

Cristiano Vergani
Responsabile R & S
Deparia Engineering S.r.l.
Email: cristiano.vergani@deparia.com

La refrigerazione termoacustica

Le macchine refrigeranti termoacustiche escono dai laboratori di ricerca per diventare dispositivi commerciali a tutti gli effetti: le loro caratteristiche sono molto interessanti sotto il profilo della compatibilità ambientale, della flessibilità operativa e della semplicità costruttiva, anche se, per ora, la loro applicazione è limitata ad alcuni settori di nicchia.

In una ipotetica classifica delle invenzioni più rivoluzionarie del ventesimo secolo, le macchine termiche occuperebbero senz'altro dei posti molto elevati. In particolare, il ciclo frigorifero a compressore - condensatore - evaporatore, con le sue doti di semplicità ed efficienza, ha determinato una delle più grandi conquiste dell'umanità, il controllo del microclima per il benessere delle persone e per la conservazione dei beni deperibili. Purtroppo, il tempo ha evidenziato anche il fortissimo impatto ambientale negativo causato dai gas alogenati usati dai dispositivi che sfruttano questo principio: alla luce di questa consapevolezza, è stato dato nuovo impulso alla ricerca di strade alternative, riprendendo dei filoni scoperti molto tempo fa ed abbandonati perché ritenuti in quel momento non competitivi. Tra questi, sono da sottolineare tre effetti fisici di grande interesse, l'elettrotermico, il termomagnetico e il termoacustico. I dispositivi elettrotermici (Peltier) hanno attualmente trovato applicazione solo in dispositivi refrigeranti di piccolissima potenza, a causa di alcuni limiti intrinseci della giunzione a semiconduttore su cui si basa il loro funzionamento, mentre i refrigeratori magnetotermici, anche se molto promettenti, necessitano per ora di elettromagneti estremamente potenti basati su avvolgimenti superconduttori, un aspetto che ne limita fortemente l'applicazione pratica. La refrigerazione termoacustica sembra invece in procinto di entrare in competizione con le

tecnologie consolidate. Ad esempio, una grande azienda statunitense produttrice di gelati ha recentemente installato refrigeratori termoacustici in tutti i suoi punti vendita, stabilendo un primo esempio di applicazione realmente alternativa ai frigoriferi tradizionali.

Le macchine termoacustiche possiedono delle caratteristiche molto interessanti, tali da configurare ampie possibilità di utilizzo in varie applicazioni industriali e civili, specialmente nel campo delle piccole potenze installate, ad esempio, una sola macchina, dotata di un convertitore termoacustico e di trasduttori elettroacustici, alimentata a gas o a energia solare, potrebbe essere in grado di provvedere ai fabbisogni di caldo, freddo ed elettricità di una normale abitazione, il tutto utilizzando componenti meccanici ed elettrici semplici, affidabili e poco costosi. L'impatto sull'ambiente dipenderebbe per la maggior parte dalla fonte energetica utilizzata per produrre calore, mentre il fluido vettore utilizzato nel ciclo termoacustico non presenta alcun rischio ecologico (aria o elio compressi).

Come funziona

L'interazione tra il calore e i fenomeni acustici è un problema che appassiona i ricercatori fin dal 1816, l'anno in cui Laplace apportò delle importanti variazioni al primo calcolo della velocità dell'aria effettuato da Newton. Newton considerò che i fenomeni di compressione ed espansione determinati da un'onda acustica all'interno di un gas avvenissero senza alcuna variazione di calore. Laplace si accorse invece che si potevano osservare dei piccolissimi cambiamenti di temperatura lungo il percorso di un suono in propagazione, ed in base a questa rilevazione ricalcolò la velocità del suono nell'aria, ad un valore che risultò del 18% superiore a quello stimato da Newton. La scoperta di questi effetti termici diede anche una spiegazione al fenomeno osservato da molti artigiani del vetro, cioè l'occasionale emissione di toni puri da parte di recipienti in vetro riscaldati in modo non uniforme. Questo fenomeno suggerì che la termoacustica nascondesse delle possibilità di applicazione pratica, ma dovette trascorrere più di altro secolo per arrivare a comprendere che era possibile sfruttare un'onda acustica per ricavare un differenziale di temperatura.

Alla base del funzionamento di una macchina termoacustica c'è comunque la proprietà dei gas di riscaldarsi quando compressi e di raffreddarsi espandendosi, solo che, invece di avere un compressore e una valvola di espansione, si sfruttano gli effetti di onde sonore di elevata intensità all'interno di una cavità risonante. Senza addentrarci più di tanto nei labirinti dell'acustica, limitiamoci a considerare che le onde sonore si propagano nell'atmosfera attraverso un fronte di compressione – espansione, che viaggia allontanandosi dalla fonte che lo ha generato, proprio come le onde provocate da un sasso in uno stagno; strati di molecole della miscela di gas aeriforme si spingono oscillando intorno alla loro posizione di riposo. Spingendosi in avanti, comprimono lo strato successivo, provocandone il riscaldamento; quando tornano indietro nel loro moto oscillante, provocano una depressione sullo strato adiacente, quindi una sua espansione ed un raffreddamento. Normalmente, non ci accorgiamo di questi effetti termici, perché si tratta di variazioni molto contenute (al limite della soglia del dolore, a 120 dB di pressione sonora, la massima variazione di temperatura rilevabile è pari a $0,02^{\circ}\text{C}$). Immaginiamo però di generare delle onde sonore, ad esempio per mezzo di un trasduttore elettroacustico (altoparlante), in uno spazio chiuso, la cui estensione sia risonante con la lunghezza d'onda del suono (ovvero in cui i fronti di compressione e di espansione dell'onda sonora diretta e dell'onda riflessa di ritorno dalla parete di fondo coincidano in fase, e quindi, si sommino in ampiezza). In queste condizioni, avremo la massima amplificazione possibile, quindi il massimo differenziale di pressione tra gli strati compressi e quelli espansi. Ora, immaginiamo di potere unire e convogliare separatamente tutte le zone "calde" e le zone "fredde" in due regioni distinte; avremo in questo modo realizzato una vera e propria pompa di calore termoacustica, in grado di trasformare il lavoro meccanico rappresentato dall'onda sonora in un differenziale di calore da sfruttare a piacimento per i nostri scopi. Questo compito, apparentemente di difficile soluzione, può essere svolto in realtà da un dispositivo di una semplicità quasi disarmante, chiamato rigeneratore. Quest'ultimo non è altro che un elemento, interposto sul percorso delle onde sonore, formato da una serie di canalicoli ricavati in un blocco di materiale

termoconduttore: in questo modo, le particelle di gas sono costrette ad oscillare in questi piccoli canali, scambiando calore con le pareti che le circondano, cedendolo mentre sono in fase di compressione ed assorbendolo mentre sono in espansione. Ma, così facendo, oscillando avanti e indietro, le particelle si trovano a "raccogliere" la differenza di calore indotta delle particelle adiacenti nell'oscillazione precedente, comportandosi come dei solerti portatori, che tendono ad accumulare la differenza di calore alle due estremità dei canalicoli: di conseguenza, le estremità del rigeneratore si trasformano in zone di accumulo del differenziale termico, che è possibile asportare con degli opportuni scambiatori di calore. Per di più, si tratta di una macchina termica reversibile: infatti, applicando un differenziale di calore alle estremità del rigeneratore, si provoca l'innescò dell'oscillazione delle particelle di gas contenute nei canalicoli e, di conseguenza, l'emissione di un'onda sonora da parte della cavità risonante in cui è contenuto. L'energia sonora può a sua volta essere raccolta e trasformata in energia elettrica dallo stesso trasduttore elettroacustico usato per generare il suono nel ciclo diretto (anche l'altoparlante è una macchina reversibile). Il differenziale di temperatura può essere creato in riferimento alla temperatura ambiente, il che vuol dire che è possibile, con una macchina termoacustica, ricavare freddo ed elettricità disponendo di una fonte di calore, oppure calore ed elettricità disponendo di un pozzo di calore, oltre che, naturalmente, caldo e freddo disponendo di elettricità o di una fonte di energia meccanica convertibile in suono.

Lo sviluppo delle macchine termoacustiche

In realtà, i primi tentativi di realizzare delle macchine termoacustiche non hanno fornito dei risultati confortanti: il rigeneratore permetteva sì di separare e raccogliere il differenziale di calore, ma introduceva nel circuito delle perdite dinamiche tali da portare a rendimenti troppo bassi nei confronti dei dispositivi frigoriferi tradizionali. Fino alla fine degli anni '90, il destino della termoacustica applicata è stato abbastanza incerto, ed il migliore rendimento raggiunto, anche se incoraggiante, non superava la metà di quello di un frigorifero domestico.

Tuttavia, i vantaggi promessi ed il rendimento teorico raggiungibile erano troppo allettanti per rinunciare, ed i ricercatori coinvolti sono stati abili a reperire ulteriori fondi dai settori industriali più interessati a sfruttare le peculiarità di questo sistema: l'industria petrolifera era molto interessata ad un sistema economico ed affidabile per convertire il gas naturale in gas liquefatto direttamente sul luogo di estrazione, utilizzando come fonte energetica lo stesso gas di giacimento; mentre la grande distribuzione alimentare, forse il primo cliente in assoluto della refrigerazione, era alla ricerca di un sistema alternativo dai forti contenuti "ecologici", da spendere anche nella comunicazione commerciale e, allo stesso tempo, utilizzabile anche nei grandi mercati nascenti delle nazioni in via di sviluppo, grazie alla semplicità costruttiva, alla manutenzione pressoché inesistente e al funzionamento slegato dal vincolo dell'energia elettrica. Questi interessi hanno dato una spinta risolutiva allo sviluppo di nuove soluzioni, che permettessero di superare i limiti dei primi tentativi. Meglio ancora, più che lo sviluppo di nuove soluzioni, è stata la riscoperta di idee già note a determinare una svolta decisiva e, in particolare, l'applicazione del "soffietto risonante", cioè di un dispositivo in grado di amplificare ulteriormente il suono (compensando così le perdite dinamiche all'interno del rigeneratore) e di indurre delle oscillazioni dell'intera massa di gas in cui si propaga l'onda sonora, in modo da aumentare considerevolmente l'escursione del percorso delle particelle nei canali. In questo modo, si è passati dall'utilizzo di un'onda stazionaria a quello di un'onda "viaggiante" intorno ad una posizione intermedia. Alcuni ricercatori sono arrivati a dei risultati equivalenti utilizzando un circuito acustico supplementare dotato di uno o più risonatori di Helmholtz. Così facendo, la massa di gas in oscillazione viene utilizzata come se fosse un "pistone" e la struttura della macchina termoacustica diventa sovrapponibile a quella di un motore Stirling: infatti, questi dispositivi prendono il nome di motori Stirling termoacustici. Il reverendo scozzese Stirling brevettò il suo motore nel 1816, lo stesso anno in cui Laplace calcolò correttamente la velocità del suono nell'aria. In questo tipo di motore, si ha una trasformazione di energia termica in energia meccanica sfruttando l'espansione di un gas all'interno di un cilindro tramite il calore di una fonte esterna, trasmesso attraverso uno scambiatore. Stirling

concepì anche l'idea del rigeneratore (un blocco solido attraversato da piccoli canali) usato come accumulatore di calore durante il ciclo termodinamico. Questo dispositivo rese il motore Stirling molto efficiente ma, alcuni aspetti svantaggiosi rispetto ai motori a vapore ad alta pressione e a combustione interna dell'epoca (principalmente la necessità di due scambiatori di calore) impedirono l'affermazione di questa tipologia di macchina termica. In tempi recenti, il motore Stirling è stato riscoperto perché molto adatto a convertire l'energia termica partendo da differenziali di temperatura non molto elevati, come il calore da irraggiamento solare o quello di origine geotermica. Ora, anche la termoacustica ha confermato l'utilità e la praticità di questo "storico" ritrovato, una conferma in più di quanto sia conveniente applicare in modo innovativo delle tecnologie considerate definitivamente acquisite e, magari, trascurate al momento della loro scoperta perché troppo in anticipo rispetto al progresso tecnico dell'epoca.

La disponibilità attuale

E' ancora prematuro parlare di un mercato generalizzato per le macchine termiche basate sui fenomeni termoacustici: i primi esemplari in commercio sono mirati per applicazioni molto settoriali e, per quanto riguarda le applicazioni su larga scala, non è ancora possibile competere con i costi delle tecnologie tradizionali. Per ora, gli unici esempi di applicazione sul campo riguardano i prodotti di due multinazionali che hanno sostenuto la ricerca di base: un interessante apparecchio per la produzione di azoto liquido della Praxair, concepito per i piccoli utilizzatori che non hanno lo spazio per installare serbatoi di stoccaggio oppure hanno un consumo troppo ridotto o occasionale per giustificare la gestione di un serbatoio (laboratori di ricerca, piccole lavorazioni artigiane, strutture sanitarie decentralizzate); nel settore della distribuzione alimentare, la catena di gelaterie Ben&Jerry, di proprietà del gruppo Unilever, ha provveduto a dotare i propri punti vendita di frigoriferi - espositori orizzontali dotati di un gruppo termoacustico molto compatto. Vi sono inoltre numerose applicazioni pilota per il raffreddamento di dispositivi elettronici nel campo dei

centri di calcolo, della telefonia mobile e nel settore degli armamenti. I detentori dei brevetti, in particolare l'Università della Pennsylvania e la società Qdrive, sono in trattativa per la cessione di licenze a molti gruppi industriali. Se, come sembra, queste prime applicazioni confermeranno le doti di semplicità, versatilità, economia ed affidabilità di queste apparecchiature, non tarderemo ad avere nelle nostre case una caldaia a metano o a energia solare che potrà servire contemporaneamente da condizionatore d'aria, da frigorifero e da generatore elettrico, oppure un'automobile con condizionatore ed impianto elettrico di bordo alimentati dal calore o dalle onde acustiche presenti nell'impianto di scarico, senza alcuna ricaduta negativa per l'ambiente, almeno per quanto riguarda l'utilizzo del gas di processo, l'innocuo ed ininfiammabile elio.

www.anaclub.it



Figura 1

La connessione tra calore e fenomeni acustici è ben nota ai maestri vetrai: riscaldando una estremità di un recipiente in vetro, si può innescare una oscillazione acustica al suo interno.

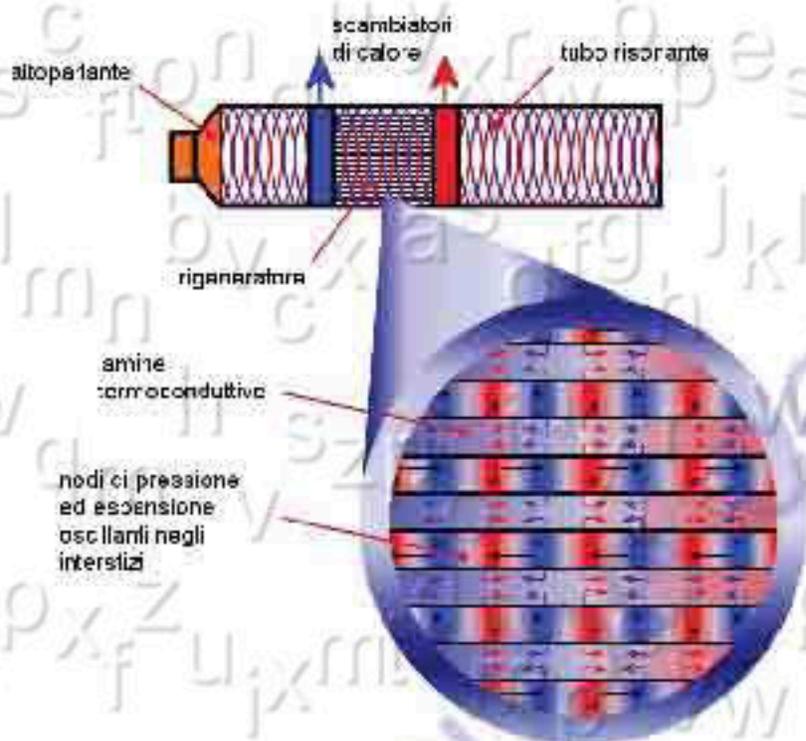


Figura 2

Nella sua forma più semplice, un dispositivo termoacustico è costituito da un cilindro a fondo chiuso, in cui è inserito un dispositivo, detto rigeneratore, costituito da un setto metallico poroso o da un elemento ceramico a cellette (honeycomb), simile a quello utilizzato nelle marmitte catalitiche. Se si applica, all'estremità aperta del tubo, una fonte di onde sonore ad una frequenza corrispondente alla risonanza del sistema, queste provocheranno, nel gas di riempimento, un susseguirsi di fronti di compressione ed espansione. Nei punti di compressione, il gas tenderà a riscaldarsi, al contrario, nei punti di espansione, subirà un raffreddamento. All'interno del rigeneratore, le particelle di gas, oscillando avanti e indietro per effetto delle onde sonore, trasporteranno calore lungo le pareti dei canalicoli in cui sono contenute, con un meccanismo simile al trasferimento dell'acqua da un secchio all'altro lungo una catena di portatori (*bucket brigade*). In questo modo, si stabilirà un sensibile differenziale di calore in corrispondenza delle estremità del rigeneratore. Applicando opportunamente degli scambiatori di calore, saremo in grado di asportare dal sistema contemporaneamente un fluido caldo ed uno freddo. Nel caso di una macchina frigorifera, il calore prodotto dovrà essere disperso in ambiente oppure utilizzato in un circuito secondario. Il sistema è reversibile: applicando un differenziale di calore al rigeneratore, si produrrà nel sistema un'onda acustica risonante.



Figura 3

Ad un livello di estrema semplificazione, tutti possono sperimentare la costruzione di un piccolo motore termoacustico, utilizzando una provetta in vetro Pyrex ed inserendovi un tamponcino di ceramica strutturato a nido d'ape, del tipo usato nelle marmitte catalitiche. L'estremità rivolta verso il fondo della provetta deve essere riscaldato da una piccola resistenza elettrica simile a quella utilizzata negli asciugacapelli: applicando tensione, la differenza di temperatura tra il lato riscaldato del mini - rigeneratore e quello lambito dall'aria esterna che entra dall'imboccatura della provetta, è sufficiente ad innescare un sibilo di intensità quasi insopportabile (circa 1 W di potenza acustica). A destra, possiamo vedere una curiosa "sirena solare", ottenuta ponendo il lato caldo del setto poroso in corrispondenza del fuoco di un paraboloide riflettente. Questi dispositivi sono stati realizzati da Reh-lin Chen, studente della Pennsylvania University.

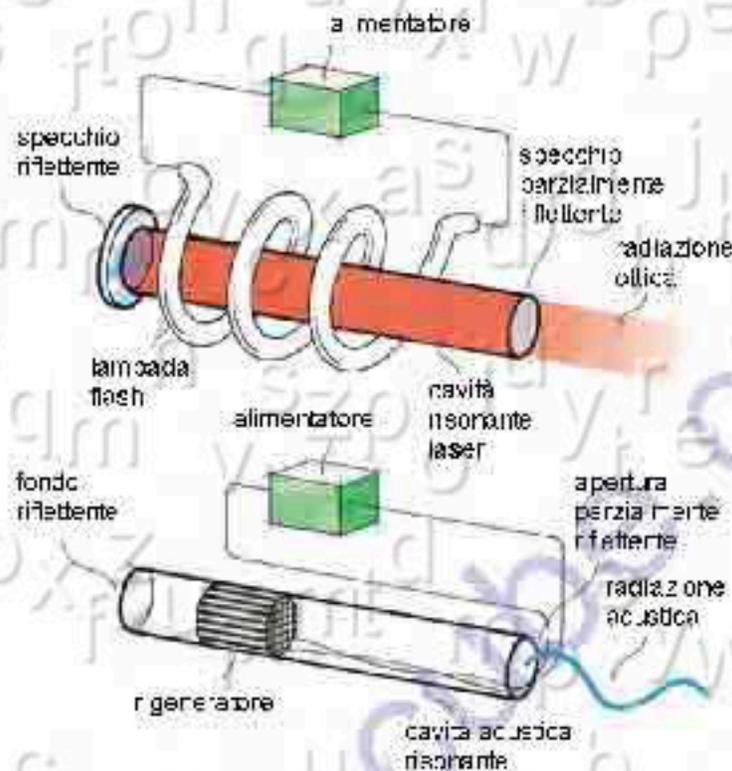


Figura 4

I dispositivi termoacustici presentano numerose similitudini con i laser ottici: entrambi sono in grado di amplificare delle onde stazionarie all'interno di cavità risonanti. In un laser a rubino, per esempio (in alto), si immette energia sotto forma di un impulso luminoso, che induce una "inversione di popolazione" dei livelli energetici degli elettroni e l'emissione di luce monocromatica. In un analogo termoacustico (in basso), l'energia viene immessa nella cavità attraverso il riscaldamento elettrico di un lato del rigeneratore poroso, che provoca uno squilibrio della distribuzione del calore e l'oscillazione del gas alla frequenza di risonanza della cavità.

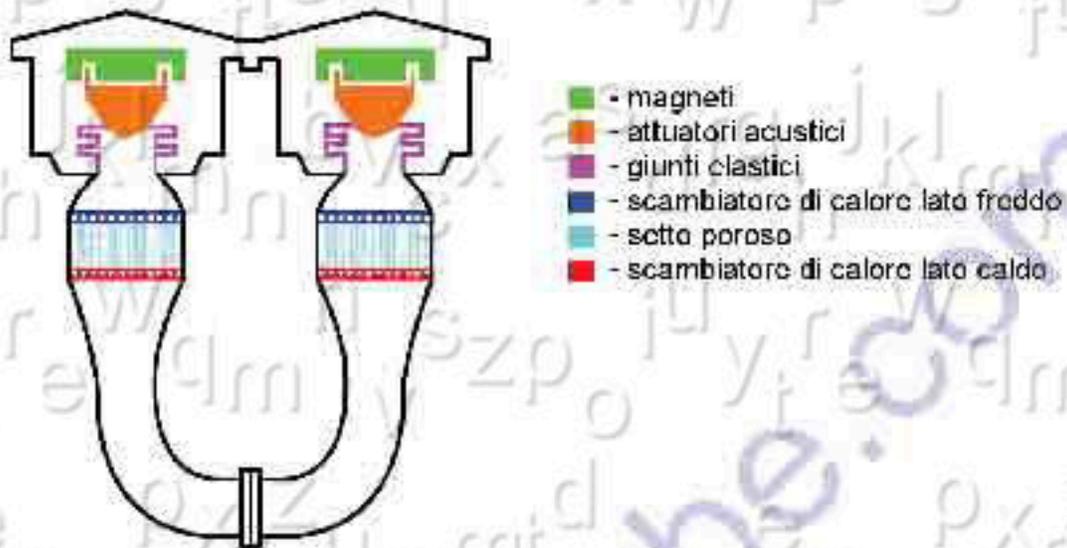
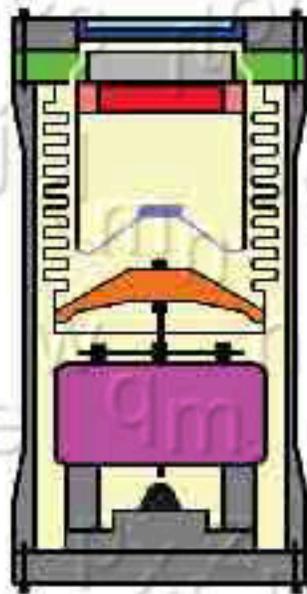


Figura 5

Schema di un refrigeratore termoacustico realizzato nel 1996 dai laboratori della Pennsylvania State University e collaudato a bordo di una nave da guerra per raffreddare dispositivi elettronici e in una missione della navetta Space Shuttle per la conservazione di campioni biologici. Il rendimento energetico era del 17%, alla temperatura dell'acqua refrigerata di 4°C, con una potenza frigorifera erogata di circa 400 W. L'abbinamento di due elementi gemelli nasce dai requisiti di ridondanza richiesti dall'applicazione spaziale per garantire la massima affidabilità.



- isolante termico
- pistone
- motore lineare a magneti mobili
- setto poroso
- scambiatore di calore lato freddo
- fluido freddo
- cono risonante
- scambiatore di calore lato caldo
- fluido caldo
- gas elio compresso a 3 MPa

Figura 6

Schema di un refrigeratore termoacustico per impieghi civili: si tratta di un apparecchio utilizzato da una importante catena di gelaterie per i propri banchi frigoriferi. Brevettato nel 2004, rappresenta lo stato attuale dell'arte per questo genere di dispositivi.

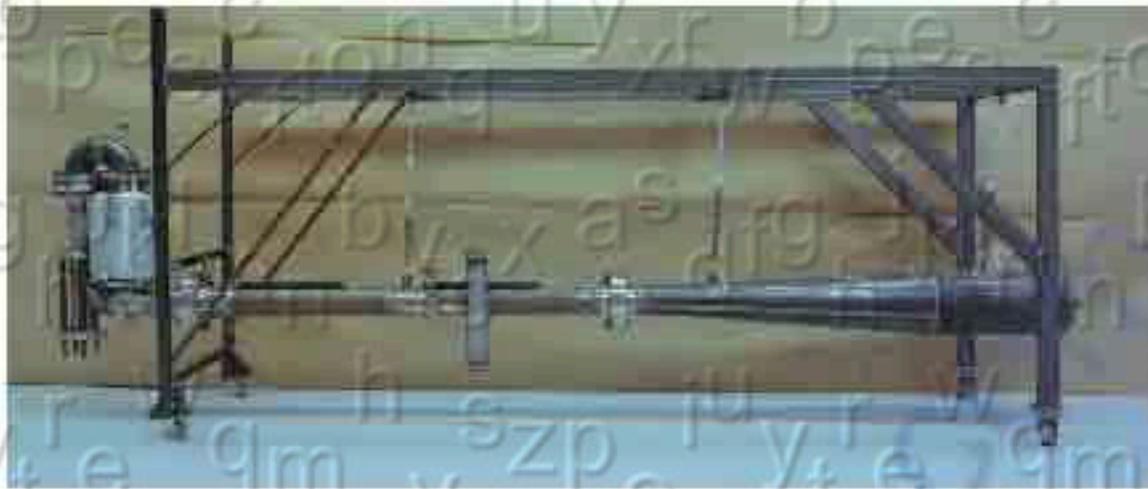


Figura 7

Prototipo di una macchina termoacustica realizzata nei Los Alamos Laboratories, utilizzata per liquefare il gas naturale, alimentata a gas. Questo progetto nasce con l'intento di mettere a punto un impianto di liquefazione operante su piattaforme marine. Attualmente, sono in costruzione singole unità capaci di produrre 2000 litri al giorno di gas naturale liquefatto. Il rendimento energetico è intorno al 30%. Il gas contenuto nella cavità acustica è elio compresso.

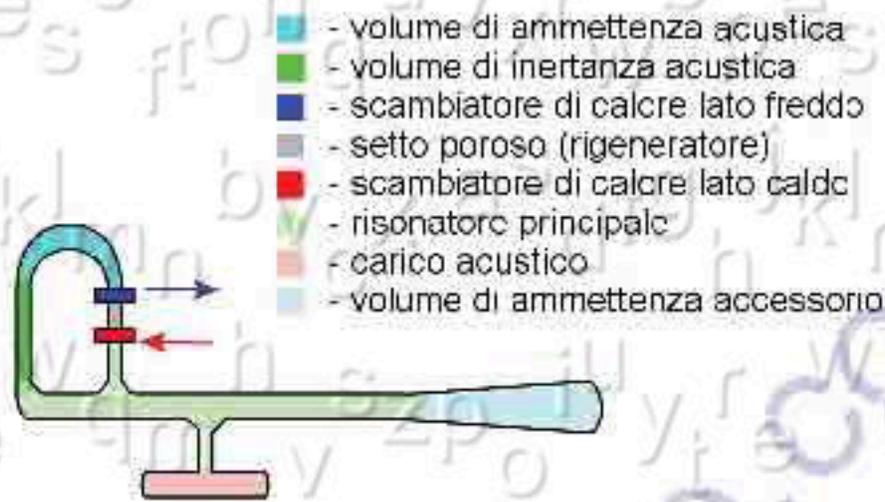


Figura 8

Schema della macchina termoacustica riportata in figura 7: un fluido riscaldato da una caldaia a gas viene fatto circolare nello scambiatore di calore collegato al lato caldo del rigeneratore (formato da una spugna metallica). In questo modo si attiva l'oscillazione del circuito acustico che porta ad una notevole sottrazione di calore dal lato freddo del rigeneratore, sufficiente a provocare la liquefazione del gas naturale che viene fatto circolare nello scambiatore corrispondente. Questo schema di funzionamento è considerato l'equivalente termoacustico di un motore Stirling, con il quale condivide la combustione esterna, l'uso degli scambiatori ed il concetto di rigeneratore.



Figura 9

Nell'immagine il primo dispositivo termoelettrico attualmente commercializzato per la produzione di azoto liquido. Con 4,5 kW di potenza installata è in grado di erogare 200 W di potenza frigorifera ad una temperatura di 80°K, equivalenti ad una produzione di 50 litri di gas liquefatto in 24 ore (Praxair).

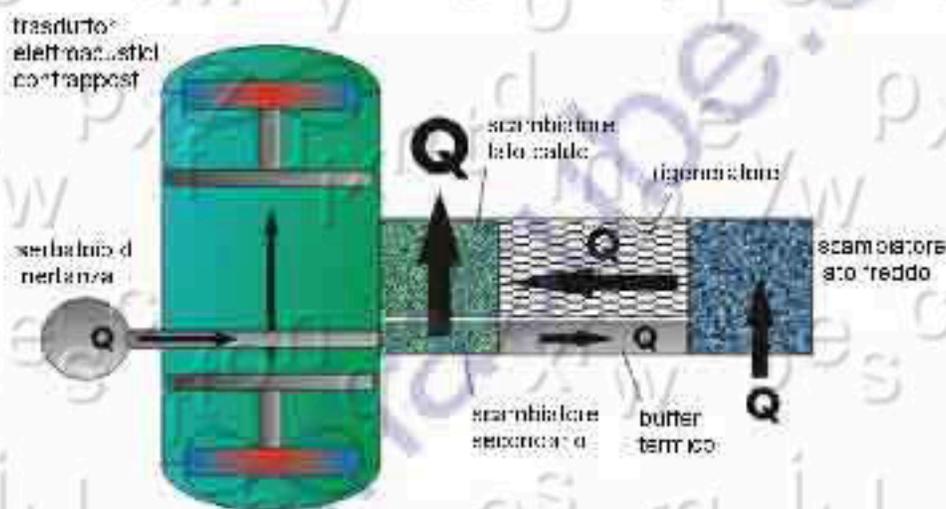


Figura 10

Refrigeratore termoacustico contenuto nell'apparecchio illustrato in Figura 9: è dotato di due trasduttori acustici per una potenza sonora complessiva di 3200 W. L'emissione sonora rimane confinata all'interno della struttura metallica, dove raggiunge un livello pari a 180 dB. La camera acustica lavora ad una pressione di 2,5 MPa. All'esterno è udibile solo un ronzio simile a quello di un compressore tradizionale. Le frecce nello schema evidenziano i flussi di calore: questa configurazione è particolarmente studiata per raggiungere differenziali di temperatura molto elevati, sfruttando una ulteriore espansione, quindi un ulteriore raffreddamento, del gas di lavoro (elio compresso) a valle dello scambiatore del lato freddo del rigeneratore (Q_{drive}).



Figura 11

Trasduttore elettroacustico utilizzato nel refrigeratore di Figura 10. Si tratta di un motore elettrico lineare a magneti permanenti, unica parte in movimento utilizzata. L'efficienza di conversione è intorno al 90%. Può essere alimentato direttamente dalla rete (funziona a 220 V C.A. 50-60 Hz), con un assorbimento massimo di 2 kW (per carichi parziali viene alimentato con un inverter elettronico regolabile). E' reversibile ad alternatore, trasformando così energia acustica in energia elettrica, ad esempio in un convertitore termoacustico alimentato con un fluido riscaldato a gas o per mezzo di energia solare.