Produzione di energia elettrica ed energia frigorifera con il suono
Introduzione ai motori e refrigeratori termoacustici

ing. Gianfranco Padovan[1]
sistemAzienda Srl – Consulenza organizzazione aziendale
www.sistemazienda.it - info@sistemazienda.it - gianfranco.padovan1@tin.it

Indice

1 Premessa 2
2 Cenni storici dei fenomeni acustici abbinati al calore fino al 1950 3
3 Onde acustiche in un tubo o altre cavità 4
4 Descrizione dei principi fisici coinvolti 4
5 Come autocostruirsi un tubo che suona e fa freddo - Analogia con laser ottico 6
6 Sviluppo della termoacustica, risultati ottenuti, ricerche in corso 7
7 Applicazioni principali 9
8 Futuro dei motori e refrigeratori termoacustici 11
9 Conclusioni 12
10 Riferimenti sulla termoacustica 13
10.1 Siti Web di introduzione alla termoacustica 13
10.2 Video & Audio 14
10.3 Comunicazione, articoli di giornale, notizie on line 14
10.4 Fornitori di materiali e servizi 15
10.5 Libri sulla termoacustica 15
10.6 Database riferimenti di letteratura, brevetti 15
10.7 Termoacustica sperimentale a scopi educativi 15
10.8 Aziende produttrici di dispositivi termoacustici 16
10.9 Software per l'analisi dei fenomeni termoacustici 17
10.10 Organizzazioni di ricerca pubblica e privata sulla Termoacustica 17
10.11 Riferimenti avanzati per approfondimenti, attività di ricerca e sviluppo 19
10.12 Conferenze, seminari, congressi sulla termoacustica 21
10.13 Principali ricercatori ed esperti in termoacustica 21
10.14 Ringraziamenti 22

[1] Gianfranco Padovan - Ingegnere meccanico, Università di Padova, 1976 - Ricercatore CNR dal 1976-1986 presso l'Istituto per la Tecnica del Freddo, svolgendo attività nei seguenti campi: trasporti refrigerati, isolamento termico, conduttività termica nei dielettrici granulari, refrigerazione di alimenti, refrigerazione commerciale, accumulo termico solare, geotermia a bassa temperatura, applicazione FEM per analisi termiche in alimenti, strutture edilizie, isolamenti termici nei magazzini e mezzi di trasporto, infrastrutture, simulazione termiche nei sistemi e processi. Dirigente aziendale dal 1986-1994 presso due aziende leader di mercato europeo: Rica Spa (gruppo Zoppas Industries) costruttore di resistenze elettriche per una ampia gamma di settori industriali e commerciali; Ital Coil Spa (ora Eco Scambiatori Spa) produttore di scambiatori di calore alettati per un ampio ventaglio di applicazioni.
Dal 1994 a tutt'oggi, consulente, partner senior e dal 2000 vice-presidente in SISTEMAZIENDA (www.sistemazienda.it) per i temi riguardanti sistemi qualità, sicurezza, management delle organizzazioni, sviluppo e qualificazione nuovi prodotti, In questo ruolo supporta le aziende del Nord-Est nel miglioramento dei prodotti/servizi e dei processi dell'organizzazioni.

1 Premessa

Nei primi anni `80 lessi nelle pagine scientifiche di un quotidiano– non ricordo bene, credo fosse il Corriera della Sera - di un'invenzione singolare che produceva freddo utilizzando l'energia sonora. La mia attenzione non era casuale: a quel tempo lavoravo presso l'Istituto per la Tecnica del Freddo del Cnr e quell'invenzione riguardava proprio un nuovo modo di produrre freddo. Ricordo l'articoletto divulgativo che in cui si diceva che il dispositivo era composto da un cilindro contenente del gas in cui si facevano viaggiare onde sonore. All'interno del cilindro c'era un setto con una serie canali passanti longitudinali che venivano interessati dalle onde sonore. In alcuni punti di questo cilindro si generavano basse temperature e quindi si produceva un effetto frigorifero. L'articolo di giornale tentava anche di spiegare cosa succedeva nel cilindro. Ricordo che mi sono scervellato non poco a capire come si potevano creare, in uno stesso volume di gas, zone in cui si potevano avere differenze di temperature anche molto rilevanti. A quel tempo le ricerche in Internet non c'erano. Lasciai correre classificando mentalmente l'invenzione tra quelle senza particolari ricadute concrete. Mi sbagliavo!

Da allora sono passati vent'anni. Da quando lasciai il Cnr nel 1986 mi sono occupato di tutt'altro che di refrigerazione, ma la mia curiosità per quell'invenzione è rimasta sospesa, latente. Proprio recentemente, partecipando ad un forum in Internet in cui si tratta l'uso dell'energia (Promiseland), mi sono re-imbattuto nel refrigeratore termoacustico.

Fig. 1 - Dispositivo Termoacustico installato su un frigorifero commerciale presso la Ben Jerry dal team della Penn State University, da sinistra Matt. Poese, Steven Garrett, Bob Smith, (tratto da www.benjerry.com)

La facilità di recuperare ora nuove informazioni, dati via Internet con motori di ricerca come Google o Copernic, ha riacceso la curiosità di capirne di più. Il quadro che ne ho ricavato mi ha indotto a scrivere quest'articolo divulgativo e introduttivo alla Termoacustica. E già, nel frattempo quell'invenzione[2], che sfruttava un fenomeno fisico noto come termoacustica, è diventata materia di studio e di ricerca applicata[3]. Le due figure a fianco mostrano - al lavoro - due team di ricerca molto attivi sulla termoacustica: fig. 1 Penn State University (PSU); fig. 2 Los Alamos National Laboratory (LANL). In primo piano, nelle due immagini, si evidenziano i dispositivi termoacustici in prova.

La termoacustica è ora un terreno fertile di innovazione, di sviluppo tecnologico e industriale, con parecchie invenzioni e brevetti[4]. Oggi, infatti, i refrigeratori e i motori termoacustici raggiungono il 41% di efficienza del ciclo di Carnot e, quindi, si collocano ormai ad un livello uguale o superiore ai sistemi tradizionali che impiegano compressori alternativi, cicli ad assorbimento, generatori di potenza con motori a combustione interna[5]. Se si considera che tali dispositivi sono molto semplici, compatti, non hanno parti in movimento, erogano la potenza frigorifera variabile agendo sull'ampiezza della vibrazione acustica, hanno costi dell'ordine di qualche €/W, sono facilmente producibili a costi competitivi rispetto alle soluzioni tradizionali,

Fig. 2 - Parte del Motore Stirling Termoacustico sviluppato da Los Alamos National Laboratori - team LANL da sinistra Roy Rockage (meccanico), Scott Backhaus, Chris Espinoza (tecnico) e Greg Swift

[2] Brevetto No. US 4,398,398 di Wheatley, Swift, Migliori (1983)

[3] Per un elenco delle università, laboratori di ricerca pubblici e privati, produttori e utilizzatori si manda al link http://www.coolsound.us/links.html La ricerca di base, quella applicata, ed ora lo sviluppo, hanno coinvolto strutture di ricerca avanzata (Los Alamos National Laboratory, Naval Postgraduate School) e la ricerca universitaria presso i dipartimenti di fisica (Penn State University, University of Missisipi, University of Texas), i dipartimenti di ingegneria (John Hopkins University, Purdue University e MIT). Per dettagli si rimanda all'elenco dei links riportato in fondo all'articolo.

[4] Lo stato dell'arte sui brevetti relativi alla termoacustica è desumbile dal recente brevetto No. US 6,725,670 di Smith, Poese, Garrett, Wakeland (2004)

[5] Greg Swift e Scott Garrett (2000) in una pubblicazione DOE (DE-A005-96OR22464), affermarono che i sistemi con refrigeratori termoacustici con raffreddamento diretto dell'aria il COP possono arrivare a 2,3÷2,5 mentre con un fluido intermedio il COP può arrivare a 1,7÷2,0. Questi valori sono oggi prossimi ad essere raggiunti dal team di ricerca PSU.

impiegano gas o miscele di gas inerti e sicuri, ci sono elementi sufficienti per guardare con occhi nuovi alla Termoacustica e alle innovazioni di prodotto relative.
I dispositivi termoacustici ibridati con alcune soluzioni adottate nelle macchine a ciclo Stirling stanno portando allo sviluppo di motori (sì avete letto bene, motori) che potrebbero integrarsi, e forse anche sostituire, gli attuali motori a combustione interna a ciclo Otto e Diesel.
Lo scopo di questo articolo è fornire un quadro ampio della termoacustica indirizzato a chi vuole investire o vuole essere semplicemente informato o formato. Le informazioni sono di carattere generale e divulgativo. Le note a piè pagina sono state previste per chi volesse saperne di più. I riferimenti commentati riportati in coda all'articolo è quanto di più ampio è disponibile in Internet e dovrebbero consentire al lettore di approfondire l'argomento, fino a contattare direttamente i ricercatori, costruttori, fornitori coinvolti, nel caso ci fosse interesse industriale da parte di chi legge.

2 Cenni storici dei fenomeni acustici abbinati al calore fino al 1950

La trasmissione del suono nei gas è fenomeno fisico che ha interessato Newton e successivamente Laplace. In particolare essi calcolarono la velocità del suono nell'aria ambiente: Newton ipotizzò che l'aria interessata da un'onda di pressione restasse alla stessa temperatura (processo isotermico), mentre Laplace ipotizzò variazioni di temperatura (processo adiabatico)[6]. Laplace tenendo in conto anche delle fluttuazioni di temperatura ottenne valori delle velocità del suono nei gas più vicini alla realtà.

Fig. 3

I soffiatori di vetro quando toccano un recipiente possono avvertire un suono apparentemente spontaneo. Tale suono è conseguente alla risonanza termica e acustica (adattato da American Scientist, The Power of Sound, S. Garrett. S. Backhaus, 2000)

Che la temperatura e il suono fossero connessi fu evidenziato dai soffiatori di vetro, già nei secoli scorsi, quando toccavano o incollavano i recipienti di vetro già raffreddati con altre parti calde come in fig. 3[7]. Higgins (1777)[8], Sondhaus (1850) e Rijke (1859) descrissero casi di *"fiamme che cantano"* quando sono intubate in vario modo. Questi fenomeni furono studiati da Lord Rayleigh (1860, 1896) e da Kirkhoff (1869). Rayleigh propose un criterio (tutt'ora valido) che giustificava la permanenza di onde acustiche stazionarie[9]. Questi fenomeni acustici rimasero però confinati tra le curiosità fino all'inizio di questo secolo quando si evidenziarono ulteriori effetti non positivi quali: combustione in ambienti ristretti (bruciatori e caldaie) e nei motori di razzi[10]. Nel caso dei motori di razzo la sovrapressione acustica nella camera di combustione portava all'esplosione dei vettori; nelle caldaie il rumore generato dai bruciatori andava oltre i 125 dB[11]. In più, Taconis (1949) nella manipolazione dei fluidi criogenici (azoto e ossigeno liquidi), evidenziò come un tubo vuoto a temperatura ambiente, messo in ambienti a temperature criogeniche producesse un suono con pressioni acustiche che arrivavano a 1000 Pa (il fenomeno è noto come "effetto Taconis")[12].
E' solo dopo il 1950 che si è scoperto che l'energia acustica poteva essere utilizzata con vantaggio per generare freddo o caldo o per produrre energia meccanica ed elettrica, per liquefare i gas, o per ridurre le emissioni inquinanti nei processi di combustione con frazioni

[6] Matt Poese (Penn State University) nella sua tesi di PhD osservò che è stata una delle poche ipotesi errate di Newton.
[7] La prima descrizione nella letteratura scientifica di un fenomeno termoacustico risale al 1850 da parte di Sondhaus (Steven L. Garrett, Scott Backhaus – The Power of Sound - American Scientist, 2000 (http://www.americanscientist.org/template/AssetDetail/assetid/21006#23064)
[8] Informazioni storiche sono rintracciabili al link http://docs.hydrofoils.org/thesis.pdf . Per l'instabilità delle combustioni si può vedere http://centaur.mit.edu/rgd/JP1.html. Il fenomeno acustico rilevato da Higgins delle "fiamme che cantano" (singing flames) catturò l'interesse anche di Faraday (1918) e Le Conte (1958). Le Conte scoprì anche le "fiamme danzanti" (dancing flames) sono soggette a oscillazioni con frequenza pari alle frequenze naturali del tubo.
[9] Criterio di Rayleigh: "La vibrazione acustica è incoraggiata se si fornisce all'aria del calore nel momento di maggior densità oppure se si asporta calore nel momento della più grande espansione".
[10] Le onde pulsanti sono note anche come "oscillazioni di Rijike".
[11] Vijayagkrishnam K., N. Ananthkrishanam – Understandind Thermoacoustic Instabilities in Rocket Engines (2003) -
[12] In realtà il fenomeno venne evidenziato da Keesom (1942). Per chi volesse ricreare l'effetto Taconis può vedere il link http://www.fiz.uni-lj.si/~andrejj/piscal/index-a.html in cui forniscono i disegni e le istruzioni per creare un tubo che suona quando è immerso in azoto liquido.

pesanti di petrolio. Ma quello che è successo negli ultimi cinquanta anni lo si vedrà più avanti dopo aver spiegato in dettaglio i fenomeni fisici connessi alla termoacustica.

3 Onde acustiche in un tubo o altre cavità

Può essere sorprendente che in un tubo, per azione di un'onda sonora, si possono produrre pressioni elevate in assenza di parti in movimento. La nostra esperienza ci fa sostenere che l'unico modo possibile per creare una sovrapressione in un cilindro è quello descritto nella fig. 4.a. L'aumento di pressione è prodotto dall'azionamento di un pistone. C'è però un altro modo per aumentare la pressione nel cilindro. Questo può essere fatto sfruttando la risonanza delle cavità. Vediamo come succede.

Consideriamo un tubo chiuso con un altoparlante montato ad un'estremità come in fig. 4.b.

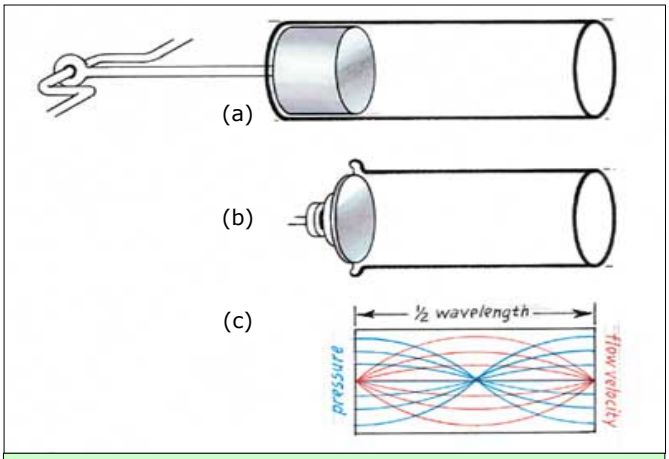


Fig. 4 – (a) La pressione del gas in un cilindro aumenta tanto maggiore è lo spostamento del pistone al suo interno. Per esempio in un cilindro di lunghezza di 200 mm uno spostamento di 10 mm del pistone provoca un aumento di pressione del 5%. Ma lo stesso aumento di pressione è generato se il pistone si muove avanti e indietro di 0,05 mm. (b) Ma spostamenti così piccoli possono essere prodotti con un altoparlante o con un soffietto metallico. L'onda di pressione raggiunge il suo massimo alle estremità del cilindro. Mentre il gas è interessato da spostamenti tanto maggiori quanto maggiore è il gradiente di pressione (tratto da American Scientist, The Power of Sound, S. Garrett. S. Backhaus, 2002)

Pensiamo d'indurre un'oscillazione dell'altoparlante di 0,05 mm. Lo spostamento rapido della superficie dell'altoparlante genera una onda di pressione che si trasmette nel gas alla velocità del suono[13]. L'onda di pressione si riflette e ritorna indietro fino a colpire di nuovo la superficie dell'altoparlante. Se la frequenza d'eccitazione dell'altoparlante è corretta, in altre parole se l'altoparlante è in fase con l'onda di pressione, l'altoparlante può aumentare l'energia e quindi l'intensità dell'onda di pressione. Se l'energia immessa è maggiore di quella dissipata nel percorso e a quella trasformata in lavoro utile, allora l'energia acustica aumenta fino ad un massimo che è caratteristico della cavità risonante. Nel caso di fig. 4.b, Steven Garrett e Scott Backhaus (2000) hanno appurato che con un cilindro è lungo 200 mm, nell'ipotesi che non ci siano perdite d'aria e che l'aria stessa sia a pressione atmosferica, la frequenza di risonanza è di 860 Hz (oscillazioni di pressione al secondo). Tale frequenza si ricava sapendo che l'onda sonora percorre 344 m in un secondo e che il percorso dell'onda nel cilindro è di 0,2x2 m. Quando l'eccitazione dell'altoparlante è effettuata con una frequenza di 860 Hz la pressione massima raggiungibile a regime è di 30 volte[14] la variazione di pressione indotta dallo spostamento di 0,05 mm della superficie dell'altoparlante.

4 Descrizione dei principi fisici coinvolti

In un motore termoacustico il calore ad alta temperatura T_h fornito al sistema si converte in energia acustica W ed energia termica ad una temperatura di livello più basso T_c come in fig. 5.a; viceversa in un refrigeratore termoacustico la fornitura di energia acustica W permette di trasferire calore da un livello di temperatura basso T_c ad un livello più alto T_h come in fig. 5.b

[13] Si ricorda che la velocità del suono per i gas perfetti è $c = (k\ R/M\ T)^{½}$ dove k =1,4 per aria, R=8.314,57 J/kmol K, M=28,97 kg/kmol, T=temperatura assoluta. Per esempio per aria a pressione e temperatura ambiente di 300K (23°C) la velocità del suono è pari a 344 m/s.

[14] Il valore riportato di 30 è chiamato anche *fattore di amplificazione della cavità* Q ed è uguale a $2/\pi$ volte il rapporto della pressione che l'altoparlante produce nel risonatore e la pressione che lo stesso altoparlante avrebbe generato se il tubo fosse infinitamente lungo in cui non ci sono onda riflesse.

Per capire com'è che funziona il dispositivo al suo interno, pensiamo ad un recipiente ermetico (come in fig. 4.b) con un gas inerte, inizialmente in condizioni uniformi di temperatura e pressione. Abbiamo visto che se eccitiamo il gas con un'onda di pressione o sonora con l'altoparlante (o una membrana vibrante) in ogni punto del gas interessato dall'onda di pressione, la pressione e la temperatura fluttueranno, ci saranno oscillazioni come in fig. 4.c. In realtà il recipiente ermetico dispone di un setto come in fig. 6 con dei canali longitudinali. Il gas nei canali in fig. 6.a (volume tratteggiato di colore bianco) soggetto alle onde acustiche, si sposta a sinistra comprimendosi, aumentando di pressione e pure la temperatura come mostrato da volume rosso in fig. 6.a. Se la variazione di pressione è molto rapida l'aumento di temperatura non sarà molto influenzato da una diffusione del calore lungo il percorso del volume. Backhaus e Garrett (2000) hanno stimato che per livelli di pressioni acustica pari a 74 dB la fluttuazione di temperatura è dell'ordine di grandezza è di 0,0001K; per livelli di pressione acustica di 120 dB la fluttuazione di temperatura è di circa 0,02K. Per ottenere fluttuazioni di un certo rilevo (oltre 20÷30K) bisogna aumentare ancora il livello di pressione acustica oltre i 170 dB[15]. Ciò è possibile se si sfrutta il principio fisico della risonanza, descritto in precedenza e, inoltre, ci si metta nelle condizioni in cui il criterio di Rayleigh venga superato (si veda tra i cenni storici). Per evitare che il calore o il freddo, generati nei vari punti del gas, sia disponibile con vantaggio, bisogna fare in modo che il gas stesso ceda calore o lo assorba da superfici solide tramite le pareti del setto come in fig. 6.a e 6.b e gli scambiatori di calore siano posti a sinistra e a destra del setto. Le condizioni ideali da realizzare sarebbero quelle in cui il volume compresso, alla sua massima pressione e temperatura, venisse in contatto con lo scambiatore caldo; mentre quando lo stesso volume espanso, alla sua mimima pressione e temperatura, venisse in contatto con lo scambiatore freddo[16]. La risonanza e lo scambio termico si realizzano adottando: una frequenza, una pressione del gas opportuna e un setto con canali longitudinali o poroso, come nella fig. 6 disegno in alto. Le dimensioni ottimali dei canali del setto, si è scoperto, sono un multiplo di quella che è chiamata *profondità di penetrazione termica*[17] δ che, a sua volta dipende dalla frequenza dell'onda sonora e dalle

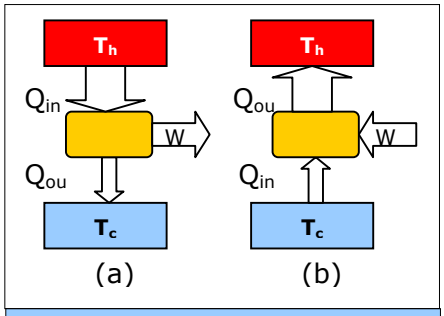


Fig. 5 - Flussi di calore e lavoro nel caso di (a) motore termoacustico; (b) pompa di calore o refrigeratore (Russel, Weibull, 2003)

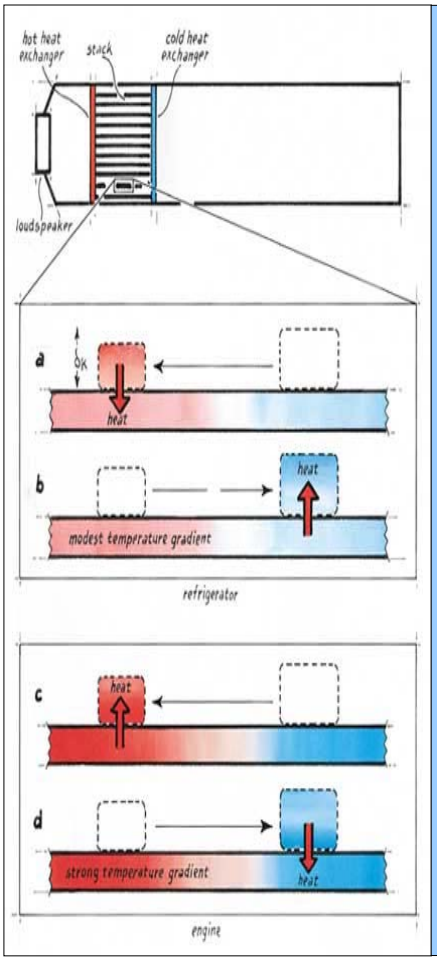


Fig. 6.
Schema di un dispositivo termoacustico. L'emissione sonora dall'altoparlante avviene con una frequenza uguale alla frequenza di risonanza propria del recipiente riempito di gas. Le onde sonore forzano il gas a muoversi avanti indietro attraverso le aperture del setto (stack). Se il la fluttuazione di temperatura è sufficiente il volume quando è compresso cede calore alla pareti solide che lo contegono (a) mentre quando è espanso assorbe calore dalle superfici adiacenti (b). Le porzioni di gas interessate dal riscaldamento e raffreddamento percorrono distanze modeste ma per effetto della loro vicinanza c'è un trasferimento dalla zona a bassa temperatura verso la zona ad alta temperatura. Lo stesso dispositivo funziona anche come motore. In questo caso le onde sonore sono generate imponendo una differenza di temperatura sufficientemente ampia alle estremità del setto. La differenza di temperatura genera energia acustica che può essere estratta dal dispositivo tramite attuatori piezolettrici, motori lineari, ecc. (tratto da American Scientist, The Power of Sound, S. Garrett. S. Backhaus, 2002)

Per chi volesse vedere l'animazione del volume di gas sen setto si rimanda al sito del LANL (si veda tra i i riferimenti) oppure il link www.lanl.gov/thermoacoustics/movies.html

[15] In alcuni prototipi sono stati rilevati fino a 194 dB.
[16] In questo modo il criterio di Rayleigh viene rispettato.
[17] δ è la distanza percorsa dall'onda termica durante il tempo t = 1/πf dove f è la frequenza dell'onda sonora stazionaria.

proprietà del gas[18]. Garrett e Backhaus hanno verificato che impiegando un altoparlante funzionante con frequenze audio con aria, la profondità di penetrazione termica δ è di 0,1 mm. Le larghezze dei canali ottime sono circa due volte δ [19][20].
In tali situazioni quando il gas è spinto dall'onda sonora nel canale del setto la pressione, la temperatura e la posizione variano da istante ad istante. Se il gas nel canale oscilla in fase con l'onda di pressione si creano condizioni in cui l'onda si amplifica fino a diventare stazionaria. La pressione massima è in fase con lo spostamento estremo e con la massima temperatura.
Lo spostamento del gas è modestissimo ma è sufficiente per creare "per effetto domino"[21] un trasferimento di calore da destra a sinistra del setto come nelle figure 6.a e 6.b Il calore è quindi disponibile alla sinistra del setto e può quindi essere asportato tramite uno scambiatore di calore compatto. Dalla parte opposta del setto c'è uno scambiatore di calore che asporta calore dal fluido di lavoro interno. Si realizza così un refrigeratore termoacustico.
Il dispositivo con pochi adattamenti è reversibile trasformandosi un motore come spiegato in fig. 6.c e 6.d. In questo caso al posto dell'altoparlante si installa un trasduttore di energia acustica. Il calore fornito alla sinistra del setto e all'asportazione del calore alla destra del setto mette in gioco un lavoro acustico. La differenza di temperatura genera un'espansione del gas a sinistra e una contrazione del gas a destra. Le onde di pressione che si generano vengono amplificate dal dispositivo risonante fino a produrre un lavoro acustico significativo. Questa, fra l'altro, è la spiegazione dei fenomeni avvertibili dai soffiatori di vetro nelle condizioni di fig. 3.
Nel caso di motori termoacustici le onde di pressione generate dalla differenza di temperatura come in fig. 6.c e 6.d sono intercettate da attuatori (trasduttori piezoelettrici o alternatori lineari) posizionati nei punti in cui la pressione è massima. I trasduttori e attuatori possono trasformano l'energia sonora direttamene in energia meccanica o energia elettrica.
Il dispositivo termoacustico è - in sintesi - un sistema per produrre energia meccanica o energia elettrica partendo da due sorgenti di calore a temperatura differente oppure, viceversa, è un sistema con il quale creare un effetto frigorifero o una sorgente di calore a temperatura maggiore (modalità in pompa di calore) fornendo energia meccanica o acustica o elettrica.

5 Come autocostruirsi un tubo che suona e fa freddo - Analogia con laser ottico

Scott Backhaus e Steven Garrett (2000) forniscono istruzioni molto semplici per costruire un *tubo che suona i*n fig. 7*.* Il team di ricerca della PSU su richiesta forniscono un kit per realizzare un motore acustico (che Garrett chiama laser acustico) in cui si utilizzano solo tre parti: il setto, ceramico (lo stesso usato nelle marmitte catalitiche); una resistenza elettrica fissata sul lato sinistro del setto e un tubo in Pirex che funziona come una canna d'organo che genera un suono con una frequenza fissa. Il tubo in fig. 7 è lasciato aperto da una parte e questo fa in modo che il setto sia raffreddato senza aver bisogno di alcuno scambiatore di calore.
Nonostante la semplicità costruttiva il tubo suona ad un livello che provoca disagio.

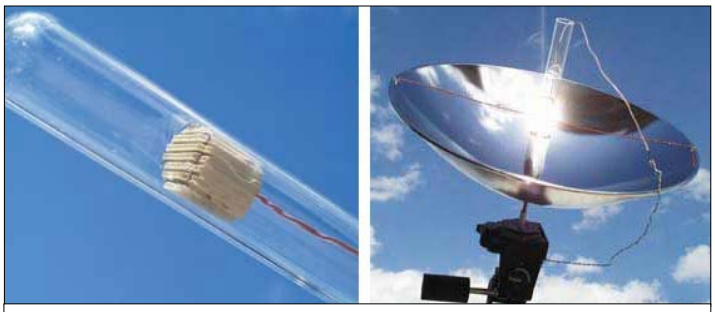
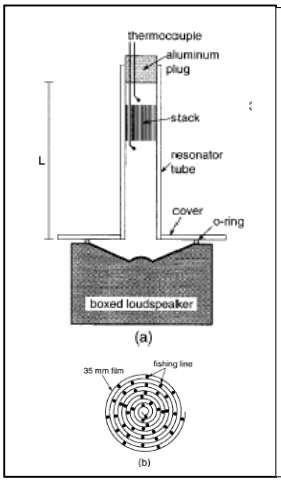


Fig. 7 – La foto di sinistra mostra un tubo che suona realizzato con tre soli parti: un tubo, un filo resistivo e il setto in ceramica (usato nei convertitori catalitici delle auto) adeguatamente posizionati possono generare circa un watt di potenza acustica. Se la zona dove è posizionato il filo è messa nel fuoco di uno specchio parabolico solare il dispositivo può diventare un motore per fini dimostrativi (tratto da American Scientist, The Power of Sound, S. Garrett. S. Backhaus, 2002)

[18] $\delta = [\lambda/(\pi \rho f c_p)]^{0,5}$ dove λ = conduttività termica del gas, ρ = densità del gas, f = frequenza dell'onda sonora, c_p = calore specifico del gas.
[19] In letteratura i vari autori hanno trovato larghezze ottime che variano tra 1÷4 δ a seconda delle applicazioni (refrigerazione, motore, separatore gas) e prestazioni volute.
[20] Garrett (2004) ci informa che negli ultimi prototipi il volume solido dei canali del setto occupa circa il 10% del volume interessato dalle onde acustiche.
[21] Scott Garrett (2000) si riferisce "all'effetto domino" come ad una "brigade", una truppa di militari (piccoli volumi gassosi) che marciano verso sinistra riscaldandosi e comprimendosi cedono calore; poi fanno dietrofront e marciando verso destra espandendosi e raffreddandosi assorbono calore.

Daniel Russel e Pontus Weibull (2002) forniscono invece istruzioni più dettagliate per realizzare un *tubo che fa freddo*, un refrigeratore termoacustico, per finalità dimostrative o educative. La differenza di temperatura all'estremità del setto ottenibile (T_h-T_c) è di oltre 18 gradi come è possibile vedere nel grafico di fig. 8.



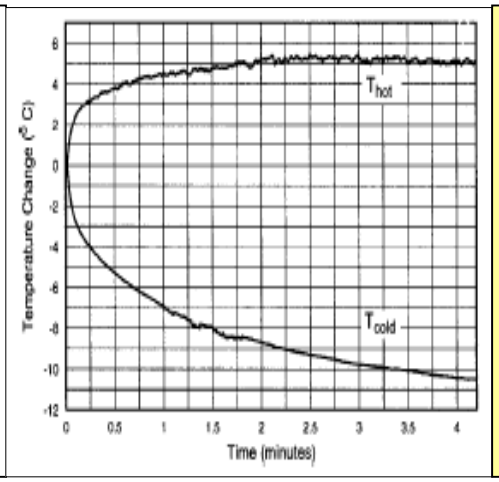
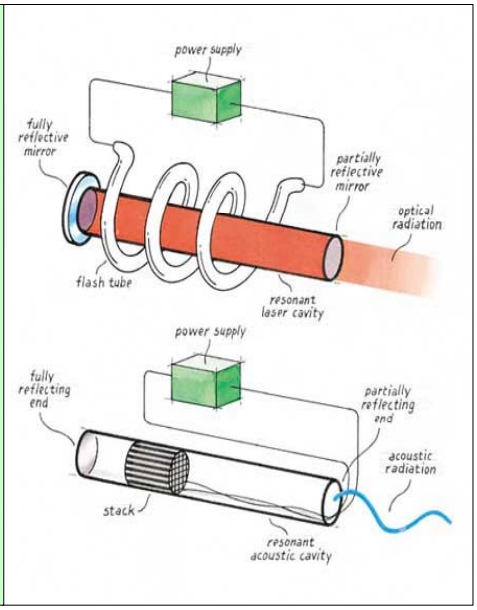


Fig. 8 – (a) Disegno schematico per realizzare un frigorifero termoacustico dimostrativo - (b) Sezione trasversale del setto. Gafico:Andamento delle temperature sopra e sotto il setto dal momento dell'accensione (tratto da Russel Weibull - Am. J. Phys. Dec.2002)

I materiali usati sono: un tubo di materiale acrilico lungo 230 mm, diametro interno di 22 mm; un coperchio sempre in materiale acrilico, da incollare al tubo come in fig. 8.a; un altoparlante da 40W di circa 100 mm di diametro; una guarnizione O-ring; un tappo di alluminio; due termocoppie; una pellicola fotografica da 35 mm, dei distanziatori in filo di nylon in modo da formare dei canali di 0,34 mm come in fig. 8.b. Il setto è posizionato a circa 40 mm dal tappo di alluminio come in fig. 8.a. La frequenza di risonanza del dispositivo è di 385 Hz.

Fig. 9 – I motori termoacustici sono simili ai laser ottici. Entrambi amplificano e rendono stabili onde entro cavità risonanti. Nel laser a rubino, l'energia è fornita tramite un tubo a flash che crea un fascio di elettroni ad un livello energetico maggiore. Nel dispositivo termoacustico l'energia è immessa nella cavità riscaldanto una estremita del setto che aumenta la disuniformità di temperatura e genera onde acustiche.



Per chi volesse realizzare un qualcosa di più sofisticato si rimanda ad un link, citato tra i riferimenti, in cui si può visionare il progetto di un refrigeratore termoacustico fatto da due studenti della New Mexico Tech. Inst. (USA).[22]
Backhaus e Garrett osservarono che nel tubo risonante aperto avvengono fenomeni molto simili a quelli di un laser ottico. Nel dispositivo fatto con tre pezzi, l'estremità aperta è equivalente ad uno specchio parzialmente riflettente da cui fuoriesce il raggio laser come in fig. 9.
Nel caso più semplice di tubo l'onda sonora si amplifica al punto che la pressione che si ottiene può essere molto elevata. La potenza acustica emessa è un indice dell'energia in gioco. Nel caso del tubo autocostruito di tre pezzi, Garrett e Backhaus (2000) affermano che si produce una potenza sonora di un Watt. In dispositivi simili se l'estremtà destra del setto viene riscaldata con una fiamma di gas naturale la potenza può arrivare fino a 10 kW.

6 Sviluppo della termoacustica, risultati ottenuti, ricerche in corso[23]

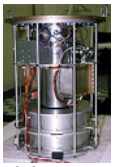
La Termoacustica nasce con i lavori di ricerca di Rott e collaboratori, in ambito criogenico, per spiegare l'effetto Taconis descritto in precedenza. Anche se i primi tentativi di spiegare matematicamente il fenomeno, come si diceva nei cenni storici, risalgono a Rayleigh (1878,

[22] Il progetto è un bell'esempio di pianificazione, studio, conduzione, conclusione degli esperimenti didattici di fisica in USA http://www.nmt.edu/~jaredc/professional/jartar_proj/project_report.htm.
[23] Greg Swift (1988) descrive il percorso fatto della Termoacustica a partire dallo scorso secolo. Egli fornisce riferimenti, collegamenti, riferimenti importanti per chi volesse approfondire l'argomento può vedere il link http://www.lanl.gov/thermoacoustics

1890) e Kyrchoff (1869) è il lavoro di Rott, tra il 1969-1980, che pone le basi per una descrizione matematica delle oscillazioni di pressione e temperatura.[24]
Yazaki (1980) confermò gli studi di Rott, spiegando sia l'effetto Taconis che le oscillazioni di Rijke (descritte nei cenni storici). Inoltre il lavoro fatto da Rott si dimostrò utile per capire, spiegare e prevenire (o favorire) le oscillazioni che accadevano in cavità in cui c'è combustione. Tali oscillazioni si dimostrarono dannose nei motori di razzo, mentre potevano essere utilizzate per incrementare l'efficienza di combustione nelle caldaie e nei generatori di potenza (Zinn, 1986). L'applicazione del lavoro di Rott portò Hofler, Wheatley, Swift e Migliori (1983, 1988) a scoprire il refrigeratore termoacustico e a spiegarne i fenomeni in dettaglio[25]. A tutt'oggi molte ricerche stanno sviluppando e migliorando quell'invenzione.
Gifford e Longsworth (1965) in modo del tutto fortuito, accidentale ed indipendente dal gruppo di ricerca scopritore del refrigeratore acustico, scoprirono che si poteva liquefare i gas con i tubi pulsanti con onde di pressione quadrate. Fu solo dopo qualche anno che ci si accorse che i fenomeni dei refrigeratori termoacustici e quelli a tubo pulsante condividevano molti fenomeni fisici termo-acustici e, in particolare, si conformavano al criterio di Rayleigh.
Lo sviluppo della refrigerazione a tubo pulsante da parte di Mikulin e di Radenbaugh tra il 1984 e 1990 (dispositivi utilizzati nel raffreddamento di sensori all'infrarosso nei satelliti e negli impianti di terra) evidenziò ancora di più la contiguità con la refrigerazione termoacustica e, inoltre, dei punti di contatto con refrigeratori criogenici a ciclo Stirling.
Con le ricerche fatte da Ceperly, tra il 1979-1985, i motori e i refrigeratori Stirling si arricchiscono anche dei fenomeni termoacustici.[26] I risultati di Ceperley vennero dimostrati successivamente da Yazaky e collaboratori (1998), deBlock (2001), Backhaus e Swift (1999). Miglioramenti rilevanti vennero raggiunti ibridando i dispositivi termoacustici con un rigeneratore in cui immagazzinare o cedere calore come nei motori Stirling.
Miglioramenti nella descrizione dei fenomeni termoacustici si devono a:
Wheatley e Cox (1985), configurazione della cavità e interfacce gas-superfici solide, dimensioni dei canali dei setti);
Feldman (1966, 1970), ruolo delle interfacce gas scambiatori di calore;
Olson e Swift (1997), riduzione delle perdite termiche nei tubi pulsanti;
Swift (1999), descrizione analitica e concettuale dei fenomeni dei motori e refrigeratori termoacustici Stirling, modellazione.
L'applicazione del rigeneratore Stirling, e la scoperta che la potenza dispersa era proporzionale al prodotto della fluttuazione di pressione con la velocità del gas, spinse Backhaus e Swift a modificare la conformazione del volume di gas includendo un risonatore di Helmoltz[27] avente una frequenza naturale della cavità uguale a quella delle onde stazionarie di pressione; in proposito si veda la fig. 10.c. Gli studi condotti da Spoor e Swift (2000), Geller e Swift (2000) portarono alla scoperta che la termoacustica può essere impiegata anche per la separazione dei gas. Nel 1999 Backhaus e Swift presentarono un motore termoacustico a ciclo Stirling di un kW di potenza che aveva un'efficienza del 30%.[28]

(a)

(b) PSU


(c) NPS

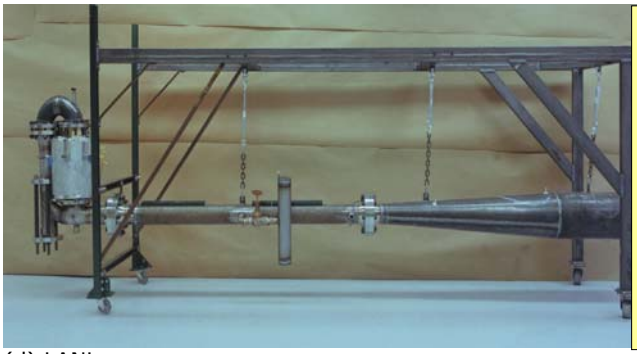

(d) LANL

Fig. 10
Dispositivi termoacustici utilizzati per ricerca e applicazioni:
(a) Steven Garrett con i suoi refrigeratori termoacustici.
(b) http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration "Bellows Bounce" resonator svilupapto dalla Penn State University
(c) Refrigeratore installato sul Space Shuttle STS-42 realizzato dal NPS.
(d) Protiro Refrigeratore Stirling con risonatore di Helmoltz del LANL

[24] Swift afferma che è proprio a Rott che si deve l'introduzione del termine Termoacustica http://www.lanl.gov/thermoacoustics.
[25] Brevetto N° US 4 722 201. Per le macchine a ciclo Stirling si veda tra i riferimenti Walker e Organ, Iurieli.
[26] Ceperly brevetta (N° US 4 114 380) nel 1978 il primo motore termoacustico con rigeneratore Stirling.
[27] Un risonatore di Helmoltz (1872) si comporta come una molla accoppiata ad una massa M, in cui la frequenza di risonanza è tipica come negli strumenti musicali (viola, violino, chitarra, ocarina, fischietto, celesta, ecc.
[28] Notizie dei miglioramenti nel tempo sono desumibili dal brevetto No. US 6 725 670 di Smith, Poese, Garrett, Wakeland (2004)

Dal 1983, anno in cui Wheatley, Swift, Migliori registrarono il loro primo brevetto, si sono fatti parecchi passi in avanti per rendere i motori e i refrigeratori termoacustici più competitivi. Da evidenziare anche una ulteriore ricaduta dello sviluppo dei sistemi termoacustici: oggi sono disponibili dei convertitori elettro-acustici con rendimenti maggiori del 90% per potenze fino a 5 kW[29] e convertitori di moto lineare in energia elettrica per potenze comprese tra 0,5 e 15 kW[30].

7 Applicazioni principali

Steven Garrett negli anni '90 sviluppò due refrigeratori termoacustici per lo Shuttle: il primo fu utilizzato per refrigerare l'elettronica e il secondo per refrigerare campioni di sangue e urine degli astronauti coinvolti in sperimentazioni mediche. Entrambi i refrigeratori erano in configurazione ridondante (come in fig. 11) proprio per assicurare alta affidabilità di funzionamento.

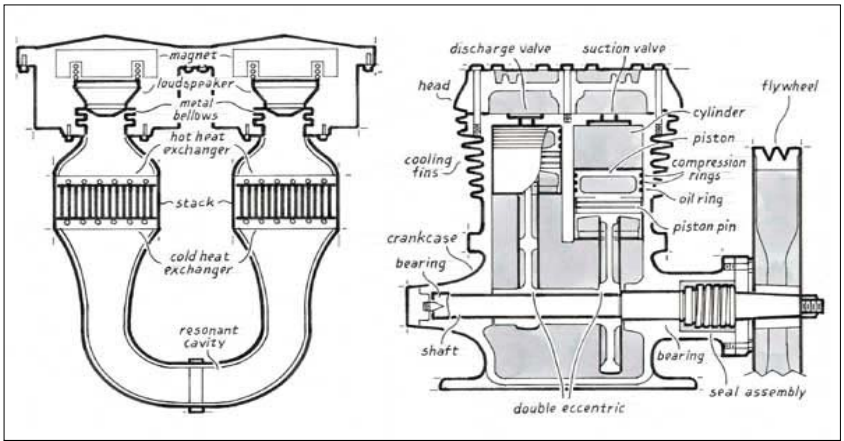


Fig. 11 – Sezione di un refrigeratore termoacustico e di un compressore frigorifero alternativo. Il refrigeratore termoacustico ha trovato impiego nel raffreddamento dell'elettronica dei radar. La configurazione mostrata a sinistra impiega due altoparlanti (uno è di scorta) e nessuna parte in movimento soggetta ad usure. E' questo l'aspetto che differenzia in modo significativo il refrigeratore termoacustico rispetto al compressore tradizionale a destra (tratto da American Scientist, The Power of Sound, S. Garrett, S. Backhaus, 2002)

Il refrigeratori installati su navi per raffreddare l'elettronica dei radar avevano un'efficienza complessiva di 17%, contro il 25-30% di un sistema frigorifero tradizionale operante con le stesse potenze e temperature.

Garrett ha in corso una ricerca in cui il motore termoacustico è accoppiato ad un convertitore di pressione in energia elettrica (tecnologia STAR).[31]

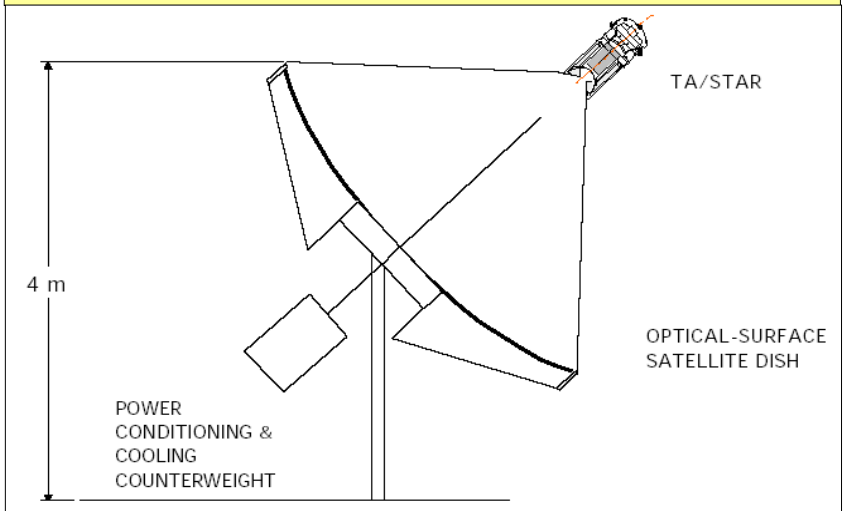


Fig. 12 - Sistema solare per produrre energia elettrica tramite un motore Stirling termoacustico e un convertitore STAR (tratto da http://www.lanl.gov/mst/engine/CFIC.pdf)

Presso l'Università Missisipi è in corso un progetto di un sistema termoacustico, azionato da calore di combustione, per la liquefazione del gas naturale nei luoghi d'estrazione.[32]

La Praxair e il LANL hanno realizzato un impianto pilota per liquefare i gas.[33]

A partire dal 1999 Backhaus e Swift ottennero agevolmente efficienze maggiori del 30 % pari, se non addirittura migliori, ai tradizionali motori a combustione interna[34, 35].

[29] Tali informazioni sono desumibili dalla descrizione del progetto Triton descritto nel brevetto citato in precedenza No. US 6 725 670 di Smith, Poese, Garrett, Wakeland (2004)
[30] Si veda il link http://www.lanl.gov/mst/engine/CFIC.pdf in cui forniscono dati e informazioni sulla tecnologia STAR.
[31] Per i dati tecnici e la descrizione dei dispositivi si veda i links della Star e del LANL riportati alla fine.
[32] Il link dell'università del Missisipi fornisce anche parecchie altre informazioni in merito alla ricerche termoacustiche.
[33] Per i dati tecnici si vedano i links della Praxair e del LANL riportati nei riferimenti.
[34] Notizie dei miglioramenti nel tempo sono desumibili dal brevetto No. US 6 725 670 di Smith, Poese, Garrett, Wakeland (2004)
[35] Backhaus And G. W. Swift nel loro articolo su Nature (1999) ebbero ad evidenziare che i motori a combustione interna hanno rendimenti compresi tra 25 e 40% mentre i motori Stirling a pistoni hanno rendimenti tra il 20 e 38%.

Nel giugno 2004 il team della Penn State University ha presentato ad una conferenza internazionale a Bruxelles, il primo prototipo di refrigeratore termoacustico installato su un frigorifero commerciale della Ben Jerry Unilever (figg. 1 e 13).

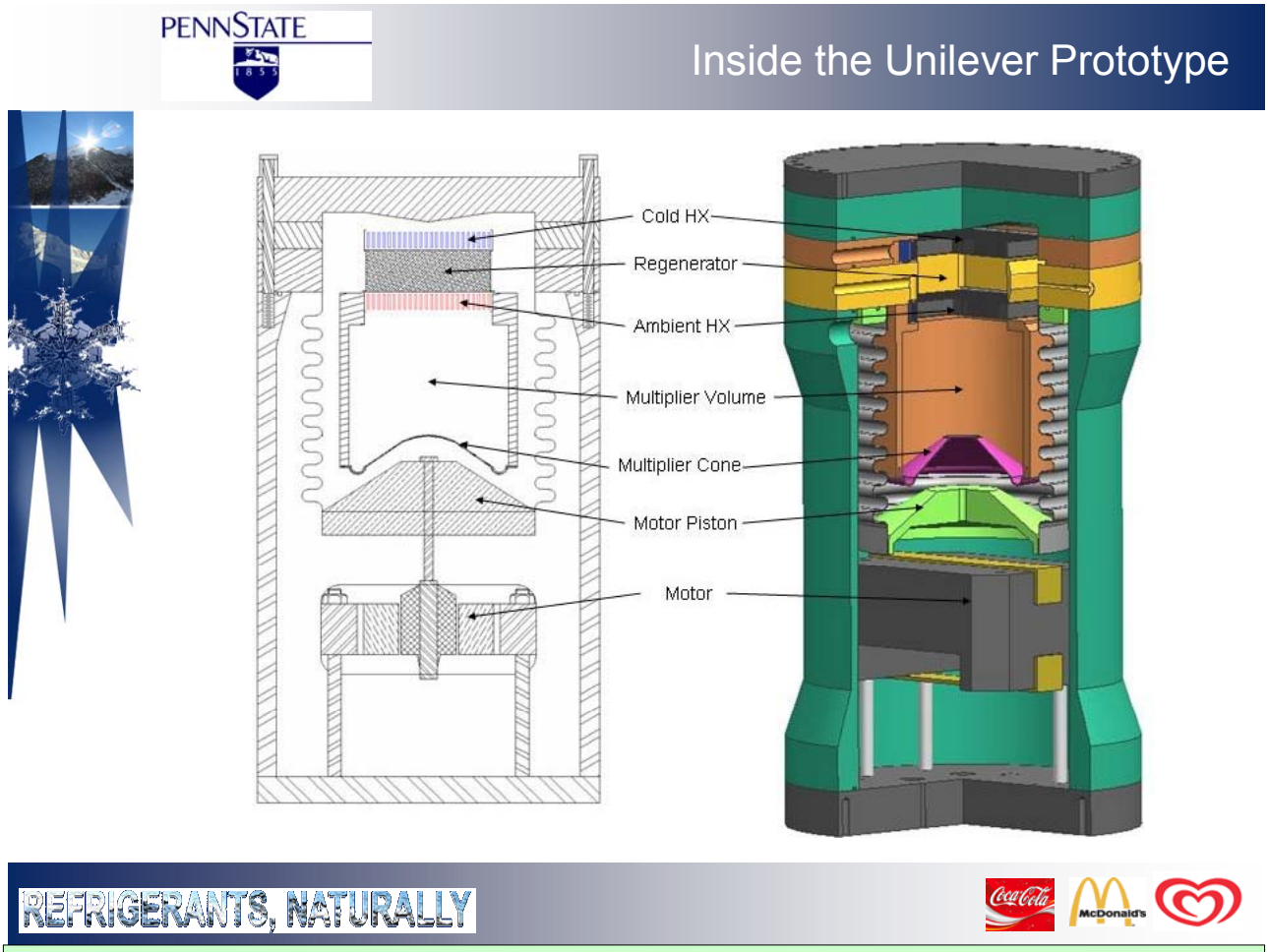


Fig. 13 -Refrigeratore termoacustico realizzato dalla Penn State University per la Ben Jerry (sussidiaria Unilever) presentato alla conferenza del giugno 2004. Come si può notare non ci sono parti in movimento, nessun lubrificante, volumi ridotti. La potenza frigorifera è regolabile con continuità agendo sull'ampiezza della membrana vibrante. Per avere un'idea delle dimensioni si veda anche la fig. 1. Le prestazioni del prototipo sono desumibili dalle figure successive. (tratto da http://www.refrigerantsnaturally.com/pps/PSU%20Thermoacoustics.pps)

PENNSTATE

Performance Measurements and Model

Quantity and unit	*Meas.*	*Model*	*Comments*
T_{load} (°C)	-24.6		Model input
$T_{exhaust}$ (°C)	33.9		Model input
Acoustic Pressure (kPa)	50.81		Model input
Multiplication Ratio (%)	8.48	8.41	Model result
Acoustic Power (W)	125	134	Model result
Motor Power Input (W)	147	160	Model result
Useful Cooling Power (W)	119	125	Model result
Exhaust Power (W)	266	297	Model result
Overall COP	0.81	0.78	Model result
Overall COP rel Carnot	19%	18%	Model result

REFRIGERANTS, NATURALLY

Fig. 14 – Dati relativi al refrigeratore termoacustico prototipo delle figure 1, 13. Il team della PSU ritiene di aumentare il COP da 0,81 a 1,17 già con il secondo prototipo.
Per un confronto è utile sapere che con un refrigeratore equipaggiato Embraco model EMI45HER (R134a) il COP=1,4.
Miglioramenti previsti a breve:
1. riduzione della superficie flessibile emetica (10 W)
2. Ottimizzazione del materiale del rigeneratore (17W)
3. Riduzione input elettrico (32W)
COP dopo miglioramenti = 1,17 (tratto da http://www.refrigerantsnaturally.com/pps/PSU%20Thermoacoustics.pps)

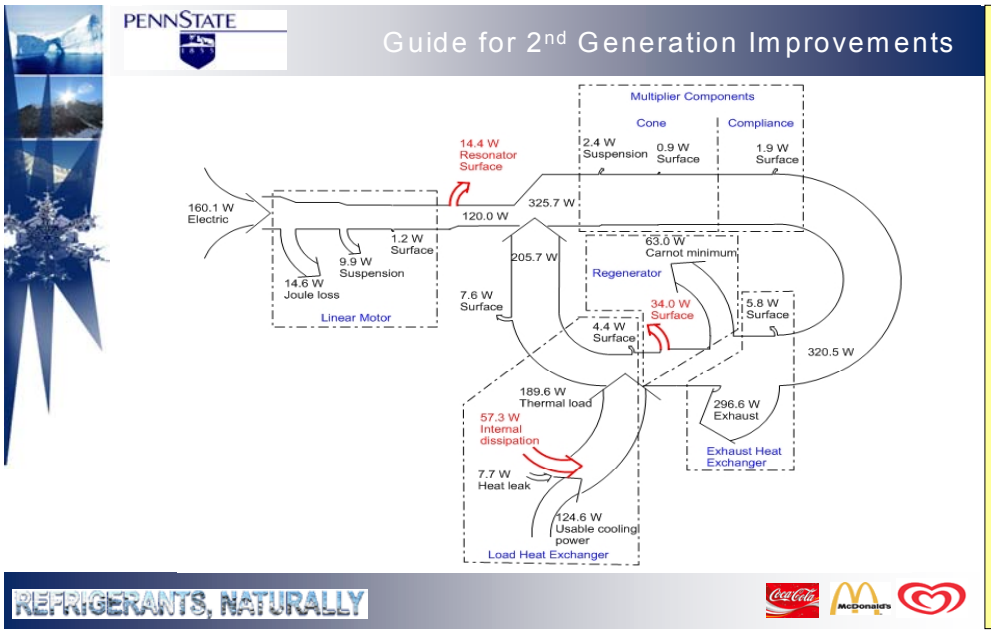


Fig. 15 – Diagramma di Sankey da cui rilevare i flussi energetici relativi al prototipo della fig. 13.

Il digramma consente di visualizzare le perdite di energia nelle varie parti del refrigeratore termoacustico. Il diagramma permette una agevole valutazione dei punti prioritari da migliorare. Il controllo proporzionale è più economico e consente un aumento dell'efficienza del 52%.
I refrigeratori della seconda generazione con controllo proporzionale avranno un COP = 1.7.
(tratto da http://www.refrigerantsnaturally.com/pps/PSU%20Thermoacoustics.pps)

Il COP frigorifero misurato sul prototipo è 0,81 contro 0,78 calcolato (fig. 14)[36]
Lo stesso team PSU ha rilevato che le prestazioni di un frigorifero tradizionale sono ancora più favorevoli: infatti il COP del frigorifero commerciale preso come riferimento arriva a 1,4: si vedano i dati e la legenda in fig. 14.
Il team PSU ha però previsto a breve di realizzare dei miglioramenti per arrivare agevolmente ad un COP = 1,17.
L'ottimizzazione delle parti che più dissipano energia (si veda in proposito il diagramma di fig. 15) e la realizzazione di un prototipo di seconda generazione, in cui introdurre anche la regolazione proporzionale, agendo sull'ampiezza della vibrazione - sempre secondo il team PSU- dovrebbe consentire di arrivare ad un COP di 1,7.
A dispetto della pressione acustica interna che è superiore a 17o dB, quella esterna, nel primo prototipo, è stata stimata in meno di 60 dB. E chi conosce i frigoriferi commerciali sa quanto l'aspetto della rumorosità è importante.
Greg Swift ha in costruzione un generatore termoacustico di un MW che incorpora un setto generatore di potenza acustica e due rigeneratori-risonatori.[37]

8 Futuro dei motori e refrigeratori termoacustici

Backhaus e Swift (2002) prevedono che il sistema termoacustico sia agevolmente utilizzabile nei motori solari per la produzione di energia elettrica come nelle fig. 7-destra (solo a scopo dimostrativo) e fig. 12.
Swift (2004) ha recentemente evidenziato che attualmente i motori Stirling termoacustici sono in fase di sviluppo pre-industriale sia per la generazione di potenza nei mezzi spaziali che per i sistemi di cogenerazione terrestri.
I sistemi termoacustici possono essere utilizzati negli autoveicoli ad uso personale o il trasporto di merce deperibile. Utilizzando l'energia dei gas di scarico si può produrre freddo per mezzi frigoriferi o/e per l'aria condizionata.
I motori termoacustici Stirling sono potenzialmente utilizzabili nei mezzi di trasporto integrandosi al motore tradizionale o anche in alternativa ai motori endotermici.
I refrigeratori termoacustici Stirling si pongono come alternativa ai sistemi di refrigerazione tradizionale con il vantaggio di:
- non avere parti in movimento

[36] Il fatto che il valore misurato e quello sperimentale siano molto vicini è un indice della qualità della progettazione. Se altre validazioni dovessero fornire risultati simili sarebbe possibile dire che il modello e il SW (con alta probabilità il SW utilizzato dalla PSU è Delta-E sviluppato da Swift e Ward al LANL) utilizzato in fase di progetto è parecchio accurato.
[37] Backhaus e Swift descrivono per la prima volta il motore termoacustico in cascata nell'articolo http://www.lanl.gov//thermoacoustics/Pubs/ICSV9.pdf

- utilizzare gas quali elio, argon o xeno, che non hanno impatto sull'ambiente come per gli HCFC
- non presentare problemi di sicurezza come per gli idrocarburi.

Ovviamente i refrigeratori sono utilizzabili come pompe di calore per riscaldamento ambientale e nei processi industriali.
Swift (1999) nell'introduzione del suo libro descrive una sua originale visione del futuro che vale la pena di riportare.
a) Pompe di calore azionate da motori lineari termoacustici da utilizzare per il riscaldamento dell'acqua sanitaria o per i locali e – nel contempo – per disporre di una potenza frigorifera per refrigerare alimenti, ecc.
b) Sistemi per produrre ossigeno e azoto liquidi per ogni ospedale locale costruito da un motore termoacustico riscaldato dalla combustione di gas naturale che è accoppiato a refrigeratori a tubo pulsante per liquefare l'aria, distillarla per produrre azoto e ossigeno, o per re-liquefare gas puri per lo stoccaggio in dewars.
c) Sistemi di grande dimensione, riscaldati da gas naturale, utilizzati per liquefare il gas appena estratto dalle piattaforme, impiegato esso stesso come gas nei refrigeratori per essere stoccato in navi metaniere.
d) Sistema da installare su Marte azionato da un piccolo generatore da 100 kW di potenza acustica, collegato ad un vasto assortimento di separatori e refrigeratori di miscele di gas, che divida l'anidride carbonica e l'acqua congelata sotterranea in idrogeno e ossigeno da impiegare in celle a combustibile, nei robot o nelle abitazioni marziane.
Greg Swift afferma che in questi sogni, che hanno ambiti molto differenti, ci sono alcune caratteristiche in comune:
1 - impiegano tecnologie di basso livello: tubi di diametri elevati, scambiatori di calore convenzionali, particolari in plastica stampata, ecc.
2 - l'illusoria semplicità: Swift avverte che la sfida tecnica, nel progettare questi dispositivi facili da costruire, è ardua ed estrema.
Certo, quanto detto da Swift nella prefazione del suo libro "sembra proprio una americanata" da prendere "con le molle". Dobbiamo ricordarci che in America spesso si comunica per "visioni" o immagini di effetto. Dovremo abituarci!
Personalmente però penso che Swift … "veda" parecchio bene.

9 Conclusioni

La più completa panoramica sui motori e refrigeratori termoacustici è costituita dagli articoli riportati tra i riferimenti di Steven Garrett (2000, 2004) e Greg Swift (2002) e di altri ricercatori.
Una fonte molto aggiornata e documentata è anche il recente brevetto No. US 6 725 670 di Smith, Poese, Garrett, Wakeland (2004) da cui si desumono i brevetti collegati e i principali riferimenti di letteratura.
La maggior fonte di approfondimento e il riferimento, per chi vuole svolgere attività di progettazione nei motori e refrigeratori termoacustici, è data al libro di Greg Swift, arrivato alla quarta edizione, oltre ai numerosi links disponibili in Internet elencati più avanti fra i riferimenti.

1. L'applicazione della termoacustica con il solare è promettente. In particolare nella configurazione con rigeneratore Stirling. I rendimenti di conversione solare-elettrico possono essere superiori al 30%. Il tempo di ritorno energetico sembrano molto interessanti proprio perché le tecnologie impiegate nella costruzione sono tradizionali. Gli addetti ai lavori hanno stimato che il costo di produzione per piccoli dispositivi è dell'ordine dell'Euro per Watt.[38]

2. I motori termoacustici sono attualmente utilizzati in applicazioni spaziali e militari. C'è però più di un prototipo che è stato concepito per usi civili, commerciali e industriali. Sono ormai molti i casi che si possono valutare e analizzare utilizzando i links riportati nei riferimenti. Al momento l'ostacolo alla loro diffusione sembra essere l'esigenza di disporre di conoscenza multidisciplinare per la loro progettazione.

[38] Nella presentazione al link http://civil.colorado.edu/~muehleis/publications/asa_smatar.pdf si afferma che il costo è sotto 1$/W per dispositivi della dimensione di 65x155 mm con potenze fino a 16 W e differenze di temperatura di 25 gradi-

3. La "termoacustica" è una delle frontiere di ricerca di parecchie università americane. Una ricerca in Internet fatta sulle attività universitarie italiane, Cnr ed Enea hanno evidenziato che le uniche ricerche in corso sono presso le Universita di Messina[39] e di Palermo. Da quanto si vede in Internet il tema è campo aperto. Per chi volesse approfondire il tema raccomando i tre siti Web più importanti: LANL, PSU, NPS. Personalmente credo che la termoacustica sia un settore su cui investire sotto vari punti di vista.

4. La termoacustica promette bene sia come motore primo che come macchina frigorifera. Si segnala il link http://www.benjerry.com/our_company/sounds_cool/ in cui si può visionare un video molto simpatico della Ben&Jerry, un'azienda americana molto nota, che produce gelati e che sta sperimentando un frigorifero con un sistema termoacustico. Nel sito si legge che la Ben Jerry è uno degli sponsor della Penn State University (è uno dei centri di eccellenza in USA per la Termoacustica) presso cui si stanno sviluppando le applicazioni termoacustiche (motori, refrigeratori) accoppiati o abbinati a solare, gas naturale, energia elettrica, ecc. La conferenza di Bruxelles del 22 giugno 2004, Refrigerants Naturally[40], e il recente articolo del team PSU a Glasgow è stata l'occasione per avere gli ultimi dati sul frigorifero della Ben Jerry. Le prospettive sembrano ottime.

5. C'è la possibilità di autocostruirsi un refrigeratore termoacustico seguendo le indicazioni dell'articolo Tabletop Thermoacoustic Refrigerator for Demonstrations di Russel e Weibull (2002) oppure studiandosi il testo di Greg Swift. Nei riferimenti si forniscono dati e links per approfondimenti. Per le aziende che vogliono fare sperimentazione seria in proprio consiglio di chiedere supporto a CNR ed Enea o alla locale Università.

6. Ci sono aziende che già producono (o sono prossime a produrre) refrigeratori e motori termoacustici. Nei riferimenti raccolti ci sono i links anche di queste aziende. A tal proposito i motori descritti nel link di Fellows Research Group sembrano avere prestazioni migliori di quelli sviluppati al LANL e alla PSU. La potenza specifica generabile arriva a 5 kW/kg. Tanto per far un esempio, se si realizzasse un motore termoacustico dello stesso peso di quello installato su una formula 1 (circa 200 kg) la notevole potenza disponibile sarebbe di 1000 kW. In realtà le potenze sono fortemente dipendenti dalle differenze di temperature adottate.

Concludo affermando che i più recenti risultati ottenuti in America stanno facendo della Termoacustica un campo su cui, chi definisce i programmi di studio universitari, chi gestisce la ricerca pubblica o privata, chi è interessato all'innovazione industriale, chi è interessato a fare un passo verso soluzioni con meno impatto sull'ambiente, dovrebbe concentrare attenzione - a mio parere – e sforzi concreti.

10 Riferimenti sulla termoacustica

La fonte maggiormente aggiornata e dettagliata è fornita da un articolo di Steven Garrett del gennaio 2004. L'articolo è consigliato a chi pensa di lavora o già lavora nel settore. Per chi vuole effettuare un benchmarking delle tecnologie energetiche consiglio il link http://www.eere.energy.gov/solar/pdfs/sda_not_in_kind.pdf. Il rapporto è del 2000. Si cita la ponderosa relazione perché è interessante vedere l'impostazione dell'analisi per le varie tecnologie per il settore commerciale-residenziale – Ovviamente è trattata anche la termoacustica, quella del 2000 – Le conclusioni oggi sarebbero da aggiornare in modo significativo.
I riferimenti raccolti di seguito sono il frutto di ricerche in internet con le seguenti parole chiave: thermoacoustics, thermoacoustic refrigerator, thermoacoustic engine, thermoacoustic design, sonic refrigeration, thermoacoustics conference,

10.1 Siti Web di introduzione alla termoacustica

FAQ at University of Colorado – Sintetico elenco di FAQ sulla termoacustica. E' consigliato a chi non ha dimestichezza con la matematica o l'ingegneria – Peccato non ci siano animazioni.

American Scientist Magazine - The Power of Sound di Steven L. Garrett and Scott Backhaus. *American Scientist*, Nov.-Dec. 2000 – L'articolo è apparso sia sulla rivista e sia nel sito Web. A mio parere è il migliore articolo divulgativo su Internet sull'argomento. E' servito come base della presente relazione.

[39] Si veda le scheda dei progetti nei links riportati tra i riferimenti.
[40] La conferenza, a carattere divulgativo, è stata organizzata da Unep e Greenpeace con sponsors Unilever, Coca-Cola, McDonald - Il materiale disponibile nel sito è molto interessante per ampiezza, concretezza - Il link all'articolo della ThermoacousticsCo.com (estensione della PSU) è:
http://www.refrigerantsnaturally.com/pps/PSU%20Thermoacoustics.pps

http://www.mit.edu/~howitt/humcool/ - E' disponibile un iper-testo con animazioni dei fenomeni termoacustici – Il sito è abbinato allo sviluppo dei condizionatori termoacustici HumCooler studiati (e forse già sviluppati) dal MIT – Consigliato a chi non ha conoscenze tecniche avanzate ma è indirizzato alla sperimentazione – Oltre alle animazioni si forniscono links ai fornitori o verso siti per approfondire temi e argomenti specifici – Assolutamente da vedere.

http://www.lanl.gov/thermoacoustics/ehistory.pdf - E' il più aggiornato documento (è un rapporto del Los Alamos Nation Lab datata aprile 2004) riguardante la storia della Termoacustica. L'autore Greg Swift è il più autorevole esperto di termoacustica. Tale documento è stato utilizzato in modo estensivo nel rapporto per delineare in sintesi la storia della termoacustica.

10.2 Video & Audio

The Earth Ozone Hole – Che cosa succede all'ambiente e alla nostra salute – Da visionare prima di vedere il film "the Day After Tomorrow" oppure prima di una campagna pubblicitaria centrata sull'ambiente – Utile per chi sta investendo in iniziative per ridurre l'impatto sull'ambiente.

NASA Animation – La formazione del buco di ozono sopra l'Antartide in una serie di immagini animate della NASA – Idem come sopra.

Ben & Jerry's Ice Cream – La Ben& Jerry è una sussidiaria Unilever - Interessante il video sull'impiego della refrigerazione termoacustica nel settore commerciale - E' un buon esempio di marketing via Internet.

LANL - Cascade Thermoacoustic Engine – Il video mostra il prototipo di un motore termoacustico in cascata – Non ci sono commenti parlati o scritti – Consigliato solo a chi ha letto l'articolo di Gardner e Swift (2003).

10.3 Comunicazione, articoli di giornale, notizie on line

http://www.sciencentral.com/articles/view.php3?type=article&article_id=218392316 - L'articolo del 30/07/04 "Cool Sounds" della Science Central News, disponibile in Internet, informa dell'iniziativa della PSU con sponsor Ben Jerry sussidiaria Unilever – Si legge che il parco di frigoriferi commerciali è di 14.000 unità - Interessante anche perché si cita l'Unilever come sponsor – La pagina da i links ad altri articoli disponibili sul Web sulla termoacustica e, anche alle pagine della Penn State University.

www.usatoday.com/tech/columnist/ andrewkantor/2004-07-23-kantor_x.htm – Divertente articolo USA Today, di Andrew Kantor del 23/07/04 che introduce i lettori alla refrigerazione sonica o termoacustica – Si cita il progetto della PSU con sponsor della Ben&Jerry (per $600.000) – Si riporta che ci vorranno du eanni per trovare il frigorifero da Sears (ipermercati).

http://www.refrigerantsnaturally.com/ - Link ai materiali presentati alla conferenza del 22 giugno 2004 – "Introducing innovative ozone and climate-friendly refrigeration solutions for the food & drinks sector at the point of sales to manufacturers, users, stakeholders and the media" sponsorizzata da Greenpeace, Coca-Cola- Mc-Donald, Unilever – E' sicuramente un buon punto di partenza per crearsi un quadro di riferimento per un business plan aggiornato – Consigliato agli addetti ai lavori e nuovi imprenditori.

http://www.neural.it/nnews/suonofreddo.htm - Nel trafiletto "**Il suono freddo"** del 06/12/02 si informa propotipo di Steven Garrett – Pressione interna sonora di 173 dB e temperatura minima raggiunta –8°C – Si vedono Garrett e suoi due prototipi in primo piano.

BBC - Research sponsored by Ben & Jerry's Ice Cream - Articolo della BBC in cui si forniscono alcuni dati del frigorifero della Ben Jerry (quello di fig. 1). Ci sono le interviste di Scott Garrett e Greg Swift.

USA Today - Ben & Jerry's breaks the sound barrier – Articolo di USA Today del 054/12/02 in cui si forniscono alcuni dati del frigorifero della Ben Jerry (quello di fig. 1) ci sono interviste a Steven Garrett e Greg Swift.

http://www.corriere.fantascienza.com/NEWS/?2002112905 - Trafiletto on line del 2002 in cui si informa del prototipo di frigorifero a onde sonore messo a punto dal professor Steven Garrett della Penn State University (in fig. 10.b). Il team di Garrett sono riusciti a raggiungere una temperatura di -8 °C – Interessante vedere il prototipo in foto in primo piano.

http://www.enitecnologie.it/tpoint/Notizie/Fasc4_02/NovitaInVista.pdf - Articolo di De Vita dell'Eni che informa dei risulatai ottenuti dal LANL sulla liquefazione del Gas Naturale e GPL e delle prospettive della tecnologia termoacustica nella criogenia. Si informa dell'acquisto della tecnologia da parte della Praxair.

Scientific American - Sound Waves Chill in New Freezer Design – Trafiletto in cui si informa dell'esperienza della Ben&Jerry e team di ricerca PSU - Intervista a Steven Garrett.

DOE - U.S. Department of Energy – E' il comunicato stampa DOE del settembre 2002 in cui si annuncia la scoperta della separazione dei gas in miscele tramite l'effetto termoacustico da parete del LANL con finanziamenti DOE.

Newspaper Articles on Thermoacoustics - Articoli apparsi nei giornali americani in questi ultimi anni.

Innovations News Report – L'articolo giornalistico è del 1998 ma nonostante sia un po' datato ci sono informazioni utili relative al progetto di Scott Garrett al NPL. E' interessante vedere come le considerazioni e le opinioni si sono modificate nel tempo anche da parte di Greg Swift.

10.4 Termoacustica sperimentale a scopi educativi

http://www.nmt.edu/~jaredc/professional/jartar_proj/project_report.htm - Due studenti di astrofisica del New Mexico Tech Institute, Jared Crossley e Robert Koegler spiegano, con notevole dettaglio, il progetto di un refrigeratore termoacustico e la sua realizzazione – Interessante leggere quali sono e come sono condotte le attività formative nel corso di Fisica (Physics 411-Thermodynamics and Statistical Physics) anche quando non portano a risultati positivi

Thermoacoustic Pipe - You can hear the sound – Il sito descrive come realizzare un tubo che suona utilizzando l'effetto Taconis. Istruttivo, da proporre anche per attività formative.

http://www.kettering.edu/~drussell/Publications/ThermoDemo.pdf - Articolo di Russel e Weibull in cui si forniscono dettagliate istruzioni per realizzare un refrigeratore termoacustico per scopi dimostrativi - Consigliabile a chi di diletta in sperimentazione o ai docenti di fisica o ingegneria.

10.5 Libri sulla termoacustica

Swift, Gregor W. - Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators ASA Pub. - 320 pages – 2002 - E' un libro di testo a livello universitario che tratta i motori e refrigeratori termoacustici come dispositivi di una stessa famiglia di fenomeni fisici - Il testo include un CD ROM con animazioni e il SW Delta-E con il proprio Manuale d'uso – Il costo di $70 ($50 per ASA's members). Il libro di Greg Swift è acquistabile presso la **Acoustical Society of America.**
Per operare con cognizione di causa nella termoacustica Swift consiglia il seguente percorso:
- Capitoli 5,10 (e forse 14) del testo di Kinsler, Frey, Coppens, and Sanders - Fundamentals of Acoustics,
- (metà libro) del testo di Van Wylen and Sonntag - Fundamentals of Classical Thermodynamics,
- il testo di Kreyszig - Advanced Engineering Mathematics, soprattutto per chi non avesse dimestichezza con i numeri immaginari.
Sembra un buon consiglio per chi voglia lavorare seriamente. Swift ci informa che c'è molto da imparare e quindi consiglia pazienza.

Dincer, Ibrahim - Refrigeration Systems and Applications – John Wiley & Sons – 2003 - Hardcover - 598 pages - ISBN: 0471623512
E' uno dei pochi testi di refrigerazione in cui si dedica spazio alla refrigerazione termoacustica.

Swift, Gregor W. – Thermoacoustics - McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 9th edition, Volume 18, 353-355 (2002) – Descrizione delle applicazioni della termoacustica per i vari ambiti: economicamente rilevanti: refrigerazione, generazione, separazione dei gas, liquefazione gas, bruciatori pulsanti, motori di razzi, motori di aereo, ecc.

Tominaga A. - Fundamental Thermoacoustics - (in giapponese) - Uchida Rokakuho Pub. Co. Ltd. Tokyo, July 1998 – E' il primo testo sulla termoacustica - Il testo è stato citato da Steven Garrett – In realtà il testo è il manuale d'uso del programma di calcolo utilizzato da Tominaga per le attività di ricerca nel 1995.

Swift, Gregor W. – Thermoacoustic Engines and Refrigerators - McGraw-Hill Encyclopedia of Aplied Physics, Vol. 21, 245-264 (1997) – Descrizione della teoria dei dispositivi termoacustici con solo setti – Sintesi dell'articolo di Swift (1988).

10.6 Database riferimenti di letteratura, brevetti

Acoustics Research Letters Online (ARLO) - http://scitation.aip.org/ARLO/ - Acoustics Research Letters Online (ARLO) è una rivista elettronica del The Acoustical Society of America (ASA) dedicata a tutti i fcampi dell'acustica. ARLO è un giornale con pubblicazione veloce in cui si accettano contenuti multimediali multimedia – Si consiglia agli addetti ai lavori per aggiornamenti o per pubblicare.

http://www.osti.gov/ - Energy Citations Database (1948 – Present) predisposto dall'Office Scientific Techincal Information (OSTI) del Departement of Energy americano (DOE) tramite il quale recuperare records di letteratura (report, conferenze, pubblicazioni su riviste, libri, tesi di laurea, brevetti del settore energetico) nelle seguenti discipline di interesse del DOE: chimica, fisica, materiali, scienze ambientali, geologia, ingengenria, matematica, climatologia, oceanografia, informatica – Nel caso di documenti non disponibili in rete è possibile acquistare i documenti cartaceo tramite il National Technical Information Service (NTIS). Gli ordini vengono fatti tramite il link http://www.ntis.gov/support/ordering.htm.

STARbase system of searchable thermoacoustics resources maintained by CFIC Motors/Alternators- -Pressure Wave Generators- -Cryocoolers- -TA Refrigerators- -TA Engines- -Compressor--

Interessante sito con database STARbase[tm] di contatti degli addetti ai lavori sulla Termoacustica, organizzazioni di ricerca, aziende fornitori di materiali e parti, utilizzatori compresi.

http://citeseer.ist.psu.edu - Sito da utilizzare per le ricerche bibliografiche di documenti digitali da scaricare in vari formati PDF, PS

http://www.stormingmedia.us/keywords/thermoacoustics.html - Elenco di rapporti nel periodo 1996 ad oggi, riguardanti la termoacustica – E' un "must" per chi opera nel settore.

http://www.delphion.com/simple - Pagina della Thomas Delphion per il recupero della documentazione sui brevetti (a pagamento).

10.7 Fornitori di materiali e servizi

Corning Glass - Setti in ceramica potenzialmente utilizzabile come setti nei dispositivi termoacustici (tratto da HumCool MIT).

Rauschert Technical Ceramics - Setti in ceramica simili a quelli della Corning (tratto da HumCool MIT)

Applied Ceramics, Inc. - Setti in ceramica simili a quelli della Corning e Raushert (tratto da HumCool MIT)

Alpha Materials - Setti in ceramica simili a quelli della Corning, Raishertus e Applied Ceramics (tratto da HumCool MIT)

Macrosonix - VA USA – Società di ingegneria R&D, disponibile per project management in ambito acustico – Dispone di attrezzature, strumentazione, know how per lo sviluppo prodotti chiavi in mano: sistemi e dispositivi acustici, sistemi dinamici elettromeccanici e motori lineari, firmware, controllo delle vibrazioni e rumore – Produce dispositivi per motori termoacustici tratto da http://www.noiseboard.com).

CFIC - NY USA – Sito del consorzio Clever Fellows Innovation Consortium, Inc./Resonant Power Group – L'organizzazione produce generatori di onde pulsanti per dispositivi termoacustici (tratto da http://www.noiseboard.com)

10.8 Aziende produttrici di dispositivi termoacustici

Aster Thermoakoestiche Systemen (NL) – Azienda olandese che produce sistemi per il riscaldamento e condizionamento residenziale – Interessante l'uso combinato di motori che pompe di calore termoacustiche fino a 250°C – Nel caso di utilizzo di cascami di calore i sistemi della azienda olandese possono recuperare il 25% ad un livello termico di 250°C – Nel caso di solare con tubi evacuati il sistema produce energia termica per produrre freddo per il condizionamento ambientale – Le potenze sono da qualche centinaio di Watts per refrigerare un locale fino a 10 kW per il condizionamento dell'aria- Non si forniscono dati prestazionali di dettaglio e/o costi – (contatti: Mr. De Blonk info@aster-thermoacoustics.com)

http://www.coolsound.us/ - Cool Sound Industries Inc. si propone di realizzare refrigeratori e condizionatori termoacustici per i quali ha una accordo esclusivo con il governo USA e l'Università di California (5 brevetti provenienti dal LANL, NPS e Nasa) per i seguenti paesi: USA, Canada, Messico, Inghilterra, Italia, Giappone, Olanda – Nel sito è disponibile il business plan per realizzare il laboratorio e le linee produttive. Può essere interessante per chi vuole realizzare qualcosa di simile in Italia o Europa o per chi vuole associarsi – La società appena costituita sta cercando investitori, sta costituendo il proprio management. Da quanto sembra (sito aggiornato ad agosto 2004), i condizionatori che CSI Inc. intende realizzare hanno potenze nominali di 10,5 kW (3 ton) – Al momento non ci sono ancora prototipi realizzati – Il costo di vendita per queste unità è stato stimato in ~285 US $/kW – Assolutamente consigliato a chi ha business nelle refrigerazione e condizionamento dell'aria – Consigliato ai giovani ingegneri che voglio imbarcarsi in una avventura bellissima – Consigliato agli investitori che credono nell'innovazione tecnologica e sono sensibili ai problemi ambientali.

Fellows Research Group, Inc. – Home page della Fellows n cui si dà notizia di un prototipo TAR (Thermo Acoustic Resonator) realizzato all'inizio del 2004 – Si fornisce una sezione del motore (l'impressione è che il disegno si riferisca ad un prototipo precedente) – La pressione di lavoro è di 10 atmosfere, temperatura Th di 600°C e Tc di 60°C (si veda la fig. 5). Con un DT di 540K l'efficienza prevista è di 39% - Il gas è Argon, la sua densità statica è di 16 kg/m³ mentre alla massima pressione (fronte d'onda) è di 37 kg/m³ con una velocità del suono di 550 m/s. L'escursione dell'armatura è di 10 mm a 1000 Hz. La potenza disponibile sull'armatura di 45 cm² è di 10,5 kW – Interessanti i dati sperimentali ottenuti al NREL – Ci sono molte foto e disegni – E' disponibile un White Paper sul TAR che fa capire le prestazioni ottenibili e fornisce dati operativi – L'azienda costituita da poco è in fase di sviluppo - Da leggere, in ogni caso, con molta attenzione.

Praxair - USA - Praxair produce gas industriali – Nel 2002 ha ricevuto fondi do 2 M$ da Dep. Of Energy per costruire il più grande motore termoacustico con il supporto del LANL (Los Alamos National Laboratori) (tratto da http://www.noiseboard.com).

Cryenco / Chart Industries – Sito della Cryenco (Cryogenic Energy Company) nata nel 1958. Cryenco è focalizzata sullo sviluppo della tecnologia criogenica per enti governativi, produttori di contenitori dewars, sistemi di manipolazione e spedizione per applicazioni criogeniche. Cryenco è stata acquistata nel 1997 dalla Chart industries Inc. e dal 2000 ha cambiato nome in Chart Denver (tratto da http://www.noiseboard.com)
Si veda anche il link http://www.netl.doe.gov/publications/press/1999/tl_cryenco.html in cui si hanno inforamzioni sui progetti finanziati dal DOE con il supporto del LANL (impianto pilota per liquefare gas naturale costo investimento $350,000 (DOE) + $200,000 (Cryenco).

QDrive Resonant Power Systems - Troy NY - Qdrive è una estensione della Clever Fellows Innovation Consortium (CFIC), Inc in Troy, NY. Qdrive produce refrigeratori criogenici e generatori di onde di pressione (tratto da http://www.noiseboard.com).

http://www.thermoacousticscorp.com - Il sito della ThermoAcustics Co. è in fase di realizzazione – La società è stata costituita dalla PSU per il trasferimento del know-how e per fornire supporto alle aziende produttrici di dispositivi termoacustici – La prima uscita della ThermoacousticsCo.com (estensione della PSU) è avvenuta alla Conferenza di Bruxelles, del giugno 2004, Refrigerants Naturally organizzata da Unep e GreenPeace (http://www.refrigerantsnaturally.com/pps/PSU%20Thermoacoustics.pps - Il materiale disponibile nel sito è molto interessante per ampiezza, concretezza – Consigliato a tutti quelli che si interessano di refrigerazione e condizionamento dell'aria – Gli aggiornamenti dei sito sono da tenere sotto il microscopio.

10.9 Software per l'analisi dei fenomeni termoacustici

DSTAR Homepage - DSTAR è un software in ambiente Windows per creare modelli e simulazioni di motori termo-acustici. DSTAR impiega la teoria di Nicolas Rott (sistema di equazioni differenziali) e include anche aggiornamenti introdotti da Greg Swift (tratto da http://www.noiseboard.com)

Educational Demonstrations in Thermoacoustics – Da questo link è possibile scaricare del SW in Ms-Dos scritto in QB realizzato da Greg Swift (swift@lanl.gov). Benchè l'interfaccia non sia Windows le animazioni sono molto accattanti, direi strepitose, per capire in dettaglio cosa succede all'interno di un refrigeratore o motore termoacustico in varie ipotesi di funzionamento. Il SW è scaricabile in forma zippata. Nello stesso sito è possibile scaricare anche l'animazione TasheOptr riguardante il liquefattore di gas naturale sviluppato alla Praxair in Denver. Inoltre è possibile scaricare l'animazione relativa alla separazione di gas MixSep. Un grazie doveroso al dr. Greg Swift per la qualità, ricchezza di informazioni messe a disposizione - Consigliabile a chi vuole addentrarsi nella termoacustica oppure per scopi educativi, formativi.

http://www.lanl.gov/thermoacoustics/DeltaE.html - Software realizzato da realizzato da Greg Swift e Bill Ward completo di manuale d'uso del Software Delta-E – Si forniscono gli estremi per ottenere il SW – Si ricorda, fra l'altro, che Delta-E è in dotazione al libro di Swift citato in precedenza) – Tale SW è parecchio usato e citato tra gli addetti ai lavori ed è sicuramente consigliabile a chi vuole lavorare sull'argomento (si veda anche il consiglio dato da Swift tra i libri consigliati).

10.10 Organizzazioni di ricerca pubblica e privata sulla Termoacustica

Attualmente ci sono piccoli gruppi di ricerca applicata oltre agli USA anche in Giappone, Olanda, Francia, Svizzera e Italia. L'elenco dei link riportati è non esaustivo ma, in ogni caso, ha una estensione parecchio più ampia dell'elenco del sito http://www.noiseboard.com che si consiglia per tenersi aggiornati.

LANL & partners - Applicazione dei motori termoacustici Stirling - Sito del Los Alamos National Laboratory da cui partire per approfondire i motori termoacustici Stirling. Si forniscono informazioni sui motori usati nella liquefazione di gas naturale, e altri gas industriali, cogenerazione per usi residenziali – Interessante rilevare chi sono gli sponsor delle ricerche applicate.

Eindhoven University of Technology - Eindhoven, The Netherlands – Sito del gruppo di ricerca della Fisica delle Basse temperature che ha in corso indagini su refrigeratori termoacustici, refrigeratori a tubi pulsanti e refrigeratori con vortex (tratto da http://www.noiseboard.com)

John Hopkins University – In questa Università Cila Herman conduce un team di ricerca che cura la progettazione e l'ottimizzazione di refrigeratori termoacustici. Le ricerche scolte hanno dimostrato che le circa venti variabili che influenzano le prestazioni dei dispositivi termoacustici possono essere ridotte a sei – Nel sito si afferma che sono previste a breve ricadute industriali. Il team di ricerca mi sembra abbia le idee molto chiare sui passi da fare.

LANL - Los Alamos National Laboratory - Thermoacoustics – Home page del LANL da cui iniziare a raccogliere informazioni sulle ricerche e sviluppo di motori e refrigeratori termoacustici. Nel sito si sono i link per scaricare liberamente del software (in ambiente Dos) da impiegare nella progettazione dei sistemi termoacustici – E' il sito con maggiori informazioni sulla termoacustica – E' un must per chi vuole aggiornarsi.

NASA - Ames Research Center – Peter Kittel descrive come è nato il refrigeratore a tubo pulsante da parte di W. Gifford e di R. Longsworth alla Syracuse University 1963 e di come sia stato riscoperto con le attività di Wheatley (LALN) – Il sito è interessante per capire i collegamenti storici tra tubi pulsanti e termoacustica.

NASA Space Shuttle Flight STS-42 – Sito in cui forniscono dati sul progetto spaziale STAR in cui sono coinvolti Garrett, Hofler a Adeff – Il sito è molto "ermetico"; la "censura" militare è molto evidente– Consigliabile per chi opera nel settore spaziale e aeronautico.

PSU - Penn State University – E' una università che può essere considerata centro di eccellenza in Termoacustica dal 1995 – Ha tra i programmi di studio un corso di laurea in Acustica e uno stretto rapporto con le facoltà di Fisica e Ingegneria aeronautica – Fornisce supporto alle aziende – Ha in corso un progetto di sviluppo di refrigeratore termoacustico per la Ben & Jerry (frigorifero commerciale per gelati) visibile in fig. 1, 13, 14, 15. Ricerca di base, sperimentazione, simulazioni numeriche dei sistemi termoacustici. Le ricerche sono condotte con metodi di "cross-fertilization" e con processi paralleli per capire in profondità i fenomeni sotto studio. E' il sito che consiglio ad un ricercatore che vuole approfondire in modo multidisciplinare la Termoacustica. Sono in corso dei negoziati per la cessione delle licenze d'uso refrigeratori termoacustici commerciali. Interessante sapere che il PSU ha costituito la www.ThermoAcousticsCorp.com (si veda sopra) per il trasferimento tecnologico verso le aziende.

Physics Dept. - University of Mississippi Il programma di ricerche della Facoltà di Astronomia e Fisica in campo acustico è uno dei più ampi degli USA. La facoltà è sede anche del Jamie Whitten National Center for Physical Acoustics (NCPA). Le ricerche riguardano: Applicazioni agricole del suono - bioacustica animale, aeroacoustica, psicologia acustica, elaborazione segnali e ingegneria. Aeroacustica: - studio del suono aerodinamico commerciale e ipersonico - Deflusso ad alte velocità in presenza di reazioni aero-termo-chimiche - Acustica ambientale: propagazione del suono e infrasuoni in varie condizioni atmosferiche, oceaniche, geologiche. - Acustica non lineare: Suono nei fluidi, solidi, cavitazione. - Acustica nei mezzi porosi: Suono in materiali granulari, suoli, decontaminazione mine antiuomo. - Termoacustica: Realizzazione di frigoriferi e condizionatori termoacustici. Studio dei fenomeni non lineari nei motori e refrigeratori termoacustici. Si forniscono i contatti dei ricercatori che operano nei vari gruppi di ricerca e progetti.

Purdue University – Punto di accesso alle ricerche in corso presso una dei principali centri di ricerca sulla refrigerazione e tecnologie collegate (i titoli in inglese sono iperlinks): Hydrocarbon/Flame Suppressant Mixtures as Alternative Refrigerants - Thermoacoustic Heat Pumping Systems - Secondary-Loop Refrigeration Systems - Transcritical Carbon Dioxide Refrigeration Cycles - Intelligent Control of Ice Storage Systems - On-Line Methods for Controlling Building Thermal Storage - Automated Fault Detection and Diagnostics for HVAC&R Equipment - Modeling the Performance of Pulse Combustion Furnaces - Lubricating Oil Circulation in Vapor-Compressions Systems - Heat Exchange Enhancements for Residential Furnaces - Modeling of Heat Pumps Under Extreme Operating Conditions - Analysis and Simulation of Gas Pulsations in a Rolling Piston Compressor - Analysis of Compressor Manifolds and Mufflers - Modeling of Scroll Compressors - Faculty Publications and Activities

NPS - Navy Postgraduate School – Sito governativo USA presso cui si stanno effettuando parecchi progetti condotti da Thomas J. Hofler and Jay Adeff: Refrigeratore termoacustico chiamato "Beercooler"; progetti di refrigeratori termoacustici per l'elettronica dei radar dei mezzi naval. Hofler e Adeff stanno sviluppando il SW DSTAR Thermoacoustic Engine per le simulazione dei dispositivi termoacustici – Il progetto Solar Powered Thermoacoustic Refrigerator utilizza un refrigeratore direttamente sul fuoco di un concentratore solare a parabola – Altri progetti: Cryo-Cooler, Electrodymamically Driven Demo-Refrigerator, Prime-Movers, Space Thermoacoustic Refrigerator (STAR) – Si fornisce un elenco di riferimenti selezionati (sono stati inclusi più avanti) con un commento.

Università di Messina – E' disponibile una scheda informativa relativa alla ricerca in corso presso il dipartimento di Fisica seguente: Studio teorico-sperimentale per la messa a punto di un prototipo di refrigeratore termo-acustico a basso impatto ambientale – Scopo della ricerca è di utilizzare le informazioni ottenute tramite la test facility attualmente in funzione presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Messina, nella quale è stato studiato l'effetto termoacustico in aria a bassa pressione, per progettare e realizzare un primo prototipo di frigorifero acustico costituito dai quattro componenti fondamentali: stack, scambiatore di calore, risuonatore e driver - Il responsabile della ricerca è Giuseppe Cannistraro

Pubblicazioni:

Giuseppe Cannistraro, Carlo Giaconia, A. Piccolo - "La refrigerazione termoacustica: analisi teorico-sperimentale delle prestazioni di una thermoacoustic couple (TAC)" – il Freddo, pp.618-624, N° 6 , 2000

Giuseppe Cannistraro, Carlo Giaconia, A. Piccolo – "Descrizione di un prototipo di frigorifero termoacustico ad aria a bassa pressione" - Atti del 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 14-17 Settembre 1999

Giuseppe Cannistraro, Carlo Giaconia, A. Piccolo - "Note sulla refrigerazione termoacustica" - Atti della Giornata di studio in memoria di Guglielmo Franzitta, Palermo, 28 Ottobre 1998.

Università di Palermo - Carlo Giaconia è responsabile del progetto Frigoriferi Termoacustici - La ricerca è rivolta allo studio sperimentale del fenomeno termoacustico in vista del progetto e della costruzione di un prototipo di refrigeratore senza parti in movimento ed a basso impatto ambientale. Dal punto di vista teorico è in corso un approfondimento la termodinamiche e fluidodinamica che sono alla base del fenomeno termoacustico utilizzando dati sperimentali ottenuti da un primo prototipo funzionante ad aria a bassa pressione - E in corso la costruzione di un nuovo prototipo, funzionante con diversi

gas (elio, argo, azoto) in pressione – Il progetto è portato avanti in collaborazione dell'Università di Messina – Le pubblicazioni sono elencate nel link dell'università di Messina.

University of Mississippi – Presso questa università sono in corso ricerche su tre temi: (a) Termoacustica con superfici bagnate ("Wet Walled" Thermoacoustics) – La ricerca mira a quantificare gli effetti dell'evaporazione e condensazione sulle superfici del setto soggette a cicli termoacustici - (b) Caratterizzazione e proprietà del setto termoacustico – (c) Sviluppo di sistemi solari con motori termoacustici per applicazioni spaziali – Si consiglia a chi è interessato all'applicazione e sviluppo dei dispositivi termoacustici.

University of Purdue Thermoacoustics Group - IN USA – Il gruppo di ricerca *Braun, Chiu, Mongeau d*ella Purdue University, nato nel 1997, ha costruito il primo refrigeratore nel 2000. Attualmente svolge studi di ottimizzazione e modellazione numerica su Soda-Can Vending Machines con sponsor Tecumseh Product Co. C'è un progetto anche che studia refrigeratori termoacustici con condizioni al contorno ottimizzate. Ci sono i link per scaricare articoli sulle ricerche svolte dal 1996 ad oggi – Chi conosce il ruolo della Tecumseh nel mondo della refrigerazione forse dovrebbe fare una riflessione.

University of Texas – Sono in corso due progetti: il primo riguarda il controllo delle emissioni di combustione tramite campi acustici, il secondo è relativo all'utilizzo del cascami di calore tramite la termoacustica – Consigliato ai costruttori di bruciatori e caldaie e alle ESCO.

University of Tsukuba – Institute of Physics – Akira Tominaga autore del primo testo sulla Termoacustica ha in corso attività su: Termodinamica e teoria termoacustica – Analisi delle perdite nel rigeneratore e nel risonatore acustico – Limite termodinamici di efficienza nelle celle solari – Oscillazioni termoacustiche autoindotte – Il sito è molto scarno e non ci sono informazioni di dettaglio.

Technical University Eindhoven (NL) – Il team di ricerca guidato da Jos Zeegers ha in corso progetti sulla termoacustica -

10.11 Riferimenti avanzati per approfondimenti, attività di ricerca e sviluppo

Adeff Jay A., Thomas, J. Hofler, Anthony A. Atchley, William C. Moss Lawrence - Measurements with reticulated vitreous carbon stacks in thermoacoustic prime movers and refrigerators - Livermore Natl. Lab. - Hawaii, Dec. 1996.

Adeff, Jay A. and Thomas J. Hofler - Performance improvements for the solar powered, thermoacoustically driven, thermoacoustic refrigerator - Newport Beach, December 2000

Adeff, Jay A. and Thomas J. Hofler 1. - Design and construction of a solar thermal powered thermo-acoustically driven thermoacoustic refrigerator - Atlanta, May 2000

Backhaus, S., Swift, G., "A thermoacoustic Stirling heat engine", Nature, vol. 399, May 27, 1999, www.nature.com, pp. 335-338.

Backhaus, S., Swift, G., "A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study", J. Acoust. Soc. Am. 107(6), Jun. 2000, pp. 3148-3166.

Backhaus, S., Swift, G., "Fabrication and Use of Parallel Plate Regenerators in Thermoacoustic Engines", Proceedings of IECEC'01, 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Jul. 29--Aug. 2, 2001, Savannah, GA, pp. 1-5.

Backhaus, S., Swift, G., "New Varieties of Thermoacoustic Engines", Condensed Matter and Thermal Physics Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, Jul. 2002, pp. 1-8.

Ceperley P. H.. Gain and efficiency of short traveling wave heat engine. J. Acoust. Soc. Am., 77:1239—1244, 1985.

Ceperley, P. H., "A pistonless Stirling engine--The traveling wave heat engine", J.Acoust.Soc. Am, 66(55), Nov. 1979, pp. 1508-1513.

de Blok C. M. Thermoacoustic system, 1998. Dutch Patent: International Application Number PCT/NL98/00515. US Patent 6,314,740, November 13, 2001.

Feldman K. T – A Study of Heat Generated Pressare Oscillations in a Closet End Pipe – Ph.D Dissertation – Univ. Of Mo. (1966)

Feldman K. T., R.L. Carter - A Study of Heat Driver Pressare Oscillations in a Gas – Trans. ASME C J. Heat Trans. 92, 536-541 (1970)

Feldman K. T. Review of the literature on Rijke thermoacoustic phenomena. J. Sound Vib., 7:83—89, 1968.

Feldman K. T. Review of the literature on Sondhauss thermoacoustic phenomena. J. Sound Vib., 7:71—82, 1968.

Gardner, D., Swift, G., "Use of inertance in orifice pulse tube refrigerators", Cryogenics 37 (1997), 1997 Elsevier Science Limited, pp. 117-121.

Gardner D. L. and G. W. Swift - "A cascade thermoacoustic engine," - Journal of the Acoustical Society of America 114, 1905-1919 (2003).

Steven Garrett - Thermoacoustic Engines and Refrigerators- American Journal of Physics - January, 2004 -Vol. 72, No. 1, pp. 11-17. – L'artciolo è una guida commentata ai risultati ottenuti nella Termoacustica – Interessante evidenziare la nascita di nuovi numeri dimensionali: numero di Lautrec (rapporto tra raggio idraulico e penetrazione termica) N_L, numero di Womersley (rapporto tra aggio idraulico e penetrazione viscosa), numero di Valensi (usato per caratterizzare i motori Stirling è il rapporto tra raggio idraulico e penetrazione viscosa) – Interessante sapere che quando $N_L \geq 1$ si ha un setto (stack in inglese), se $N_L < 1$ si ha un rigeneratore – Si veda anche Olson (1994).

Garrett, S., "Reinventing the engine", Nature, vol. 399, May 27, 1999, www.nature.com, pp. 303-305.

Garrett, S., Adeff, J., Hofler, T., "Thermoacoustic Refrigerator for Space Applications", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 7, No. 4, Oct.-Dec. 1993, pp. 595-599.

Garrett, S., Perkins, D., Gopinath, A., "ThermoAcoustic Refrigerator Heat Exchangers: Design, Analysis and Fabrication", Physics Dept.--Code PH/Gx, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, pp. 375-379.

Garrett, Steven, "ThermoAcoustic Life Sciences Refrigerator", Oct. 30, 1991, pp. 4-43.

Gedeon, David, "DC Gas Flows in Stirling and Pulse Tube Cryocoolers", Cryocoolers 9, Edited by R.G. Ross, Jr., Plenum Press, NY, 1997, pp. 385-392.

Geller D. A. and G. W. Swift. Thermoacoustic enrichment of the isotopes of neon. J. Acoust. Soc. Am., 115:2059—2070, 2004.

Gifford W. E. and R. C. Longsworth. Pulse tube refrigeration progress. Adv. Cryogenic Eng., 10B:69—79, 1965.

Hofler T. J. Thermoacoustic refrigerator design and performance. PhD thesis, Physics department, University of California, San Diego, 1986.

Hofler T. J., C. Wheatley, G. W. Swift, and A. Migliori. Acoustic cooling engine, 1988. US Patent No. 4,722,201.

Hofler Thomas J. and Jay A. Adeff - Development of a miniature thermoacoustic refrigerator -Newport Beach, December 2000

Hofler Thomas J. and Lt. Mark S. Reed - Measurements with wire mesh stacks in thermoacoustic prime movers - Indianapolis, April 1996

Hofler, Thomas J., Jay A. Adeff, and Anthony A. Atchle - Experimental results with a themoacoustically driven thermoacoustic refrigerator - Penn State, June 1997

Hofler, Thomas J., Jay A. Adeff, Lt. Tom Heatter USN, Anthony A. Atchley - An experimental thermoacoustically driven thermoacoustic refrigerator - Hawaii, Dec. 1996

Keesom W. H., - Helium - Elsevier, New York, 1942, p. 174 (oscillazione Taconis).

Lord Rayleigh. The explanation of certain acoustical phenomena. Nature, 18:319—321, 1878.

Mikulin E. L., A. A. Tarasov, and M. P. Shkrebyonock. Low-temperature expansion pulse tubes. Adv. Cryogenic Eng., 29:629—637, 1984.

Olson J. R. and G. W. Swift, "Similitude in thermoacoustics," J. Acoust. Soc. Am. 95, 1405 (1994).

Olson J. R. and G. W. Swift. Acoustic streaming in pulse tube refrigerators: Tapered pulse tubes. Cryogenics, 37:769—776, 1997.

Organ A. J. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine. Cambridge University Press, 1992.

Poese M.E., R.W.M Smith, S. L. Garrett, R. vanGerwen, P. Gosselin – Thermoacoustic Refrigeration for Ice Cram Sales, Conference fo Glasgow (UK), Aug. 2004.

Radebaugh R. A review of pulse tube refrigeration. Adv. Cryogenic Eng., 35:1191—1205, 1990.5

Rott N.. The influence of heat conduction on acoustic streaming. Z. Angew. Math. Phys., 25:417—421, 1974.

Rott, N. Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes. Z. Angew. Math. Phys., 20:230—243, 1969.

Rott, N. Thermally driven acoustic oscillations, part III: Second-order heat flux. Z. Angew. Math. Phys., 26:43—49, 1975.

Rott, N. Thermoacoustics. Adv. Appl. Mech., 20:135—175, 1980.

Spoor P. S. and G. W. Swift. Thermoacoustic separation of a He—Ar mixture. Phys. Rev. Lett., 85:1646—1649, 2000.

Swift G. - What is thermoacoustics? A brief description, with technical details and citations - April 28, 2004 - LA-UR 04-2298 http://www.lanl.gov/thermoacoustics/ehistory.pdf - Storia della Termoacustica redatta da Greg Swift aggiornata all'aprile del 2004.

Swift G. W.. Thermoacoustics: A Unifying Perspective for some Engines and Refrigerators. Acoustical Society of America Publications, Sewickley PA, 2002.

Swift, G., "Analysis and performance of a large thermoacoustic engine",J. Acoust. Soc. Am 92(3), Sep. 1992, pp. 1551-1563.

Swift, G., "Thermoacoustic Engines and Refrigerators", Physics Today, Jul. 1995, pp. 22-28.

Swift, G., "Thermoacoustic engines", Journal of Accoustical Society of America 84(4), Jul. 1988, pp. 1145-1180.

Swift, G., Gardner, D., Backhaus, S., "Acoustic recovery of lost power in pulse tube refrigerators", J. Acoust. Soc. Am. 105(2), Pt. 1, Feb. 1999, pp. 711-724.

Swift, G., Migliori, A., Wheatley, J., "Liquid Metal Thermoacoustic Engine", Condensed Matter and Thermal Physics Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.

Swift, G.W., Ward, W.C., "Simple Harmonic Analysis of Regenerators", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 10, No. 4, Oct.-Dec. 1996, pp. 652-662.

Urieli I. and D. M. Berchowitz. Stirling Cycle Engine Analysis. Adam Hilger, Bristol UK, 1984.

Wakeland R., Garrett, S., "Lessons From a Thermoacoustic Refrigeration Demonstration Device", The Pennsylvania State University Applied Research Laboratory, Technical Report No.: TR 98-005, Dec. 1998, pp. 1-117.

Wakeland, Ray Scott, "Use of electrodynamic drivers in thermoacoustic refrigerators", J. Acoust.Soc.Am. 107(2), Feb. 2000, pp. 827-832.

Walker G. - Stirling Engines. Clarendon, Oxford, 1960.

Wheatley J. C. and A. Cox. Natural engines. Physics Today, 38:50—57, August 1985.

Yazaki T., A. Iwata, T. Maekawa, and A. Tominaga. Traveling wave thermoacoustic engine in a looped tube. Phys. Rev. Lett., 81:3128—3131, 1998.

Yazaki T., A. Tominaga, and Y. Narahara. Experiments on thermally driven acoustic oscillations of gaseous helium. J. Low Temp. Phys., 41:45—60, 1980.

Zinn B. - Pulsating combustion. In F. J. Weinberg, editor, Advanced Combustion Methods, pages 113—181. Academic, London, 1986.

Zinn, B. T and N.T. Weiland - Open Cycle Traveling Wave Thermoacoustics: Energy Fluxes and Thermodyanmics - Journal of the Acoustical Society of America, 114 (5), Nov. 2003

10.12 Conferenze, seminari, congressi sulla termoacustica

La comunità dei Termoacustici alla conferenza di Hertognebosch (NL) nel 2001

Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2003). February, 2003. Albuquerque, New Mexico. AIP Conference Proceedings 2003

Ninth International Congress on Sound and Vibration, Orlando FL, July 8-11 2002

Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2002). February, 2002. Albuquerque, New Mexico. AIP Conference Proceedings 2002

17th International Congress on Acoustics, Rome, 2-7 September 2001; Volume 1, Part A, Session "Thermoacoustics,"

36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Savannah GA, 29 July-2 August 2001

31st AIAA Fluid Dynamics Conference, Anaheim CA, 11-14 June 2001

First International Workshop on Thermoacoustics. Hertogenbosch -The Netherlands April 23-25, 2001

15th International Symposium on Nonlinear Acoustics, edited by W. Lauterborn and T. Kurz, 105-114 (American Institute of Physics, Melville NY, 2000)

Nonlinear Acoustics At The Turn Of The Millennium: Isna 15, 15th International Symposiumm Gottingen (Germany), 1-4 Sep 1999

10.13 Principali ricercatori ed esperti in termoacustica

L'elenco è molto praziale. Si prevede a breve di creare un link sulla Home page di ogni ricercatore contemporaneo attivo.
Adeff, Jay A. – Fisico - Lavora presso NPS
Backhaus, Scott – PhD in fisica all'Unversità della Califormia, 1997 – Attualmente lavora nel team guidato da Greg Swift al LANL - Sembra destinato ad avere un ruolo sempre maggiore nel team LANL per ampiezza delle ricerche e risultati, brevetti ottenuti.
Braun, James - Professore della Purdue University, guida il team di ricerca sulla termoacustica – Esperto di sistemi termici e modellistica dei sistemi di refrigerazione e condizionamento dell'aria.
Ceperley, Peter H. – Ph.D. in Fisica, Stanford University – E' professore associato ai dipartimenti di Electrical and Computer Engineering e Fisica alla George Manson University dal 1977 – Svolge attività di ricerca in elettromagnetismo e dinamica delle onde – Il suo lavoro da pioniere tra il 1977-1990 nella termoacustica nei motori termici ha aperto nuove prospettive ai motori e refrigeratori termoacustici (pceperle@gmu.edu - http://ite.gmu.edu/~omega/)
Garrett, Steven – Ph.D. in fisica all'Universita della California – Ha lavorato presso il LANL e NPS - Attualmente professore dei corsi di Acustica e ricercatore senior presso il Laboratorio di Ricerca Applicata della Pennsylvania State University – Guida il team della PSU sulla Termoacustica con risultati notevolissimi, vanta brevetti e articoli presi come riferimento dai ricercatori del settore.
Keolian, Robert M. – Professore di Acustica alla PSU – Ha lavorato anche con il team guidato da Swift.
Hermann, Cila - dr. ing. Università di Hannover, 1992 – Esperta nel miglioramento della trasmissione di calore e di massa – Attualmente professore di Ingegneria Meccanica alla The Johns Hopkins University - guida un team di ricerca presso la stessa università che si occupa anche di refrigerazione termoacustica (herman@titan.me.jhu.edu)
Hofler Thomas J. – Fisico – Lavora al PNS

Rott, Nicholas – http://www.stanford.edu/dept/news/relaged/930309Arc3372.html - Fisico, in pensione dal 1983, Professore di fluidodinamica presso Swiss Federal Institute of Technology in Zurigo, ha lavorato a Stanford Dep. Aeronautics&Astronautics. Professore alla Cornell University nel 1950. Rott e suoi colleghi a Zurigo svilupparono i fondamenti teorici della termoacustica. E' conosciuto anche per aver sviluppato i sistemi di ventilazione nelle capsule spaziali.
Spoor P. S. – Praxair
Swift Gregor – PhD in Fisica – Attualmente guida il team del LANL – E' da tutti considerato il punto di riferimento per la Termoacustica, sia per l'unico testo completo sul settore, per ampiezza e multidisciplinarietà dei suoi lavori, brevetti e risultati ottenuti.
Tominaga A. – Fisico giapponese – Insegna e svolge ricerca sulla Termoacustica e sue applicazioni presso l'Università di Tsukuba
Wheatley C. – Fisico – Scomparso – Da molti ritenuto meritevole di un Nobel per il contributo dato alla termoacustica.
Yazaki, T.A. – Fisico giapponese - Insegna e svolge ricerca sulla Termoacustica e sue applicazioni presso l'Università di Tsukuba
Zinn, Ben – Egli guida un gruppo di ricerca che usa la termoacustica nei processi di combustione per migliorare il mescolamento e la trasmissione del calore negli impianti di incenerimento per accelerare il processo e ridurre il volume delle ceneri – Ha in corso progetti per migliorare le prestazioni di turbine a gas, motori di razzo, elicotteri.

10.14 Ringraziamenti

I più doverosi e sentiti ringraziamenti ai teams di ricercatori guidati da Greg Swift (LANL), e Steven Garrett (PSU), che mi hanno concesso l'autorizzazione a citarli e ad attingere dai copiosissimi risultati della loro recente attività.
Ringrazio Mia Smith, della redazione di American Scientist, per avermi concesso di utilizzare immagini e parti dell'articolo di Steven Garrett e Scott Backhaus "The Power of Sound", apparso in American Scientist nel novembre 2000. L'articolo è un notevolissimo esempio di divulgazione scientifica per i non addetti ai lavori.
Ringrazio Andrea Rampado, che come moderatore del forum Energie Alternative di Promiseland, mi ha fornito l'innesco per il mio approfondimento sulla Termoacustica e in particolare per avermi fatto conoscere la Fellows Research Group.