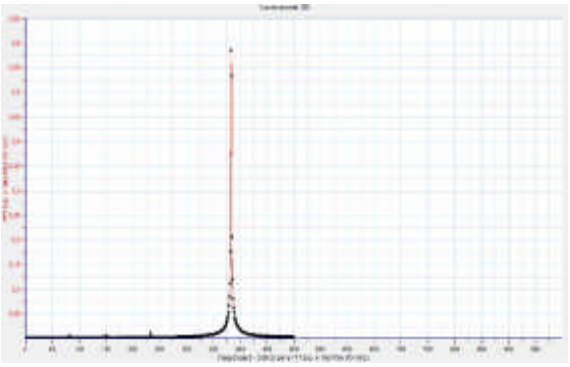
Dels resultats anteriors podem obtenir, com a resum, la conclusió següent:

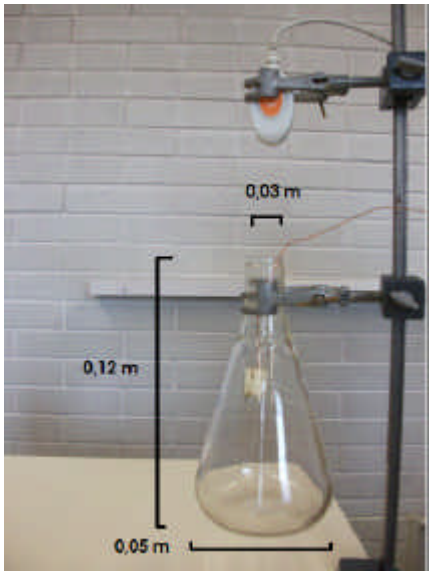
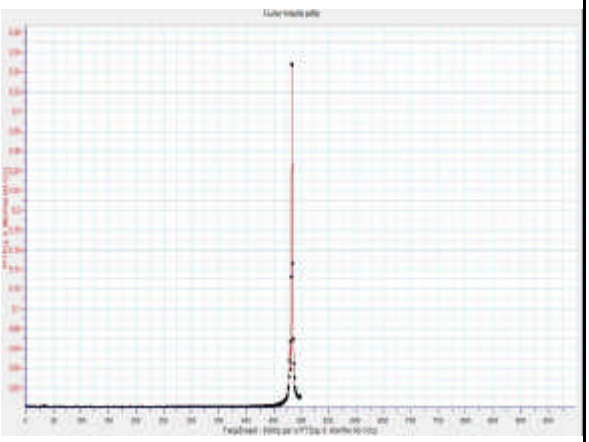
El "Memnònium 1", quan està integrat per l'stack i un tub de pyrex de 20 cm de longitud, emet ones harmòniques pures de freqüència 435±2 Hz, i es comporta bàsicament com un diapasó, independentment de la posició de l'stack a l'interior del tub, sempre que aquest stack no estigui posat a menys de 5 cm de qualsevol extrem (aleshores no sona).

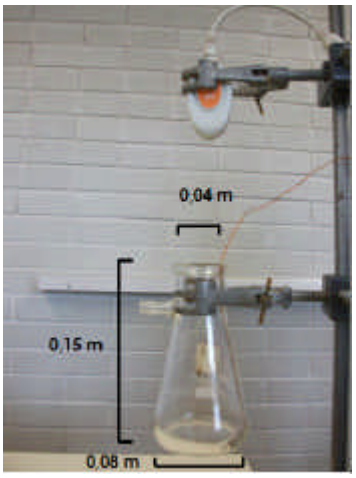
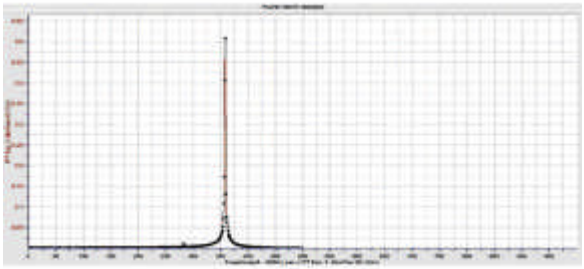
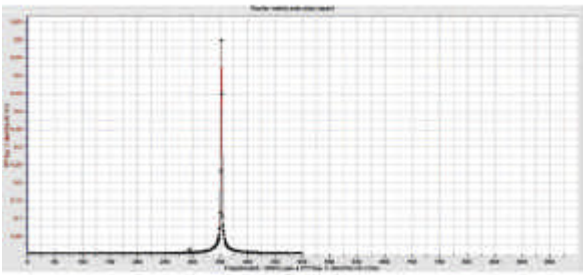
5.1.2. Estudi del so produït en diferents recipients.

Un cop hem realitzat les experiències més primàries amb el "Memnònium 1" muntat amb un tub de pyrex, hem volgut comprovar si l'efecte es produïa també amb l'stack incorporat a altres recipients de formes i volums diferents dels del tub inicial. Els resultats han estat força interessants, i hem aconseguit produir so en diferents –i insospitats- recipients del laboratori.

A continuació es ressenyen els successius recipients que hem utilitzat com ressonadors, i adjuntem les imatges, les característiques, les dimensions i les freqüències que varem mesurar. També indiquem si el dispositiu ha sonat naturalment o si ha calgut forçar el so bufant a l'extrem obert.

Proveta de 100 mL	
	
Observacions: Espectre d'una sola freqüència. Ha sonat sense cap dificultat. **Freqüència mesurada**: 383 Hz	

Matràs erlenmenyer	
	
Observacions: Espectre d'una sola freqüència, però no es pot assegurar perquè queda tallat. Ha sonat amb una petita dificultat inicial. **Freqüència mesurada**: 483 Hz	

Kitasato o matràs amb colze	
	 
Observacions: Espectre d'una sola freqüència. Ha sonat fàcilment i sense necessitat de bufar per iniciar el procés. A més a més, hem realitzat dues mesures, la freqüència 1 correspon al so sense cap alteració i la freqüència 2 al so tapant el seu petit orifici. **Freqüència mesurada**: Freqüència 1: 359 Hz Freqüència 2: 352 Hz	

D'aquesta manera hem pogut comprovar com era possible utilitzar el nostre dispositiu amb recipients diferents del tub d'assaig. És evident que les proves que hem fet no són ni molt menys exhaustives, ni el nostre propòsit era treure'n conclusions. Això queda per un altre treball que apuntem amb aquests breus exemples.

5.2. Estudis amb el "Memnònium 2"

L'objectiu del "Memnònium 2" és permetre variar la longitud del tub per poder variar la freqüència emesa pel làser acústic. Recordem que el nostre làser funciona com un tub sonor, del qual hem estudiat la teoria a l'apartat 3.1. Es tracta, en concret, d'un tub tancat per un extrem i obert per l'altre, en el qual suposarem que està ressonant el primer mode de vibració, ja que

hem vist que es comporta com un diapasò. Per tant és vàlida la següent part de la taula 1:

Gràfica	Nodes	Ventres	λ ?	ν ?	Harmònics
	1	1	4L	$\frac{v}{4L}$	Fonamental, 1

La relació entre la freqüència, la longitud d'ona (que en aquest cas és 4L) i la velocitat és l'equació [5],

$$v=\lambda\nu \quad (5)$$

En el cas del tub de pyrex, de 20 cm de longitud, ja hem vist a l'apartat 5.1.1 que la freqüència mesurada és de 435 Hz, i per tant de l'aplicació de l'equació 5 resultaria una velocitat pel so que es calcula en la taula 9.

ν (Hz)	L (m)	λ=4L (m)	v (m/s)
435	0,20	0,80	348

Taula 9: Càlcul de la velocitat del so a partir de les dades mesurades en el nostre làser acústic

El resultat obtingut, 348 m/s, és compatible amb una temperatura d'aproximadament 30 ºC, d'acord amb l'expressió 5. Com que l'interior del tub es troba a una temperatura superior a la de l'ambient degut a la calefacció incorporada a l'stack, el resultat és raonable, tot i que no podem saber la velocitat interior.

- Allargament del tub

La teoria dels modes de vibració en tubs sonors, que hem analitzat a l'apartat 3.1, estableix una relació inversa entre la freqüència emesa pel tub i la seva

longitud L. En aquesta darrera etapa del treball ens hem plantejat una experiència enfocada a analitzar els canvis en la freqüència del so emès al modificar la longitud del tub. Per aquest objectiu, és evident que hem de poder allargar i escurçar el tub, i per acomplir aquest objectiu hem realitzat una sèrie de proves que han acabat amb el disseny del "Memnònium 2", que no és res més que un làser acústic de longitud variable.

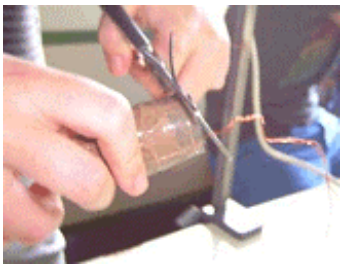


Figura 31: Imatge del procés de retall de la prolongació de cartolina

Les primeres proves les vam fer afegint una prolongació de cartolina en forma de tub, tal com es veu a la figura 31. La cartolina estava fixada a l'extrem del tub i es podia anar retallant, de manera que cada vegada sonava diferent, el fonament d'aquesta primitiva modificació del nostre dispositiu es pot observar a l'esquema de la figura 32.

Figura 32: En una versió molt primitiva, el "Memnònium 2" s'operava amb una cartolina fixada a l'extrem que s'anava retallant amb tisores per verificar el canvi de freqüència en el so (esquerra). En la versió definitiva, la cartolina ha estat substituïda per un tub de coure solidari a l'stack, que es pot moure variant la longitud total L.

En una segona fase, vam fixar l'stack solidari a la cartolina que s'allargava, disseny que va donar lloc finalment al "Memnònium 2", on la cartolina ha estat substituïda per un tub de coure, i s'ha disposat un mecanisme permanent per poder allargar la longitud del tub a voluntat i enregistrar les dades necessàries i obtenir els resultats de la taula 10 i les gràfiques 33 i 34.

- Resultats obtinguts

Els resultats obtinguts es mostren a la taula 10 i les gràfiques següents:

Longitud del tub (m)	21	22	23	24	25	26	27
Freqüència (Hz)	423,28	407,68	400,75	388,00	380,00	372,00	356,72
Longitud del tub (m)	28	29	30	31	32	33	34
Freqüència (Hz)	347,36	330,72	329,68	312,00	305,76	301,60	296,40

Taula 10: Resultats sobre la freqüència del so obtingut en funció de la longitud del tub

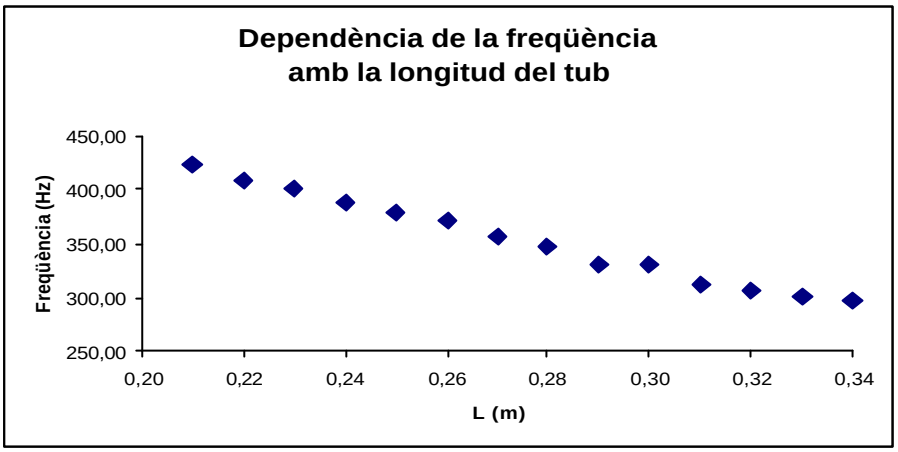


Figura 33: Dependència de la freqüència amb la longitud del tub.

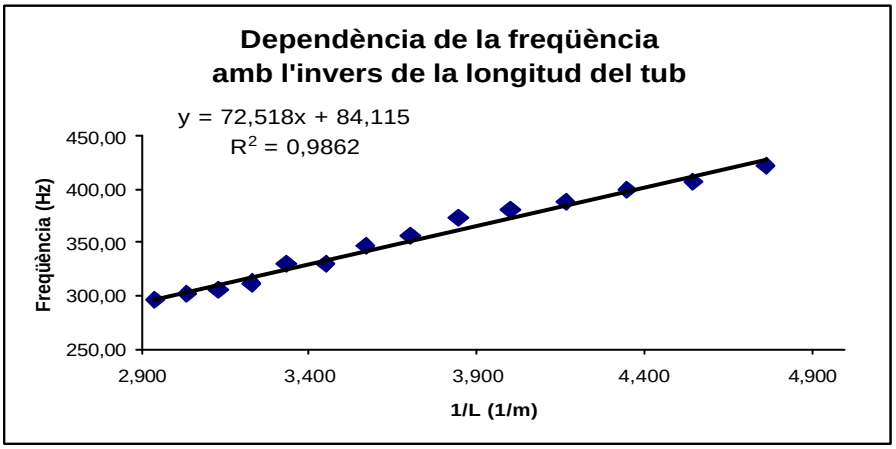


Figura 34: Dependència de la freqüència amb l'invers de la longitud del tub.

Segons la teoria exposada abans, es podia esperar que a mesura que anéssim reduint la longitud del tub de cartolina el so fos cada vegada més i més agut (major freqüència). Aquest fet, efectivament, ha quedat reflectit a les successives freqüències enregistrades, tal i com es mostra a les gràfiques. La primera mostra doncs, clarament, que la freqüència decreix amb la

longitud del tub. A la segona hem tractat de trobar si la relació entre la freqüència i l'invers de la longitud del tub, que segons la teoria seria la de la fórmula 6,

$$\nu = \frac{v}{4L} = \frac{v}{4} L^{-1} \quad (6)$$

admet un ajust numèric. Com es pot veure, la dependència entre la freqüència i L^{-1} és de proporcionalitat directa, i per tant hauria d'admetre un ajust a una funció de proporcionalitat lineal. La gràfica de la figura 34 mostra que l'ajust és força bo, amb un coeficient R^2 proper a la unitat, però no és un ajust a la funció freqüència = constant · L^{-1}, sinó que hi ha un terme independent, freqüència = constant · L^{-1} + terme independent. Això significa que els resultats que hem obtingut no es poden explicar amb la teoria de forma tan senzilla com podríem desitjar. Hi ha una tendència clara a que la freqüència disminueixi amb la longitud del tub, però no de la forma simple que preveu la teoria per un tub sonor. L'explicació pot estar en el fet que la velocitat de propagació del so en el tub no es pot considerar ni molt menys constant, ja que les diferències de temperatura entre la zona calenta i la zona freda de l'stack són considerables. Per tant, la constància del producte v= longitud d'ona · freqüència, o sigui v = 4L · freqüència, no està gens clara, ja que els canvis de temperatura introdueixen variacions de velocitat considerables. L'explicació teòrica és, doncs, força més complicada.

Sigui com sigui, el nostre "Memnònium 2" , apart de permetre les mesures que acabem d'analitzar, funciona en certa manera com un instrument musical amb un principi similar al del trombó de vares. Les guies que hem disposat permeten el moviment suau del tub i la variació de la longitud, de manera que es pot variar el so entre uns 300 i uns 430 Hz, que cobreix aproximadament l'interval entre el Re_4 i el Sol_4 . Tot això permet, finalment, deixar oberta una altra línia de treball també força ambiciosa: el disseny i la construcció d'un instrument musical amb un rang més ampli de notes, que funcioni igual que el nostre "Memnònium 2" utilitzant l'efecte termoacústic.

6. Conclusions i projecció futura del treball

6.1. Conclusions

Per posar punt i final al nostre crèdit de recerca cal fer un balanç global de tota la feina feta i dels resultats, troballes i aprenentatges que n'hem tret. A continuació presentem una guia general del procés que hem seguit per realitzar el nostre treball:

- Hem realitzat un estudi dels aspectes mitològic i històric del fenomen que va tenir lloc entre els anys 27 a.C. i 199 d.C., relacionat amb el cant del Memnònium.
- Hem aprofundit en alguns dels fenòmens ondulatoris, com ara les ones estacionàries o la ressonància en tubs sonors, que formaven part del currículum de la física de 2n curs de Batxillerat.
- Fora ja del currículum de la física de 2n curs de Batxillerat, hem estudiat l'efecte termoacústic i les seves aplicacions, centrant-nos sobretot, en les vinculades amb el nostre projecte de recerca. També hem estudiat els fonaments del làser òptic en la mesura en què ens era necessari per comparar-lo amb els nostres dispositius.
- Hem realitzat un procés de recerca i documentació per la xarxa web dels dispositius existents que funcionessin gràcies a l'efecte termoacústic.
- Hem fet un seguit de comprovacions prèvies amb tubs sonors comercials (singing pipes), i altres instruments muntats per nosaltres de forma casolana, i que exemplifiquen l'efecte termoacústic.
- Hem dissenyat i construït el nostre propi làser acústic, que hem batejat com " Memnònium 1".
- Fent servir el Memnònium 1, hem dut a terme un seguit d'experiències per treure conclusions sobre les característiques del so que emet. Per aquestes experiències hem utilitzat l'equipament Multilab d'experimentació assistida per ordinador, amb sensors de so i temperatura. També hem utilitzat un voltímetre i un reòstat.
- Finalment, hem construït un disseny millorat del nostre làser, el qual

hem denominat amb el nom de “Memnònium 2”.

✍✍ Fent servir el Memnònium 2, també hem analitzat el so emès per estudiar-ne la variació amb determinats paràmetres.

Un cop realitzada aquesta tasca, ens ha estat possible concloure que:

1. El fenomen del Memnònium, que tingué lloc fa uns 2000 anys a Egipte, estava produït per l’efecte termoacústic, i el seu fonament és el mateix que el que fa sonar els dispositius posats a punt per nosaltres. Un fenomen natural que, com molts altres, pot ser explicat per aquest camp de la ciència, la física.
2. El fenomen termoacústic, és a dir la conversió d’energia tèrmica en energia sonora es pot realitzar físicament de forma senzilla, amb materials fàcilment trobables en un laboratori, si es tenen clars els fonaments i es posen les condicions adequades.
3. És possible trobar a la xarxa web diferents tipus de dispositius que funcionen gràcies a l’efecte termoacústic. Hem trobat que es poden classificar en diferents categories (ho hem fet en quatre) atenent, sobre tot, a la manera de produir el gradient tèrmic necessari pel funcionament de l’aparell. Nosaltres hem construït el nostre dispositiu utilitzant una resistència elèctrica calefactora a l’interior del tub per obtenir el gradient tèrmic requerit.
4. La part fonamental de qualsevol dispositiu termoacústic és la peça anomenada stack, que ha d’estar introduïda dins del tub sonor, ha de permetre el pas de l’aire a través seu i ha de tenir l’extrem que dóna a la part interna del tub a més temperatura que la part que dóna a l’exterior.
5. El so emès pels dos làsers acústics que hem construït és una ona harmònica. Els dispositius funcionen com tubs sonors oberts per un extrem i ressonen en el primer mode de vibració. En aquest sentit, el seu comportament és equivalent al d’un diapasó. A més el so emès és de

gran intensitat.

6. La posició de l'stack a l'interior del tub no influeix en la freqüència del so emès. En canvi, la longitud del tub sí que modifica aquesta freqüència, d'acord amb la teoria dels tubs sonors.
7. L'efecte s'aconsegueix de la mateixa manera introduint l'stack en diferents recipients de formes diverses. Per tant no és necessari que es tracti d'un tub de forma estrictament cilíndrica, la qual cosa ens permet tornar al principi i explicar el fenomen que va tenir lloc al monument funerari del Memnònium fa 2000 anys.

6.2. Projecció futura

El període de temps que s'assigna a la realització d'un treball de recerca limita d'una forma molt restrictiva el seu contingut i el nivell al que es podrà aprofundir en aquest. Per la nostra part, la producció d'un làser acústic i, a més a més, la d'una posterior versió millorant-ne el disseny ha suposat tardes i tardes de feina per poder arribar a les metes proposades de manera satisfactòria. Tot i això, creiem que seria molt positiu que en un futur es pogués continuar aquesta tasca per tal d'atènyer nous objectius que se'n desprenen de forma natural.

1. Hauríem de retornar al principi del treball, i recordar la proposta de Duffey [2], que es pot veure a la imatge 1. Duffey no només construeix dispositius que utilitzen l'efecte termoacústic, sinó que utilitza energia solar. La creació d'un instrument tèrmic solar seria el següent pas en la seqüència que nosaltres mateixos hem iniciat. Es tractaria de produir el gradient tèrmic necessari perquè es doni l'efecte, substituint la resistència elèctrica per l'energia solar. Aquesta seria focalitzada a un dels extrems de l'stack, emprant un mirall parabòlic, i en cas que fos necessari, un difusor evitaria que l'augment de temperatura també es

donés a l'altre banda de l'stack. En tenim idees, però el nostre treball actual no pot anar més lluny.

2. Una altra possible línia de treball, compatible amb l'apartat anterior, seria la d'utiltizar el "Memnònium 2" com un instrument musical. És a dir, produir tota una sèrie d'instruments utilitzant tubs de coure per variar-ne la longitud i, en conseqüència, la freqüència del so emès (a mode de trombó de vares). Amb aquesta col·lecció seria factible composar una peça de música tèrmica.

Aquesta és la nostra proposta per una hipotètica futura continuació del treball de recerca que aquí hem exposat. Però això queda ja pels nostres companys de cursos posteriors.

7. Bibliografia i webgrafia

[1] Lluís, Eduard; Martori, Oriol; Mas, Joan; Parejo, Arantxa i Vall, Joan. "/Construcció i estudi d'estructures sonores Baschet: Reixa i Cristall"/. Treball de Recerca dels Seminaris de Física i Química i Música de l'IES Castellar de Castellar del Vallès (Barcelona), curs 1998-99. Premiat en el XII Certamen "Jóvenes Investigadores" realitzat a Mollina (Malaga) el setembre de 1999. Guardonat amb el primer premi de la categoria B en el concurs de construcció d'instruments musicals "Clau de So" organitzat pel "Museu de la Música de Barcelona" el curs 2000-2001.

Casanovas, Anna; Toro, Estefania; Vázquez, Emma. "/Estructures sonores Baschet: Plaques d'acer"./ Treball de Recerca del Seminaris de Física i Química de l'IES Castellar de Castellar del Vallès (Barcelona), curs 1999-2000. Premi CIRIT 2000. Guardonat amb el primer premi de la categoria B en el concurso de construcció d'instruments musicals "Clau de So" organitzat pel "Museu de la Música de Barcelona" el curso 2000-2001.

[2] Duffey, M.R.: The vocal Memmnon and Solar Thermal Automata, Leonardo Music Journal, 17, 2007 (MIT Press) http://www.youtube.com/watch?v=Vv0ulNLRkWM

[3] Grimal, P. Diccionario de Mitología griega y romana. Barcelona, edit. Paidós, 2007 (6ª edic.)

[4] Enciclopedia Británica, VI Lalo-Motpar, pag.778

[5] Tácito, Anales, II, 61.

[6] http://www.touregypt.net/collmem.htm

[7] http://www.egiptologia.org/geografia/colosos_memnon.htm

[8] http://en.wikipedia.org/wiki/Colossi_of_Memnon

[9] www.ashgate.com/pdf/SamplePages/Unknown_Schubert_Ch1.pdf

[10] Llibre de text: Física 2n Batxillerat. Ed. Teide. Tema 8 Pàg. 201

[11] www.uia.mx/campus/publicaciones/fisica/pdf/14ONDASmecanicas.pdf

[12] http://www.ehu.es/acustica/bachillerato/onares/onares.html

[13] http://www.pha.jhu.edu/~broholm/l28/node6.html

[14] http://portales.educared.net/wikiEducared/index.php?title=Ecuación_de_las_ondas_armónicas

[15] http://www.ehu.es/acustica/bachillerato/onares/onares.html

[16] *blocs.xtec.cat/aulavirtual2nbat/.../tema-5-fenomens-ondulatoris-d39-d57.pdf*

[17] http://www.catfisica.com/11so/11so.htm

[18] www.unex.es/~fan/cuantica/mc%2010/Web/encova/termoacustica.htm

[19] http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/acustica/tubos/tubos.htm#ta

[20] http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/acustica/tubos/tubos.htm#tc

[21] http://xml.cie.unam.mx/xml/tc/teym/ghl/guadalupe.pdf

[22] http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Termoacústico

[23] http://gow.epsrc.ac.uk/ViewGrant.aspx?GrantRef=EP/G035202/1

[24] http://www.sas.org/tcs/weeklyIssues_2005/2005-05-06/feature3/index.html

[25] http://www.americanscientist.org/issues/feature/the-power-of-sound/1

[26] http://www.teachersource.com/SoundAndWaves/SoundWavesAndResonance/SingingPipe.aspx

[27] http://www.youtube.com/watch?v=--hDPBAv76A&feature=related

[28] http://www.youtube.com/watch?v=VB02ii6DZ1Y

[29] http://www.youtube.com/watch?v=SGL5kLioRrU&feature=related

[30] http://www.youtube.com/watch?v=3qd_tuLwCRg&feature=related

[31] http://www.sas.org/tcs/weeklyIssues_2005/2005-05-06/feature3/index.html

[32] http://www.youtube.com/watch?v=RzjPl1lYqgs&NR=1

[33] http://www.youtube.com/watch?v=S6SAYcDb_hg

[34] http://madlabs.info/acoustic_laser.shtml

[35] http://www.americanscientist.org/issues/id.858,y.0,no.,content.true,page.1,css.print/issue.aspx

[36] http://www.oberlin.edu/physics/catalog/demonstrations/waves/acousticlaser.html

[37] http://www.youtube.com/watch?v=BzNlo2_ANiE&feature=related

[38] http://www.youtube.com/watch?v=fMoRkEffFOQ&feature=related

[39] http://www.youtube.com/watch?v=93brSy--nyg&NR=1

[40] http://www.youtube.com/watch?v=Vv0ulNLRkWM&feature=related

[41] http://www.youtube.com/user/sota53#p/a

[42] http://www.teachersource.com/SoundAndWaves/SoundWavesAndResonance/SingingPipe.aspx

[43] http://www.stevespangler.com/experiment-of-the-week/singing-pipes-hardware-store-science

[44] http://www.youtube.com/watch?v=--hDPBAv76A&feature=related

[45] http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/acustica/sonido/sonido.htm

[46] http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/laserdemo.htm

Agraïments

En primer lloc, agraïm l'ajuda de totes aquelles persones que han fet possible la realització del treball. Al François Baschet per tots els documents prestats que ens han introduït el fenomen de la millor manera possible i per ser l'artífex de la idea d'aquesta recerca. A la Teresa Ochagavia per introduir-nos al món de la mitologia grega. Al Manel Barroso per l'útil préstec del reòstat. I de manera general, al nostre centre, l'IES Castellar pel suport i les facilitats donades. Al Centre de Documentació i Experimentació de Ciències, pel préstec de dos tubs sonors "singing pipes" amb els quals hem fet alguna de les nostres experiències. I, finalment, al personal de consergeria i de neteja per permetre'ns l'accés a les instal·lacions del centre a horaris intempestius.

En segon lloc, agraïm el suport moral a totes aquelles persones que han fet possible la realització del treball. A la família: mares, pares, germans, germanes i a aquell confident que no acabes mai de saber si és un parent llunyà o un amic de sempre. Perquè ens han donat allò que és impossible de definir amb paraules, però que si es pogués seria una cosa així com: l'abraçada que et cal quan ja no pots més, els ànims que t'ajuden a tirar endavant. En definitiva, aquell punt de recolzament sense el qual res hauria sigut possible. Al cotutor d'aquest treball, el Miquel Calvet, per les seves múltiples aportacions d'índole diversa i per estar sempre a punt per pensar i introduir noves idees i possibilitats per dur a terme la nostra tasca experimental. Per últim, al nostre tutor, l'Antonio Cavero. L'ajuda del qual ha permès el resultat d'una feina el màxim d'acurada possible. Per altra banda, el seu suport moral ens ha animat a tirar endavant sempre que ha calgut.

Finalment, volem agrair a la resta de components del nostre equip l'esforç i la feina realitzada: a la Queralt per les seves ganes de treballar i mecanografiar, a la Inés per les seves ganes de superar-se en l'ús de llenguatge enrevessat i el seu perfeccionisme, i al Jaume per les seves ganes de riure i enfocar-ho tot des de una perspectiva diferent.

A tots ells, gràcies.