

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI

FEDERICO II



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

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

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Tesi di Laurea

**MODELLAZIONE DI UN MOTORE TERMOACUSTICO AD
ONDA STAZIONARIA MEDIANTE UN ALGORITMO DI
INTEGRAZIONE DELLE EQUAZIONI DI ROTT**

Relatore

DOTT. ING. RAFFAELE DRAGONETTI

Correlatore

ING. SABATO DI FILIPPO

Candidato

MARIALUISA NAPOLITANO

MATR. M67/107

Anno accademico 2013/2014

Termoacustica, come il nome stesso lascia intendere, è lo studio delle interazioni tra processi termici ed acustici. Nella comunità acustica, il termine "termoacustico" si applica specificamente a una classe di dispositivi il cui scopo primario è quello di convertire l'energia termica in energia acustica, o viceversa.

Una macchina diretta termoacustica converte il calore da una sorgente ad alta temperatura in energia acustica, cedendo inevitabilmente il calore di scarto ad un dissipatore a bassa temperatura. Una macchina indiretta termoacustica al contrario, utilizzando potenza acustica, trasferisce calore da una sorgente fredda ad una calda.

Questi dispositivi sfruttano le oscillazioni di temperatura che accompagnano le oscillazioni di pressione dovute a perturbazioni acustiche in un fluido. Per indurre elevate oscillazioni di temperatura è necessaria l'interazione termica del fluido di lavoro con le superfici solide.

Così, nella loro forma più semplice, i dispositivi termoacustici raggiungono la conversione tra energia termica ed acustica con poche o senza parti in movimento. Sono, quindi, dispositivi altamente affidabili, relativamente poco costosi da fabbricare, e richiedono pochissima manutenzione per il funzionamento continuo. Inoltre, i dispositivi termoacustici tendono a lavorare meglio con gas inerti come fluidi termodinamici di lavoro, eliminando così la necessità di impiegare fluidi di lavoro dannosi per l'ambiente, come clorofluorocarburi utilizzati in molti cicli di refrigerazione.

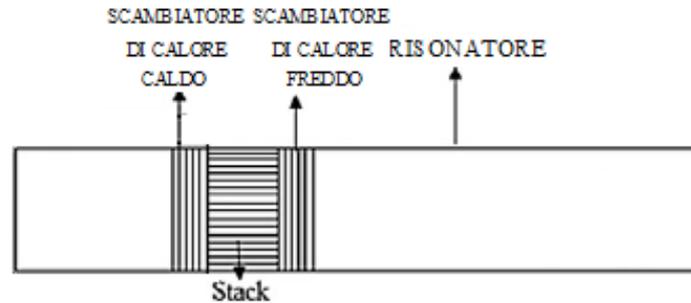
Questo tipo di conversione di energia è una tecnologia in rapido sviluppo che si allinea con la tendenza globale verso l'uso di energie rinnovabili. Rispetto alle altre tecnologie, però, quella termoacustica è ancora relativamente "giovane" e dunque la maggior parte delle macchine sono ancora in fase prototipale.

Sia nel caso di macchine dirette che inverse tali dispositivi di solito contengono gli stessi elementi: un elemento termoacustico che potrebbe essere uno stack o un rigeneratore, limitato alle due estremità da scambiatori di calore caldo e freddo. Il sistema è alloggiato all'interno di un risonatore. Driver acustici sono utilizzati in frigoriferi e pompe di calore per guidare l'effetto di refrigerazione, mentre opportuni trasduttori sono utilizzati nei motori per raccogliere l'energia acustica e convertirla in energia elettrica.

Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare il solo caso del motore termoacustico ed in particolare di analizzare il caso di un *motore termoacustico ad onda stazionaria*. Affinché all'interno del dispositivo si realizzi un'onda stazionaria il mezzo poroso deve essere caratterizzato da un *numero di Lautrec*:

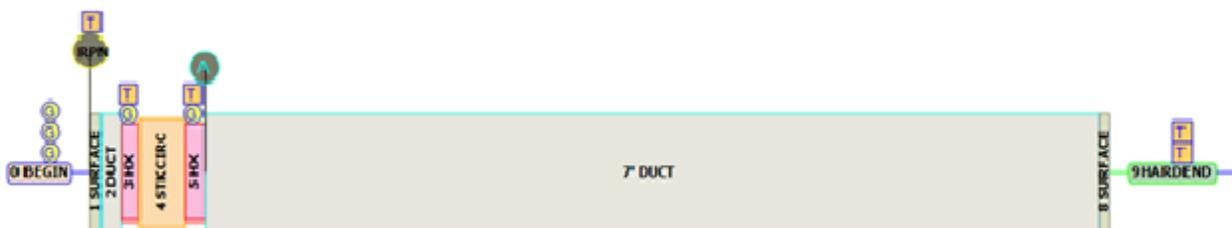
$$N_L = \frac{r_h}{\delta_k} \geq 1$$

Tale mezzo poroso è detto *stack* e fa sì che lo sfasamento tra pressione acustica e velocità delle particelle sia all'incirca di 90° .



Inizialmente lo studio del motore è stato effettuato tramite l'utilizzo del software DeltaEC (Design Environment for Low-Amplitude Thermoacoustic Energy Conversion), un programma che permette di risolvere numericamente i dispositivi termoacustici e di stimarne l'efficienza. Sviluppato da *Ward e Swift* presso l'Università di Los Alamos, esso permette l'integrazione numerica delle equazioni della termoacustica semplificate con la teoria di Rott lungo una direzione.

Si è quindi proceduto ad una messa a punto del modello partendo da una serie di motori già sviluppati e testati e riportati nella lettura scientifica di riferimento. A partire da questi, dato il gran numero di parametri sul quale l'utente può andare ad agire per modificare le prestazioni del dispositivo, si è deciso di mantenere costanti alcuni di essi quali la porosità dello stack e degli scambiatori di calore così come la lunghezza di questi ultimi e del tubo risonante, la sezione trasversale e la posizione dello stack all'interno del risonatore e di modificare ed ottimizzare quelli che invece sembravano essere più utili per una migliore comprensione dei fenomeni termoacustici che avvengono all'interno del motore. Procedendo per passi successivi, sono stati, quindi, variati il materiale costituente lo stack (Mylar o Celcor), la geometria dei pori (esagonale, rettangolare o a piastre parallele), la lunghezza dello stack ($5\text{cm} < L_{stack} < 10\text{cm}$), la differenza di temperatura all'estremità dello stack e quindi la temperatura dello scambiatore di calore caldo ($900\text{K} \leq T_H \leq 550\text{K}$). Il motore schematizzato in DeltaEC è quello riportato nella figura che segue e nella tabella sono riassunte le caratteristiche che hanno fornito il massimo rendimento:



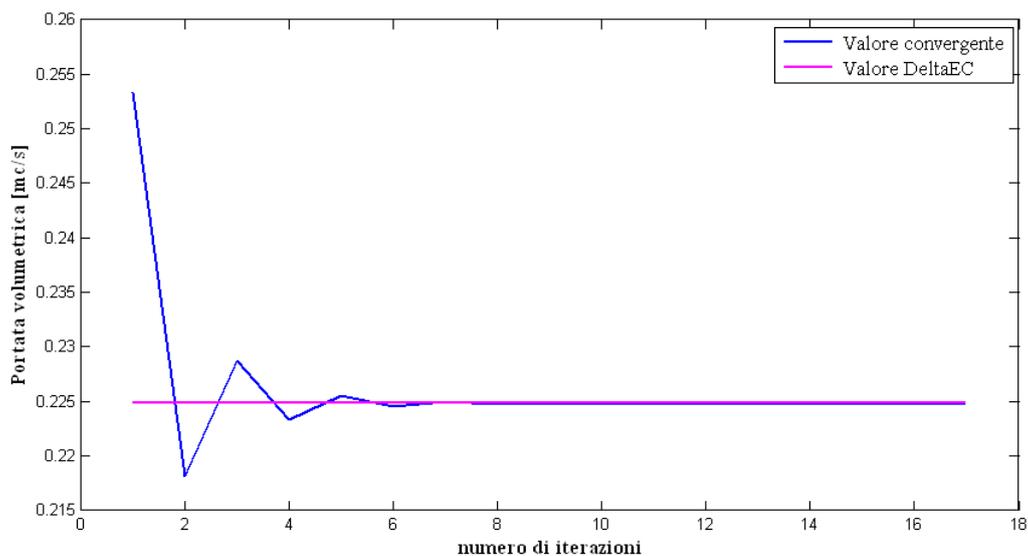
Materiale	Geometria STK	Lunghezza STK	Raggio poro STK	Differenza T
Celcor	Piastre parallele	0,0795m	0,0003m	600K

L'analisi condotta con l'utilizzo del software ha evidenziato una notevole difficoltà nel trovare un "punto di funzionamento" dato che le prestazioni energetiche di un motore termoacustico ad onda stazionaria sono influenzate da numerosi parametri: geometrici, acustici e termici. In particolare, è emerso che il software non consente di effettuare processi di ottimizzazione nei quali è necessario far variare iterativamente tutte le variabili.

Per tale motivo, si è deciso di simulare il motore con un elaborato numerico sviluppato in ambiente Matlab e che consiste nella risoluzione di un sistema di equazioni differenziali attraverso l'utilizzo del metodo di Newton-Raphson. Per poter ottenere il campo di pressione, velocità di volume e temperatura, le equazioni devono essere integrate lungo x , ma se queste vengono risolte per Δx molto piccoli possono essere linearizzate e cioè il differenziale può essere sostituito da una differenza finita. Quindi, noti i valori in ingresso ad ogni Δx è possibile determinare algebricamente, invece che con un'integrazione numerica, i valori in uscita che per continuità rappresentano i valori in ingresso al Δx successivo.

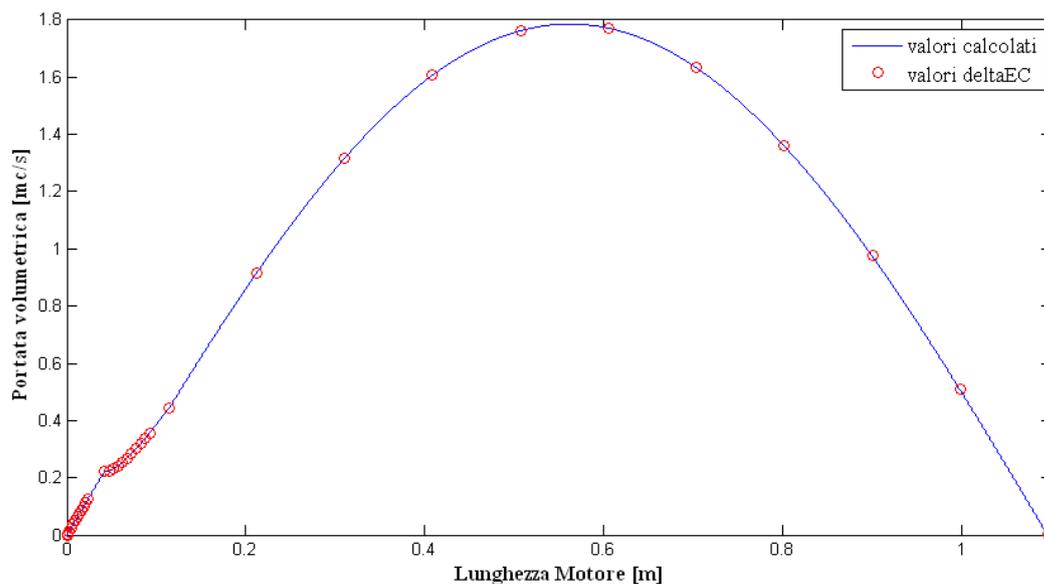
Inizialmente, le diverse parti del dispositivo sono state analizzate singolarmente immettendo come dati di input quelli derivati dall'utilizzo del software DeltaEC per poter verificare che le equazioni riportate in Matlab restituissero valori attendibili.

A titolo di esempio si riportano i diagrammi di convergenza relativi ad un generico Δx dello stack e, in particolare quello sulla velocità:



Successivamente, tutte le parti del motore che sono state assemblate e risolte di seguito in modo tale che i valori in uscita da un segmento siano i valori in ingresso al segmento successivo.

Fissata la geometria delle diverse parti e le temperature dei due scambiatori di calore, a partire da valori noti di frequenza, potenza termica da fornire allo scambiatore di calore caldo, temperatura del gas e pressione iniziale è stato verificato che i valori ottenuti con l'utilizzo dell'algoritmo sono gli stessi di quelli ottenuti con il DeltaEC. Si riporta di seguito il campo di velocità che si realizza all'interno del motore considerato:



Il passo successivo è stato quello di provare a svincolarsi da alcuni dei parametri di input. In particolare si è andato ad agire sul valore della temperatura del gas, della pressione e sulla lunghezza del condotto freddo introducendo nell'algoritmo tre controlli da effettuare in tre punti diversi del dispositivo. Le operazioni e la sequenza con la quale queste vengono compiute sono riassunte nel flow chart che segue.

I risultati ottenuti sono stati molto confortanti. In termini di velocità, l'algoritmo fornisce dei risultati in tempi minori del DeltaEC. Inoltre, rispetto a quest'ultimo, è possibile modificare alquanto semplicemente l'ordine di iterazione ed integrazione in funzione dei parametri che si vuole ottimizzare.

