

REFRIGERAÇÃO TERMO - ACÚSTICA

Andreia Aoyagui Nascimento

Universidade Federal de Uberlândia

Avenida João Naves de Ávila, 2160, Campus Santa Mônica - Bloco M – 38400-902 Uberlândia – MG.

andreia_aoyagui@hotmail.com

Ricardo Fortes Miranda

Universidade Federal de Uberlândia

Avenida João Naves de Ávila, 2160, Campus Santa Mônica - Bloco M – 38400-902 Uberlândia – MG.

rfmiranda@mecanica.ufu.br

Resumo: *O interesse pelo processo de refrigeração não utilizando fluidos refrigerantes, tem motivado vários pesquisadores ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de um refrigerador sem ônus para o ambiente, desta maneira o refrigerador termo-acústico tem sido uma das grandes áreas a serem pesquisada. Este trabalho consiste num estudo teórico do refrigerador termo-acústico, propondo um estudo mais detalhado no interior do refrigerador. Este projeto visa ainda à melhoria dos efeitos ambientais, tais como aquecimento global e o retraimento da camada de ozônio; bem como a conscientização da sociedade, além de ser um projeto mais econômico.*

Palavras-chave: *refrigeração, termo – acústica, meio ambiente.*

1. INTRODUÇÃO

A geração de troca térmica por meio da acústica tem sido estudada com muito interesse por pesquisadores desde 1859, quando Rijke de Leonard de Pieter, proporcionou uma das mais simples manifestações de oscilações acústicas termicamente geradas, que consistia de um tubo vertical com uma fonte de calor colocada em sua extremidade inferior; essa pesquisa foi denominada de “Tubo de Rijke”. Em 1878 Lord Rayleigh tinha formulado um critério para explicar como as ondas poderiam ser excitadas e sustentadas pela adição de calor.

“Se o calor é comunicado a, e abstraído de, a massa de ar que vibra (por exemplo) num cilindro limitado por um pistão, o efeito produzido dependerá apenas da fase de vibração na qual a transferência de calor ocorre. Se o calor é doado para o ar em um momento de elevada condensação ou ser retirado em um momento de elevado rarefação, a vibração é incentivada. Por outro lado se o calor for doado em um momento de rarefação, ou abstraída em um momento de elevada condensação, a vibração é desanimada.” (Lord Rayleigh, 1878).

Teoricamente a termo-acústica teve seu início em 1862, quando Kirchhoff calculou a atenuação acústica no tubo devido à oscilação da transferência de calor entre o sólido isotérmico (paredes do tubo) e o gás sustentado pela onda sonora. Kramer, motivado pelo experimento de Tacomis, fez um grande progresso embora no final o seus resultados experimental desagradaram. Por volta de 20 anos depois, Root e seus ajudantes começaram uma notável série de publicação, inicialmente para compreender a oscilação de Tacomis. Finalmente, Root estabeleceu uma teoria fundamental aplicada para experimentos básicos com ambos os motores e refrigeradores termo-acústicos.

Este trabalho tem como objetivo principal a formulação desta tecnologia, bem como uma introdução ao estudo da modificação da temperatura no interior das pilhas com relação a variação da espessura da placas do refrigerador.

2. CONCEITOS BASICOS DA TERMODINÂMICA

Uma máquina denominada de bomba de calor é um dispositivo que descreve um ciclo de Carnot, trabalha entre duas fontes, removendo calor da fonte quente e fornecendo calor à fonte fria, utilizada para realizar aquecimento em ambientes. Porém o refrigerador funciona em sentido oposto ao motor, desta forma removendo calor da fonte fria e fornecendo calor para a fonte quente.



Figura 1- Bomba de calor e refrigerador respectivamente

A primeira e segunda lei da termodinâmica é utilizada para determinar a eficiência de ambas as máquinas, sendo que para a análise da eficiência de uma bomba de calor utiliza-se de coeficiente de performance, já para o refrigerador utiliza-se o rendimento.

A partir da primeira lei da termodinâmica, garantindo que a energia interna possua valores positivo ou nulo, temos: ($\dot{Q}_c$) fluxo de calor removido; ($\dot{Q}_h$) fluxo de calor fornecido; ($\dot{w}$) trabalho realizado para o meio:

$$\dot{Q}_h - \dot{Q}_c - \dot{W} \geq 0 \quad (1)$$

Com relação à segunda lei, utilizando da mesma condição anterior, porém com relação à entropia, temos a seguinte equação, onde ($\dot{S}_i$) é a irreversibilidade entrópica causada pelo sistema, (T_c) é a temperatura baixa, (T_h) temperatura alta.

$$\frac{\dot{Q}_c}{T_c} - \frac{\dot{Q}_h}{T_h} + \dot{S}_i \geq 0 \quad (2)$$

Para a bomba de calor temos que o coeficiente de performance é dado por:

$$COP \leq \frac{(T_c)}{(T_h - T_c)} \quad (3)$$

Para os refrigeradores, a eficiência é dada a partir da equação subsequente, onde (η) é o rendimento do refrigerador

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_h} \quad (4)$$

Realizando a comparação com a primeira e segunda lei da termodinâmica tem que:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_h} \leq \frac{(T_h - T_c)}{T_h} \quad (5)$$

ou seja,

$$\eta \leq 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (6)$$

Deste modo, temos a denominada eficiência de Carnot para um refrigerador.

3. REFRIGERADOR TERMO-ACÚSTICOS

Um refrigerador termo-acústico consiste das seguintes partes como mostrado na figura 2: alto-falante, tubo ressonante, pilhas de placas paralelas, trocadores de calor e fluido de trabalho, este podendo ser hélio ou ar.

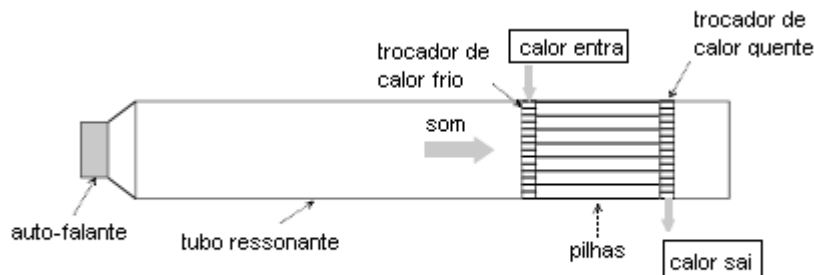


Figura 2 - Esquema de um refrigerador termo-acústico

O auto-falante emite ondas sonoras, ou seja, ondas de pressão, a qual fornece ao fluido no interior do tubo uma velocidade, pressão e temperatura, propagando-se, desta maneira em uma série de contração e uma rápida e concomitantemente expansão do fluido de trabalho, de uma maneira rápida que não permite a transferência de calor para as placas, assim considerando o processo como sendo adiabático.

3.1. Pilhas

As pilhas consistem de certa quantidade de placas paralelas espaçadas muito próximas uma das outras, desta maneira permitindo a ocorrência de transferência de calor por meio da condução térmica. Deste modo a profundidade térmica pode ser obtida por meio da equação 7.

$$\delta_k = \sqrt{\frac{k}{\pi^* f^* \rho^* c_p}} \quad (7)$$

Nesta equação (k) representa a condutividade térmica, (f) é a frequência de oscilação da onda sonora, (ρ) é a densidade do fluido, (c_p) calor específico do fluido.

A onda sonora exerce uma onda de pressão no fluido a qual é percebida pela introdução de uma compressão e velocidade, conseqüentemente um aquecimento da parcela do fluido. Posteriormente esta parcela realiza a expansão liberando sua energia para que seja absorvida pela parcela seguinte, já que esta se encontra sobre uma pressão de compressão. Deste modo, o fluido durante a sucinta compressão e expansão realiza o movimento de “vai e vem” sem que haja transferência térmica entre os materiais em contato, portanto o fenômeno que rege este refrigerador é adiabático. A transferência de calor ocorre somente nos trocadores de calor como mostrado na figura 3, δ_w esta relacionada com o trabalho realizado pelo fluido devido a sua viscosidade, δ_k esta relacionada com a penetração térmica, e Q é o calor transferido para o trocador de calor e para o fluido.

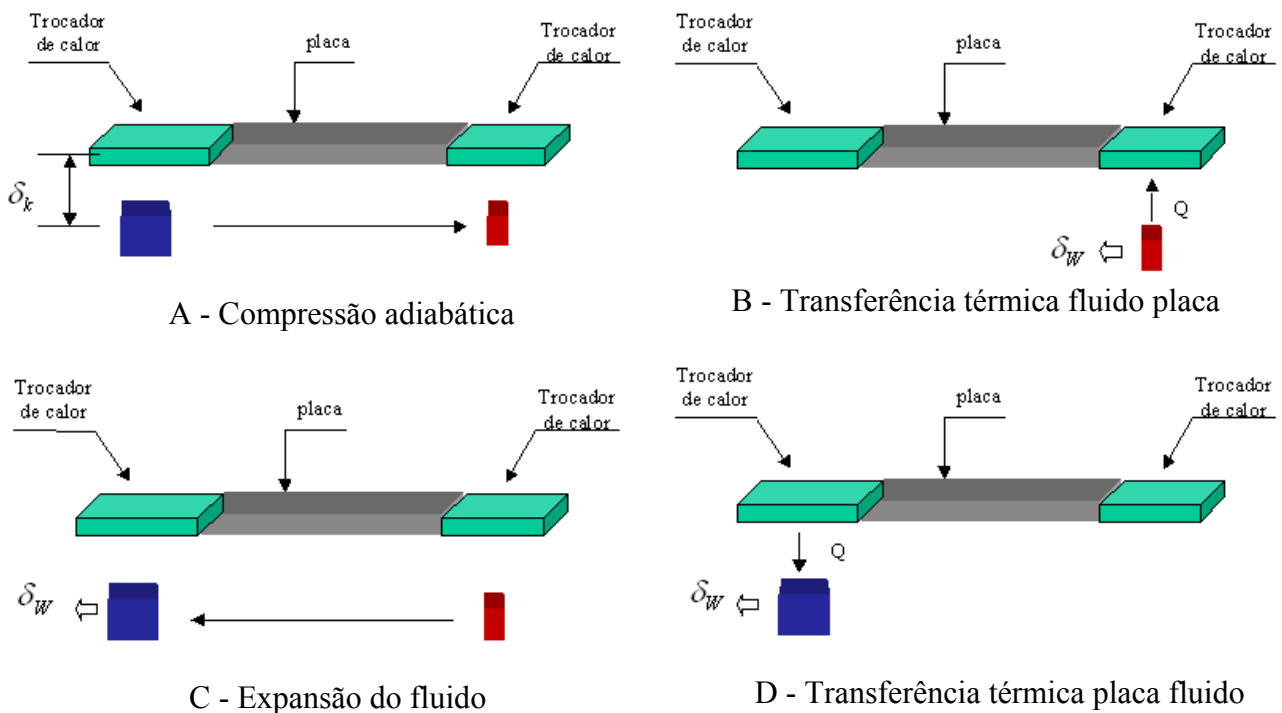


Figura 3 - Fenômeno tremo- acústico no interior das pilhas

Este fenômeno pode-se ser esquematizado por meio de um diagrama termodinâmico de pressão e volume como mostrado na figura 4, onde P_m esta remetendo-se à uma pressão no meio do fluido (pressão física) e P_1 a uma pressão de oscilação com o tempo, δ_v relaciona com a variação de volume relacionada a uma transformação isobárica realizada pelo fluido no trocador de calor.

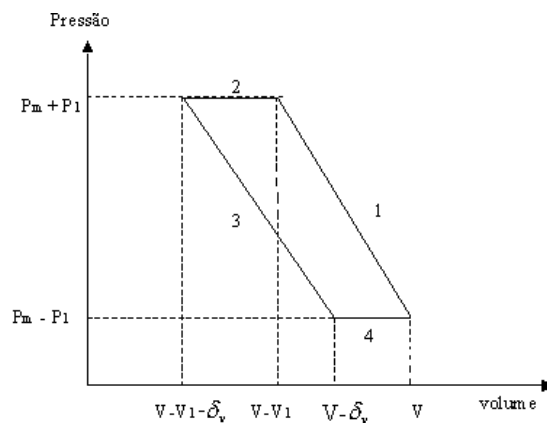


Figura 4 – Ciclo termodinâmico para o fenômeno termo-acústico.

3.2. Equacionamento:

No equacionamento é levada, em conta a primeira oscilação da onda sonora, omitindo a viscosidade do gás e a condutividade térmica. Devido à pressão ser realizada por uma onda, a equação 8 e 9, possui um valor real e um complexo que esta relacionada com a variação no tempo, onde os termos P_1 e u_1 é a parcela que esta sendo induzida no fluido.

$$P = P_m + P_1 * e^{i\omega t} \quad (8)$$

$$u = u_1 * e^{i\omega t} \quad (9)$$

O fenômeno também é regido pelas equações da mecânica dos fluidos, a equação de Navier-Stokes, equação da continuidade, equação da energia e pela lei de Fourier. Utilizando estas equações juntamente com as equações 8 e 9 tem-se do perfil de temperatura no fluido (Equação 10).

$$T_1(x, y) = \frac{\beta T_m}{\rho_m c_p} P_1 - \frac{1}{\rho_m w^2} \frac{dT_m}{dx} \left(\frac{dp_1}{dx} \right) \left(1 - \left[\left(\frac{1}{\sigma - 1} \right) \frac{\cosh(\alpha_s y)}{\cosh(\alpha_s y_0)} \right] \right) - \left(\frac{\beta T_m}{\rho_m c_p} P_1 - \frac{1}{\rho_m w^2} \left(\frac{1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_k}}{\sigma - 1} \right) \frac{dT_m}{dx} \left(\frac{dp_1}{dx} \right) \right) \frac{\cosh(\alpha_k y)}{(1 + \varepsilon_s) \cosh(\alpha_k y_0)} \quad (10)$$

Onde : δ_v é a penetração viscosa, δ_k é a penetração térmica no fluido, δ_s é a penetração térmica no sólido, σ é o número de Prandtl, f_v e f_k é a denominada função Roots e ε_s é a propriedade do material da placa.

A partir da equação da continuidade, e utilizando a equação 9 tempos a equação da onda (Equação 11)

$$\rho_m \beta w^2 T_1 - \frac{w^2}{a^2} P_1 - \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) + i\omega \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

A fim analisar o fenômeno como todo, é necessário utilizar a equação de onda de Roots, a qual é obtida por meio de uma substituição da equação 10 na equação 11. Assim esta equação de onda (Equação 12) é determinada.

$$\left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \varepsilon_s)} f_k \right] P_1 + \frac{a^2}{w^2} \rho_m \frac{d}{dx} \left[\frac{(1 - f_v)}{\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \right] + \frac{a^2}{w^2} \frac{(f_k - f_v)}{(\sigma - 1)(1 + \varepsilon_s)} \beta \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0 \quad (12)$$

O poder acústico, energia transmitida por unidade de área a qual o som se propaga, esta expressa na equação 13, onde o variável A_g é a área da superfície do trocador.

$$\frac{d\dot{w}}{dx} = -\frac{1}{2} A_g \left[\frac{\rho_m \text{Im}}{|1 - f_v|} |\langle u_1 \rangle|^2 + \frac{(\gamma - 1) \text{Im}(f_k)}{|\rho_m a^2 (1 - \varepsilon_s)|} |\langle p_1 \rangle| \right] + \frac{1}{2} A_g * w \left(\frac{\beta}{w(1 - \sigma)(1 + \varepsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \text{Re} \left[\frac{f_k^* - f_v^*}{(1 - f_v^*)} P_1(u_1^*) \right] \right) \quad (13)$$

4. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao incentivo dado pela CAPES.

5. REFERÊNCIAS

G. W. Swift , 1988, “ Thermoacoustic engines” , J. Acoust. Soc. Am.
Kinsler, Lawrence E.[et.al.],1982c1950,” Fundamentals of acoustic”, New York : John Wiley.
Lord Rayleigh, 1878 “A Teoria do Som”.

THERMOACOUSTIC REFRIGERATION

Andreia Aoyagui Nascimento

Universidade Federal de Uberlândia
Avenida João Naves de Ávila, S/N, Campus Santa Mônica - Bloco M – 38400-902 Uberlândia – MG.
andreia_aoyagui@hotmail.com

Ricardo Froles Miranda

Universidade Federal de Uberlândia
Avenida João Naves de Ávila, S/N, Campus Santa Mônica - Bloco M – 38400-902 Uberlândia – MG.

Abstract: *The interest in refrigeration processes has motivated some researchers to develop and improve the refrigeration process without great environmental damage, thus thermo-acoustic refrigeration has been one of the greatest areas to study. This research consists of the theoretical study of thermo-acoustic refrigeration. Thus the purpose of this project is to gain a better understanding of this process and also to reduce the environmental effects, for example, reducing global warming and the reduction of the ozone layer. The project also aims to give society a more conscientious view of the environment together with the economic aims of the project.*

Keywords: *refrigeration, thermoacoustic, environment*