



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UM REFRIGERADOR POR COMPRESSÃO DE VAPOR E UM REFRIGERADOR TERMOELÉTRICO

Públio Otávio Oliveira Duarte

Cláudio Melo

Universidade Federal de Santa Catarina

Departamento de Engenharia Mecânica

NRVA – Núcleo de Pesquisa em Refrigeração, Ventilação e Condicionamento de Ar

88040-900 - Florianópolis – SC

E.mail: melo@nrva.ufsc.br

***Resumo.** O objetivo deste trabalho é investigar o desempenho de um refrigerador termoelétrico de pequena capacidade através da comparação com o desempenho de um sistema convencional por compressão de vapor de volume interno similar. A análise comparativa baseou-se em resultados de testes de consumo de energia, de abaixamento de temperatura, de fluxo reverso e de ruído. Os resultados mostraram que o refrigerador termoelétrico em questão é menos eficiente, possui um tempo de abaixamento de temperatura maior e produz um nível de ruído mais elevado que o refrigerador convencional.*

***Palavras-chave:** Refrigeração, Termoelétrico, Energia.*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a eliminação de vários fluidos refrigerantes do mercado e a necessidade de novas tecnologias de refrigeração economicamente viáveis e ambientalmente amigáveis, levou vários pesquisadores e empresas a investir no desenvolvimento de sistemas alternativos de refrigeração. Como exemplos pode-se citar os sistemas por absorção, eletromagnéticos, termoelétricos e os baseados no ciclo Stirling.

No caso particular da refrigeração termoelétrica, o desenvolvimento de novos materiais semicondutores, de novas técnicas de fabricação dos módulos termoelétricos e de novos trocadores de calor foi fundamental para a retomada das pesquisas nesta área (Huang et al., 2000).

A ênfase que, no passado, era quase que inteiramente colocada no desenvolvimento de módulos termoelétricos passou, mais recentemente, a ser colocada também no desenvolvimento de refrigeradores termoelétricos. Como exemplo pode-se citar o refrigerador termoelétrico desenvolvido pela Hydrocool Pty. Ltd., em 1998. Esse sistema utiliza trocadores de calor com fluido intermediário o que possibilita a obtenção de coeficientes de performance superiores aos refrigeradores termoelétricos convencionais do tipo ar-ar (Batchelor et al., 1998).

O aparecimento de refrigeradores termoelétricos comerciais fez com que Bansal et al. (2000) realizassem uma análise comparativa entre um refrigerador termoelétrico do tipo líquido-líquido (TE), um refrigerador por compressão mecânica (CV) e um por absorção (AB). Nessa análise ficou evidente que o refrigerador TE apresentava um coeficiente de performance superior ao refrigerador AB, mas inferior ao refrigerador CV. O ruído gerado pelo refrigerador TE, por outro lado, foi inferior ao do refrigerador CV, mas superior ao do refrigerador AB.

O foco do presente trabalho reside na comparação do desempenho de um refrigerador TE do tipo ar-ar com o desempenho de um refrigerador convencional por compressão mecânica de vapor.

Além da comparação propriamente dita, a base de dados levantada neste trabalho permitirá a realização de trabalhos futuros, envolvendo outras tecnologias de refrigeração, outros refrigeradores termoeétricos ou mesmo variações do mesmo refrigerador TE.

As comparações foram efetuadas a partir de resultados de testes normalizados de abaixamento de temperatura (NTB00048, 1992), de consumo de energia (ISO 7371, 1985) e de fluxo reverso (NTB00119, 1992), realizados a 21 e 32°C. Esses ensaios foram realizados numa câmara de testes com controle de temperatura e umidade. Adicionalmente foram realizados ensaios numa câmara reverberante para a determinação da intensidade sonora dos dois refrigeradores.

2. SISTEMAS TERMOLÉTRICOS

Os sistemas termoeétricos baseiam-se no efeito Peltier, observado pela primeira vez em 1834 pelo físico francês Jean Peltier. Neste efeito, um par termoeétrico, formado pela união de dois materiais com propriedades termoeétricas diferentes, quando submetido a uma diferença de potencial gera uma corrente contínua que ao passar pelas junções dos materiais provoca a absorção ou a dissipação de calor nesses locais.

Os módulos termoeétricos são formados por vários pares termoeétricos, constituídos por elementos semicondutores sintéticos do tipo-n e do tipo-p, conectados eletricamente em serie e termicamente em paralelo. Estes elementos são colocados entre duas placas cerâmicas, responsáveis pelo isolamento elétrico e pela fixação dos pares no circuito (ver Fig. (1)).

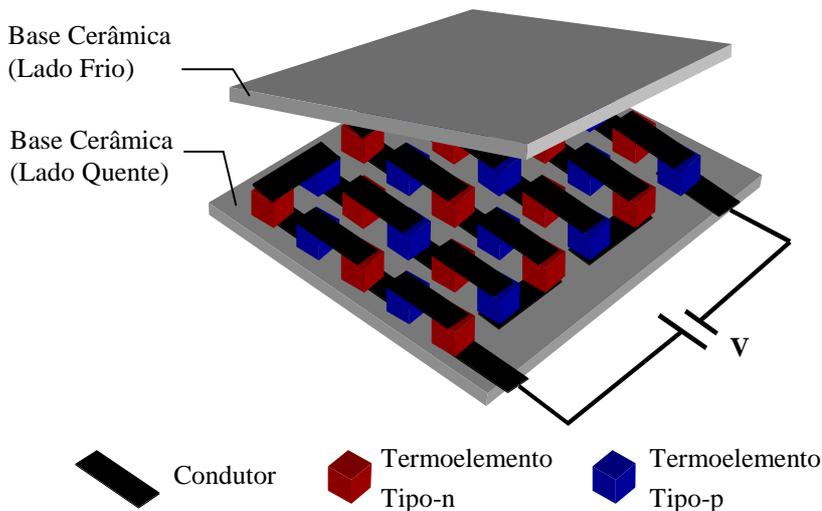


Figura 1. Módulo Termoeétrico

Os materiais semicondutores sintéticos, mais utilizados para aplicações de refrigeração são as ligas de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3). Este material, quando tratado adequadamente, fornece semicondutores do tipo-n e do tipo-p, com as características termoeétricas desejadas.

Além do módulo, um sistema termoeétrico utiliza dois trocadores de calor e uma fonte de alimentação de corrente contínua ou um conversor CA/CC. Os sistemas TE podem ser do tipo ar-ar, líquido-líquido ou ar-líquido, dependendo da forma de transferência de calor nas faces quente e fria do módulo (ver Fig. (2)).

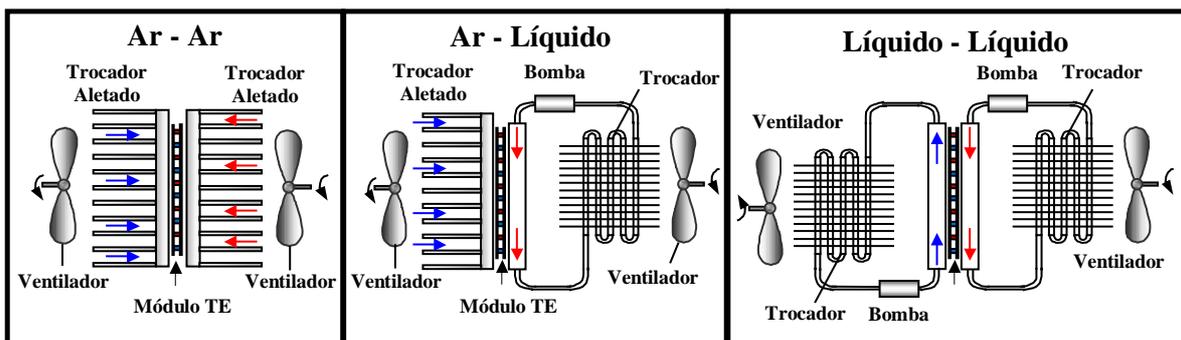


Figura 2. Tipos de sistemas termoeétricos

3. DESCRIÇÃO DOS REFRIGERADORES

3.1 Refrigerador Termoelétrico

O refrigerador termoelétrico em questão utiliza um módulo termoelétrico com dimensões de 40x40x3,3mm. Os trocadores de calor (absorvedor e dissipador) são aletados e encontram-se fixados diretamente sobre as faces do módulo. A movimentação de ar sobre os trocadores é induzida pela ação de ventiladores, o que caracteriza um sistema TE do tipo ar-ar.

O módulo termoelétrico e os ventiladores dos trocadores funcionam com corrente contínua. Isso permite que a operação do sistema seja controlada simplesmente pela variação da corrente de alimentação. O refrigerador também possui um conversor CA/CC, para transformar a tensão proveniente da rede de energia, de alternada para contínua.

Neste sistema, o calor retirado do ar no interior no gabinete, com o auxílio do absorvedor, é bombeado pelo módulo termoelétrico para o dissipador, localizado no lado superior externo do gabinete, onde é eliminado para o ambiente. Uma vista explodida do refrigerador TE utilizado neste trabalho é mostrada na Fig. (3).

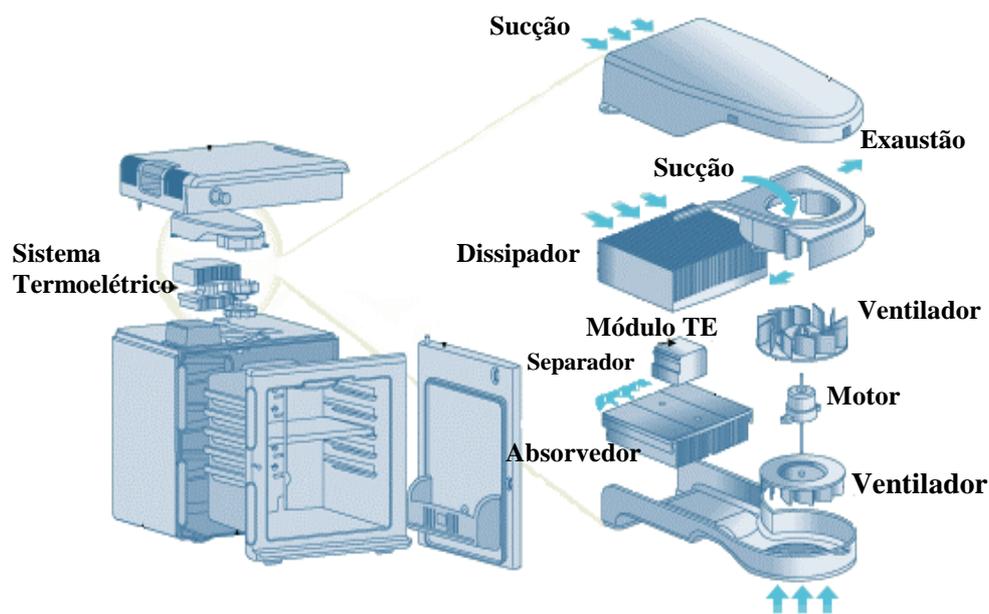


Figura 3. Vista explodida do refrigerador TE

3.2 Refrigerador por Compressão de Vapor

Dentre os refrigeradores por compressão de vapor disponíveis no mercado escolheu-se um modelo cujo volume interno era o mais próximo do volume interno do refrigerador TE. A Tab. (1) mostra dados comparativos entre os dois refrigeradores analisados.

O refrigerador CV utiliza um compressor hermético alternativo, um condensador do tipo arame sobre tubo, um evaporador “roll-bond” e um tubo capilar. Neste sistema, o fluido refrigerante a baixa pressão e temperatura, proveniente do tubo capilar, passa pelo evaporador absorvendo calor do meio a refrigerar (gabinete). Do evaporador o refrigerante passa para o compressor onde a sua pressão é elevada. Do compressor o refrigerante passa pelo condensador rejeitando calor para o meio externo. Do condensador o refrigerante retorna ao capilar, onde ocorre o necessário

abaixamento de pressão, fechando assim o ciclo de operação. A temperatura do ar no interior do gabinete é controlada por um termostato mecânico que atua diretamente sobre o compressor.

Tabela 1. Características dos refrigeradores.

| Características | Termoelétrico | Compressão |
|------------------|---------------|------------------|
| Volume (litros) | 56 | 48 |
| Refrigerante | - | HFC-134a |
| Trocador interno | Ar – aletado | Roll-bond |
| Trocador externo | Ar – aletado | Arame sobre tubo |
| Alimentação (V) | 120 | 220 |

4. INSTRUMENTAÇÃO DOS REFRIGERADORES

Durante os ensaios foram utilizados termopares, transdutores de corrente, tensão e potência e um sistema de aquisição de sinais HP75000, de 104 canais.

As temperaturas do ar no interior e no exterior do refrigerador foram medidas através de cabos de compensação de bitola 24 AWG, com incerteza de medição de $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$, posicionados de acordo com a norma NTB 00048 (1992).

No refrigerador TE foram ainda utilizados termopares tipo T, com 0,13 mm de diâmetro e com incerteza de medição de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Esses termopares foram fixados sobre as bases do dissipador e do absorvedor, nas faces do módulo TE, na entrada e na saída dos canais de passagem de ar e ao longo das aletas dos trocadores de calor.

A potência consumida pelo refrigerador TE foi separada nas parcelas referentes ao módulo termoelétrico, aos ventiladores e ao conversor CA/CC. Para tanto foram utilizados transdutores de tensão, corrente e potência, todos de fabricação Yokogawa e com incerteza de medição de $\pm 0,25\%$.

Os cabos de compensação em contato com o ar foram inseridos dentro de massas padrões de cobre, para melhorar a estabilidade do sinal. Tomou-se ainda o cuidado de envolver estas massas com papel alumínio para evitar os efeitos da radiação.

5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS REFRIGERADORES

Como já mencionado, os testes foram realizados nas temperaturas ambientes de 32 e 21°C . Estas temperaturas foram estabelecidas tomando-se por base o fato do refrigerador TE ter sido desenvolvido para regiões de clima temperado (classe N) e com o objetivo maior de ser utilizado em ambientes climatizados, como hotéis, hospitais, escritórios, etc. Os testes comparativos e os respectivos resultados são descritos e analisados nas seções a seguir.

5.1 Ensaio de Fluxo Reverso

Este ensaio tem por objetivo a determinação da condutância térmica (UA) do gabinete. O refrigerador, desligado e com a porta fechada, é mantido no interior da câmara de testes, estabilizada numa temperatura pré-estabelecida. Termopares são dispostos no lado interno e externo do refrigerador com o intuito de avaliar a diferença média de temperatura através das paredes do gabinete. Resistências elétricas, convenientemente dispostas no interior do gabinete, são então utilizadas para elevar a temperatura média do ar interno para um valor superior em 25°C a temperatura da câmara de testes. No ensaio com o refrigerador TE o ventilador foi mantido ligado, uma vez que a movimentação do ar afeta as trocas de calor por convecção no lado interno do gabinete.

Na condição de regime permanente, a taxa de transferência de calor através das paredes do gabinete (Q_P) corresponde ao calor sendo dissipado pelas resistências elétricas (P). A condutância térmica pode então ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$UA = \frac{Q_P}{(T_{INT} - T_{AMB})} \quad (1)$$

onde T_{INT} e T_{AMB} representam respectivamente as temperaturas médias dos ambientes interno e externo.

No caso do refrigerador TE, torna-se necessário considerar o calor que flui através do módulo termoeletrico, já que este está em contato com os ambientes interno e externo ao gabinete. Procurou-se minimizar esta transferência de calor através do isolamento do dissipador, o que não eliminou completamente o diferencial de temperatura entre as faces do módulo (ΔT_M).

O calor dissipado pelo motor de acionamento dos ventiladores não foi levado em consideração, já que este está montado no lado externo do gabinete.

Um balanço de energia em torno do gabinete do refrigerador TE fornece:

$$Q_P = P - Q_M \quad (2)$$

onde Q_P e Q_M representam respectivamente as taxas de transferência de calor através das paredes do gabinete e do módulo termoeletrico.

A parcela de transferência de calor através do módulo termoeletrico pode ser calculada através da lei de Fourier, utilizando o valor de condutância térmica (k) obtido por Huang et al (2000), durante ensaios com um módulo de características similares ao utilizado no presente trabalho.

$$Q_M = k \Delta T_M \quad (3)$$

As Tab. (2) e (3) mostram os valores obtidos durante os testes.

Tabela 2. Resultados dos testes de UA – refrigerador TE.

| | $\Delta T_M (^{\circ}C)$ | $k (W/^{\circ}C)$ | $Q_M (W)$ | $P (W)$ | $Q_P (W)$ | $T_{INT} (^{\circ}C)$ | $T_{AMB} (^{\circ}C)$ | $UA (W/^{\circ}C)$ |
|-------------|--------------------------|-------------------|-----------|---------|-----------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| 21°C | 1,5 | 0,483 | 0,74 | 14,13 | 13,38 | 46,2 | 21,4 | 0,541 |
| 32°C | 1,7 | 0,483 | 0,85 | 15,69 | 14,84 | 56,7 | 31,5 | 0,590 |

Tabela 3. Resultados dos testes de UA – refrigerador CV.

| | $P (W)$ | $T_{INT} (^{\circ}C)$ | $T_{AMB} (^{\circ}C)$ | $UA (W/^{\circ}C)$ |
|-------------|---------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| 21°C | 18,64 | 46,2 | 21,7 | 0,764 |
| 32°C | 19,38 | 56,9 | 31,8 | 0,773 |

A exemplo de Silva (1998), percebe-se que a condutância térmica aumenta com o aumento da temperatura ambiente o que reflete o aumento da condutividade térmica do isolamento com a temperatura. Verifica-se também que o isolamento térmico do refrigerador TE é melhor que o do refrigerador CV.

5.2 Ensaio de abaixamento de temperatura

O ensaio de abaixamento de temperatura (“pull-down”), consiste no monitoramento das temperaturas e das variáveis de natureza elétrica (corrente, tensão e potência) desde a partida do sistema até a condição de regime permanente. Este ensaio tem entre seus objetivos a determinação do tempo necessário para que a temperatura média do ar no interior do gabinete atinja um nível de temperatura pré-estabelecido pela normalização pertinente.

O ensaio do sistema CV foi realizado com o termostato desligado para permitir a operação contínua do refrigerador até a condição de regime permanente. Como o refrigerador TE funciona continuamente, optou-se pela realização de testes nas condições de máxima (I_{\max}) e de mínima (I_{\min}) corrente de operação.

A Fig. (4) mostra os resultados obtidos com o refrigerador TE, nas duas condições limites de corrente e com uma temperatura ambiente de 21°C. Pode-se verificar que a corrente afeta drasticamente o desempenho do sistema, passando-se de um tempo de “pull-down” de 2h e 35 min para 5h e 48 min, quando a corrente é alterada do valor de I_{\max} para o valor de I_{\min} . Deve-se mencionar que o tempo de “pull-down” foi computado para uma temperatura média do ar no interior do gabinete de 5°C. Nas análises que se seguem o refrigerador TE está sempre sendo considerado na corrente máxima.

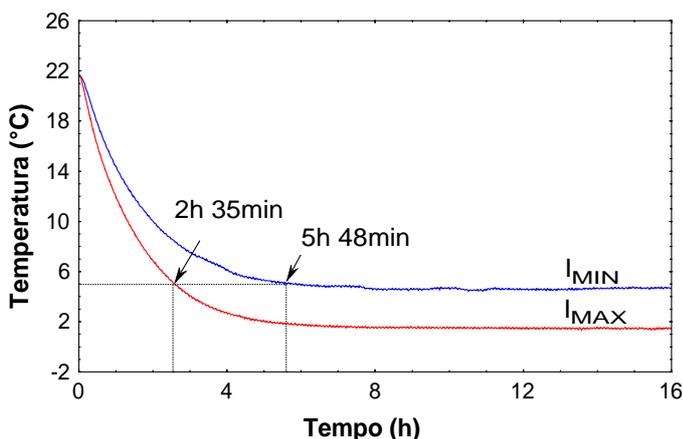


Figura 4. Tempo de “pull-down” para o refrigerador TE a 21°C

A Fig. (5) compara os tempos de “pull-down” a 21°C dos refrigeradores CV e TE. Verifica-se que o tempo de “pull-down” do refrigerador TE é aproximadamente 5 vezes maior que o do refrigerador CV, apesar do seu melhor nível de isolamento térmico (ver item anterior). Este fato está diretamente relacionado com a capacidade de refrigeração e com a inércia do sistema termoelétrico.

Uma comparação semelhante é mostrada na Fig. (6), mas para uma temperatura ambiente de 32°C. Pode-se perceber que o tempo de “pull-down” do refrigerador CV aumentou de 32,4 min para 51,0 min e que o refrigerador TE não atingiu a temperatura estabelecida de 5°C.

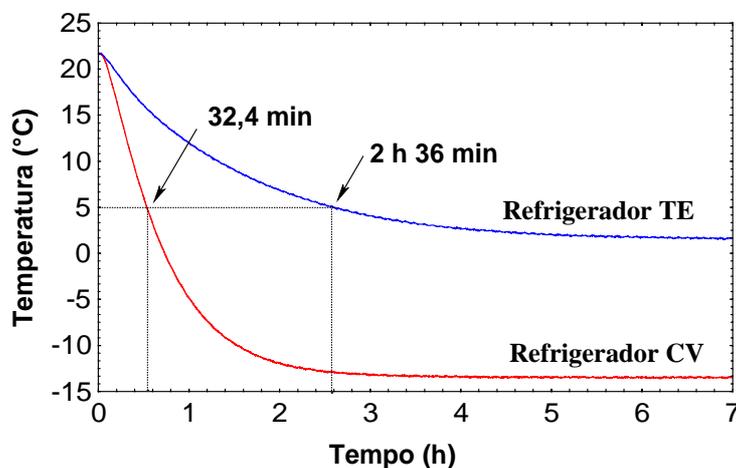


Figura 5. Tempo de Pull-Down a 21°C

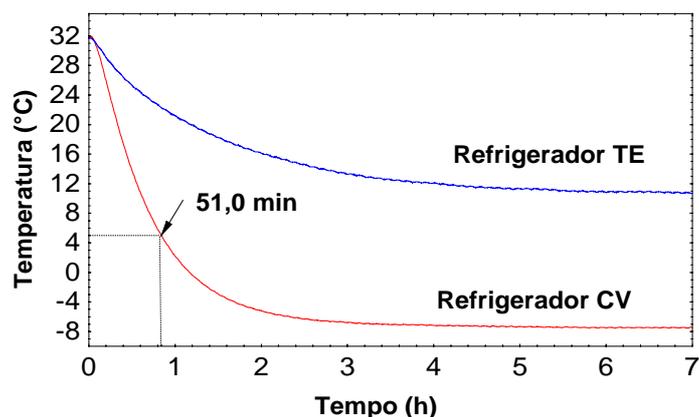


Figura 6. Tempo de Pull-Down a 32°C.

5.3 Ensaio de Consumo de Energia

O consumo de energia do refrigerador TE foi inferido a partir do teste de “pull-down”, já que a operação deste sistema é contínua. Neste caso, utilizou-se o valor médio da potência total consumida durante um período de 1 hora e em condições de regime permanente.

O consumo de energia do refrigerador CV foi determinado com base na especificação de uma temperatura de referência para o ar interno. Estabelecida esta temperatura, são então realizados 2 testes, um com uma temperatura superior e outro com uma temperatura inferior ao valor de referência. O consumo de energia na temperatura de referência é obtido através da interpolação dos valores obtidos nos dois testes.

A potência consumida em cada teste é dada pela integração da curva potência versus tempo, durante um período mínimo de funcionamento de 3 horas e em condições de regime permanente. Extrapolações são então realizadas para outros períodos de tempo.

Optou-se por não utilizar a temperatura de referência de 5°C, estipulada por norma, nas análises que se seguem. Tomou-se como referência o valor mínimo de temperatura obtido durante os testes de “pull-down” realizados com o refrigerador TE. Desta forma utilizou-se uma temperatura de referência de 1,5°C, para os testes na temperatura ambiente de 21°C. Nos testes de “pull-down” a 32°C a temperatura mínima atingida pelo refrigerador TE foi de 10,6°C, temperatura esta impossível de ser atingida pelo refrigerador CV. Desta forma as comparações de consumo de energia a 32°C foram realizadas com duas temperaturas de referência distintas, 5°C para o refrigerador CV e 10,6°C para o refrigerador TE. A Fig. (7) ilustra os resultados obtidos.

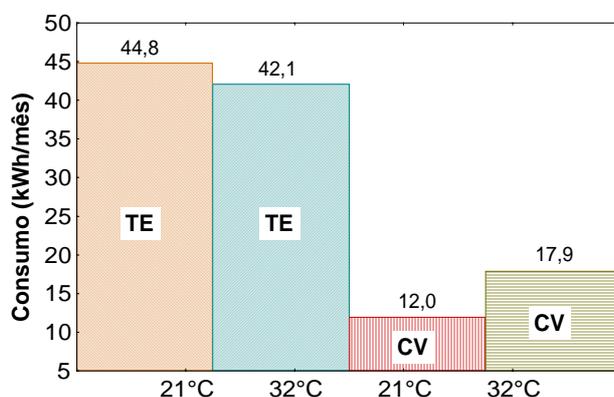


Figura 7. Consumo de energia dos refrigeradores TE e CV.

Uma breve inspeção da Fig. (7) deixa claro que o consumo de energia do refrigerador TE é bem superior ao do refrigerador CV, nas duas condições analisadas. Deve-se mencionar que o consumo de energia do refrigerador TE reflete o consumo total. Deste total o módulo termoeétrico responde por 75%, o conversor AC/DC por 22% e os ventiladores por 3%.

Os resultados anteriores permitem a determinação do coeficiente de performance (COP), através da seguinte expressão:

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}} = \frac{UA(T_{AMB} - T_{INT})}{\dot{W}} \quad (4)$$

onde \dot{Q}_E e \dot{W} representam respectivamente a capacidade de refrigeração e a potência consumida pelo refrigerador, ambas em condições de regime permanente.

A Fig. (8) mostra os resultados obtidos com os dois refrigeradores e nas duas condições ambientes. Deve-se mencionar que a temperatura média do ar no interior do gabinete foi tomada como a temperatura de referência dos testes de consumo de energia. No caso do refrigerador CV a potência consumida corresponde ao valor médio obtido durante um período de 3 horas.

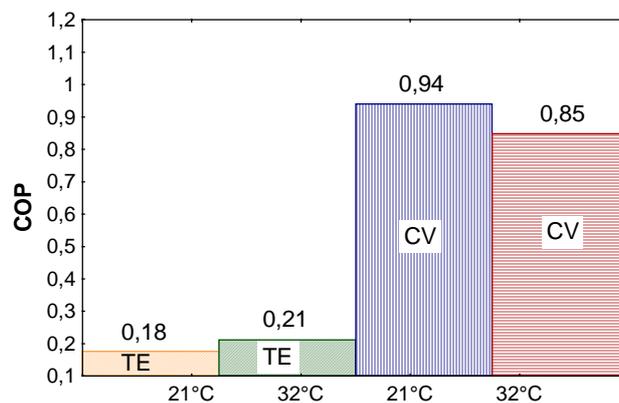


Figura 8. Coeficiente de performance dos refrigeradores TE e CV

Como pode ser observado na Fig. (8), o COP do refrigerador CV é bem superior ao do refrigerador TE. O baixo desempenho do refrigerador TE pode ser em parte ser atribuído à baixa eficiência dos trocadores utilizados para absorver e dissipar o calor das faces do módulo.

A Fig. (9) mostra que na temperatura ambiente de 32°C, o refrigerador TE gera uma diferença de temperatura entre a face quente do módulo e a temperatura ambiente ($T_H - T_{AMB}$) de 19,5°C o que corresponde a 42% da diferença de temperatura entre as faces do módulo ($T_H - T_C$). Quanto maior a diferença de temperatura entre as faces do módulo, maior a transferência de calor por condução da face quente para a face fria através dos termoelementos e portanto menor a capacidade de refrigeração.

5.4 Ensaio de intensidade sonora

Este ensaio foi realizado com o intuito de avaliar o nível de ruído emitido por cada refrigerador, tendo em vista a sua utilização na área de hotelaria e em dormitórios residenciais.

No início do ensaio os instrumentos de medição são calibrados através de uma fonte geradora de frequência. Após a calibração, o refrigerador é colocado no interior da câmara e na mesma posição da fonte geradora de frequência. Em seguida parte-se o sistema registrando-se a intensidade sonora através de microfones dispostos no interior da câmara.

O refrigerador CV foi testado em regime cíclico, com períodos ON de 15 min. e OFF de 5 min. Este procedimento foi adotado pois o refrigerador CV gera uma maior intensidade sonora na partida do compressor. O refrigerador TE foi testado com as correntes máxima e mínima com o intuito de se quantificar o impacto da rotação dos ventiladores sobre a intensidade sonora.

Verificou-se que o refrigerador TE gera uma intensidade sonora de 29,4 dB[A] e de 21,3 dB[A], respectivamente nas correntes máxima e mínima. Já o refrigerador CV apresentou uma intensidade sonora de 29,1 dB[A] na partida, valor este que se estabilizou em 23,81 dB[A] após 10min de teste. O ruído gerado pelo refrigerador CV foi, portanto, inferior ao gerado pelo refrigerador TE na corrente máxima. Este resultado, no mínimo inesperado, está provavelmente associado com os ventiladores que apresentavam um nítido problema de desbalanceamento.

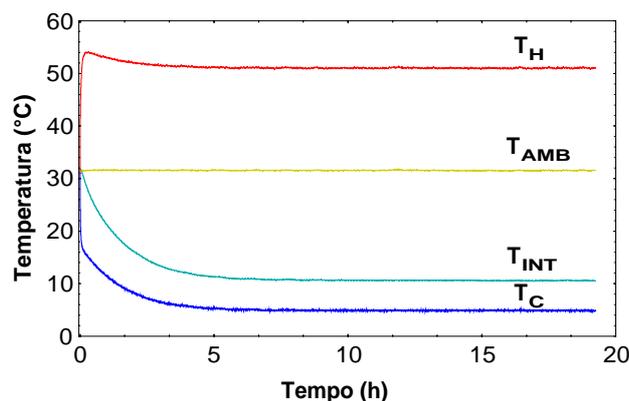


Figura 9. Níveis de temperatura ao longo do sistema.

6. CONCLUSÕES

Uma análise comparativa entre um refrigerador por compressão mecânica de vapor e um refrigerador termoelétrico do tipo ar-ar foi apresentada.

Através de testes de consumo de energia, de abaixamento de temperatura e de fluxo reverso, verificou-se que o refrigerador CV opera com um coeficiente de performance superior ao refrigerador TE, apesar de apresentar um menor nível de isolamento térmico. Observou-se também que o tempo de “pull-down” do refrigerador CV é consideravelmente menor que o do refrigerador TE. Testes realizados numa câmara reverberante mostraram que a intensidade sonora do refrigerador TE é menor do que a do refrigerador CV, apenas na condição de corrente mínima.

Estes resultados indicam que o refrigerador TE considerado no presente trabalho pode ser melhorado, principalmente no que tange a geração de ruído pelos ventiladores e a transferência de calor no dissipador.

7. REFERÊNCIAS

- Bansal, P. K., Martin A., 2000, “Comparative Study of Vapor Compression, Thermoelectric and Absorption Refrigerators”, International Journal of Energy Research, Vol 24, pp. 93-107.
- Batchelor, A. W., Mc Donald, D., Banney, B., Dawkins, S., 1998, “Enhanced Thermoelectric Refrigeration System COP, Through Low Thermal Resistance Liquid Heat Transfer System”, International Conference of Thermoelectric-ICT98, Nagoya, Japan.
- Huang, B. J., Duang, C. L., 2000, “System Dynamic Model and Temperature Control of a Thermoelectric Cooler”, International Journal of Refrigeration, Vol 23 n°, pp. 197-207.
- NTB 00119, 1992, “Isolação Térmica de Refrigeradores e Congeladores – Determinação do Fator UxA ”, Norma Técnica Brasmotor.

- NTB 00048, 1992, “Refrigeradores, Congeladores e Aparelhos Similares – Abaixamento de Temperatura ‘Pull-Down’ ”, Norma Técnica Brasmotor.
- ISO 7371, 1985, “Performance of Household Refrigerating Appliances-Refrigerators with or without Low Temperature Compartment”.
- Silva, L. W., 1998, “Caracterização da Transferência de Calor em Evaporadores Roll-Bond”, Dissertação de mestrado, Departamento de engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

COMPARATIVE ANALYSIS OF VAPOR COMPRESSION AND THERMOELECTRIC REFRIGERATORS

Públio Otávio Oliveira Duarte

Cláudio Melo

Federal University of Santa Catarina
Mechanical Engineering Department
NRVA – Center for Refrigeration, Ventilation and Air Conditioning Research
99040-900 - Florianópolis – SC.
E.mail: melo@nrva.ufsc.br

***Abstract.** This work investigates the performance characteristics of two household refrigerators of similar capacity, namely the vapor compression and the thermoelectric refrigerators. The analysis was based on energy consumption, pull-down, reverse heat loss rate and sound intensity tests results. It was found that the vapor compression refrigerator was more efficient and quieter than the thermoelectric refrigerator.*

***Keywords:** Refrigeration, Thermoelectric, Energy.*