

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI

FEDERICO II



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

**DIPARTIMENTO DI ENERGETICA, TERMOFLUIDODINAMICA
APPLICATA E CONDIZIONAMENTI AMBIENTALI**

Tesi di laurea in Fisica Tecnica

ANALISI DI UN MOTORE STIRLING TERMOACUSTICO

Relatore

DOTT. ING. RAFFAELE DRAGONETTI

Candidato

EDWIGE GARGIULO

MATR. 518/428

Anno accademico 2010/2011

Questo studio è rivolto alla conoscenza delle origini della termoacustica, alla comprensione dei principi fondamentali su cui questa scienza si basa, agli attuali e futuri sviluppi cui questa tecnologia può portare. In particolare è stato analizzato un promettente prototipo di motore termoacustico basato sul ciclo Stirling .

L'attuale crisi energetica ha portato, negli ultimi due decenni, notevoli investimenti nella ricerca per sviluppare nuove tecnologie atte a ridurre la quantità di inquinanti. In questo senso le macchine termoacustiche sono dispositivi che oltre a promettere buoni rendimenti utilizzano fonti energetiche alternative (ad esempio solare e biomasse).

A causa della loro intrinseca semplicità meccanica, tali apparecchiature potrebbero un giorno essere impiegate per la produzione di elettricità, di acqua calda sanitaria o per il condizionamento dell'aria nelle singole abitazioni.

Un motore termoacustico converte parte del calore fornito da una sorgente ad alta temperatura in energia acustica. La restante parte verrà ceduta ad una sorgente termica a temperatura inferiore, ad esempio l'ambiente.

A differenza dei comuni motori a combustione interna i motori termoacustici sono dispositivi di conversione di energia termica esterna che raggiungono semplicità e realizzabilità utilizzando onde sonore anziché pistoni e bielle.

Essi sfruttano materiali e tecnologie produttive di basso costo e funzionano usando aria come fluido di lavoro (quelli più efficienti utilizzano Elio, Argon o altri gas nobili) quindi in nessun caso vengono impiegate miscele tossiche o pericolose per l'ambiente. I dispositivi sono semplici nel funzionamento e hanno un'elevata affidabilità e durata, poiché non ci sono parti in movimento soggette ad usura e non s'impiegano lubrificanti di alcun tipo. L'erogazione della potenza è modulabile con facilità ed efficacia. I costi stimati di produzione dei sistemi termoacustici si collocano sotto l'Euro/Watt e, in ogni caso, inferiori ai costi delle attuali tecnologie.

Attualmente il rendimento dei motori termoacustici è pari al 30-40% del ciclo ideale di Carnot ed è confrontabile con quello dei comuni motori a combustione interna.

La ricerca in Italia in tale settore è attualmente quasi nulla mentre la termoacustica in altre nazioni è un terreno fertile di innovazione, di sviluppo tecnologico e industriale. A testimonianza di quanto detto basti notare l'attenzione scientifica quantificata in articoli e brevetti in tale settore, come mostrato in figura 1:

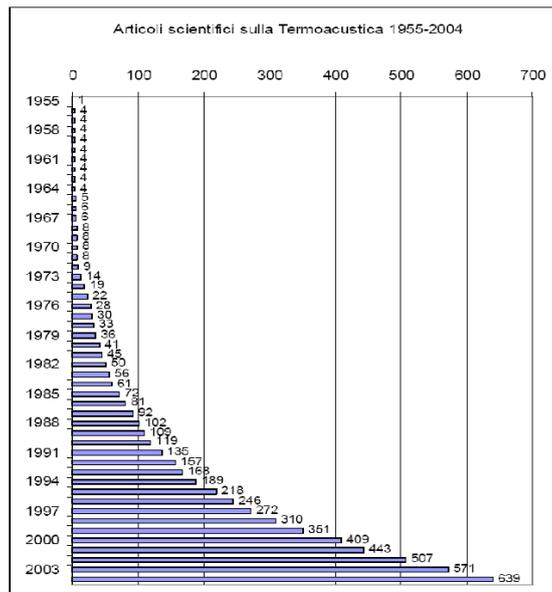


Figura 1-Articoli scientifici sulla termoacustica dal 1955 ad oggi

I motori termoacustici possono essere classificati in base al tipo di propagazione dell'onda sonora nel condotto: stazionaria o progressiva. La differenza sostanziale tra questi due tipi di propagazione sonora è nella fase tra pressione sonora e velocità delle particelle.

Un semplice motore ad onda stazionaria è composto da un *risonatore* dotato di un mezzo poroso denominato *stack*, i cui pori hanno un raggio idraulico dell'ordine di grandezza della profondità di penetrazione termica δ_{therm} e da uno *scambiatore di calore* "caldo" cioè ad una temperatura $T_H > T_A$ maggiore di quella ambiente.

Questi due dispositivi si trovano all'estremità sinistra del risonatore, che risulterà inoltre aperto all'estremità opposta a contatto con l'aria.

Un motore termoacustico ad onda progressiva invece è un dispositivo le cui caratteristiche costruttive rendono possibile la formazione di un'onda piana all'ingresso di un mezzo poroso i cui pori sono molto più piccoli della profondità di penetrazione termica. Tale mezzo è chiamato "rigeneratore" ed assorbendo e cedendo calore consente di mantenere le oscillazioni del gas all'interno dei pori pressoché isotermitiche. In tal modo la velocità del gas lungo il gradiente di temperatura è sostanzialmente in fase con le oscillazioni di pressione. Tale condizione è causata dal *perfetto contatto termico* che si crea tra i pori e le pareti del rigeneratore per effetto della loro geometria.

L'ottimizzazione e l'evoluzione dei dispositivi termoacustici ad onda progressiva si è avuta associando il loro funzionamento ad una vecchia idea nel campo dei motori termici: il motore Stirling. Il macchinario, progettato e costruito dal reverendo Robert Stirling, consisteva in un motore ad aria calda contenente una caldaia potenzialmente non esplosiva ed il funzionamento

dipendeva dall'espansione e dallo spostamento dell'aria in un cilindro riscaldato da una combustione esterna e dotato di un rigeneratore. La complessità meccanica dei motori Stirling era però elevata rispetto ai motori a combustione interna e questo limitò la sua diffusione.

Il collegamento tra il motore Stirling e la termoacustica è cominciato due decenni fa quando Peter H. Ceperley nel suo studio "A pistonless Stirling engine- the traveling wave heat engine" intuì che in un motore Stirling i pistoni potevano essere sostituiti da masse di aria a destra e sinistra del rigeneratore opportunamente sfasate. Questo perché la propagazione di un'onda acustica attraverso uno scambiatore di calore rigenerativo è sottoposta ad un ciclo termodinamico simile a quello di un ciclo ideale di Stirling. Gli esperimenti di Ceperley non raggiunsero mai risultati apprezzabili in termini di guadagno di potenza a causa delle elevate perdite (soprattutto di tipo viscoso) che si avevano nel rigeneratore. Tuttavia egli fornì la giusta intuizione per lo sviluppo di questa energia alternativa ed è stato grazie agli studi di Swift e Backhaus che si è potuto conseguire un rendimento più elevato paragonabile agli attuali motori a combustione interna. Tale motore si presenta di forma toroidale necessaria a forzare il fluido di lavoro in esso contenuto ad eseguire un ciclo Stirling. In questo studio verrà quindi analizzato qualitativamente e quantitativamente il primo prototipo di motore Stirling termoacustico realizzato nel Los Alamos National Laboratory in New Mexico.

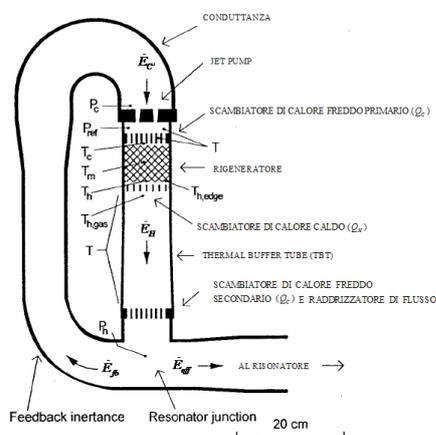


Figura 2 Configurazione toroidale del motore termoacustico Stirling

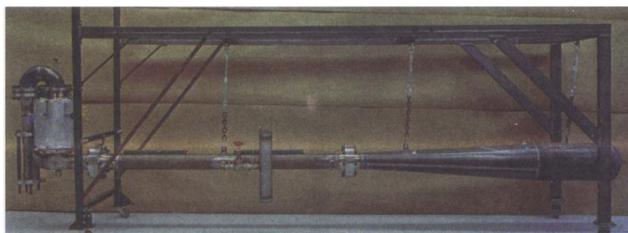


Figura 3-Prototipo del motore termoacustico Stirling realizzato alla Lanl

Il funzionamento può essere descritto utilizzando un'analogia elettrica riducendo il complesso sistema acustico ad un semplice schema elettrico a "parametri concentrati":

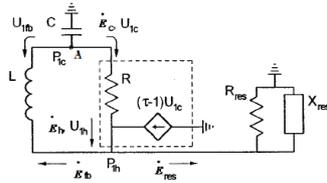


Figura 2- Semplificazione del modello a "parametri concentrati" del motore termoacustico Stirling

Sarà dimostrato come, con tale configurazione geometrica, è possibile risolvere la problematiche incontrate da Ceperley relative alle perdite di tipo viscoso. Attualmente tale dispositivo è in fase di studio per controllare flussi di massa del secondo ordine circolanti nel loop chiamati "streaming".

A titolo di esempio è mostrato in figura il rendimento del motore in funzione della temperatura dell'elio immediatamente al di sotto dello scambiatore di calore caldo $T_{H,gas}$:

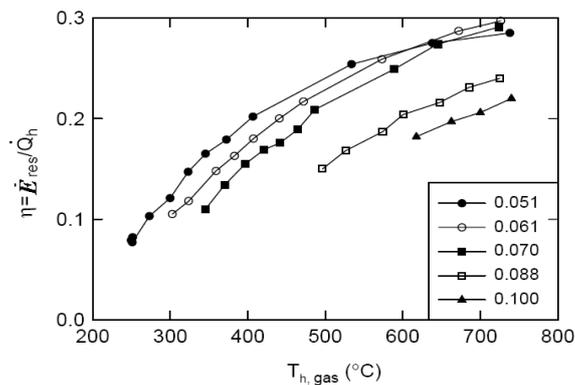


Figura 3

Il massimo rendimento del motore si raggiunge ad una temperatura di $T_{H,gas} = 725^{\circ}C$, con cui il motore converte \dot{Q}_h in potenza acustica al risonatore $\dot{E}_{reso} = 710W$ con un rendimento di $\eta = 0,30$. Ciò corrisponde al 41% del rendimento ideale di Carnot. Nel punto di massima potenza il motore realizza una $\dot{E}_{reso} = 890W$ al risonatore con un rendimento $\eta = 0,22$ e $T_{H,gas} = 725^{\circ}C$.