



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA  
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING  
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil  
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

## CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE AQUECEDORES E REFRIGERADORES TERMOELÉTRICOS

Ricardo Nicolau Nassar Koury, koury@ufmg.br<sup>1</sup>

Luiz Machado, luizm@demec.ufmg.br<sup>2</sup>

Tiago Antunes Vieira de Menezes,<sup>3</sup>

Claudio de Oliveira Mendonca, com@ufmg.br<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> UFMG, Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP 31270-901

**Resumo:** A crescente preocupação com a preservação do meio-ambiente e a necessidade de se procurar fontes e equipamentos para compor a matriz energética de cada país levam a busca por alternativas técnicas inteligentes. Um dos ramos que busca a evolução é o da refrigeração e nela vem-se desenvolvendo uma tecnologia alternativa, a termoeletricidade. O efeito termoelétrico é dado pela transformação direta de energia térmica (diferença de temperatura) em energia elétrica e vice-versa. Os estudos desenvolvidos pelos cientistas Thomas Seebeck e Jean Charles Peltier comprovaram, no início do século XIX, que quando um par termoelétrico, inicialmente à mesma temperatura é alimentado por corrente contínua, uma diferença de temperatura é gerada nas junções sendo que uma delas se resfria e a outra se aquece. A evolução dos materiais e processos utilizados nesses refrigeradores, como por exemplo os semicondutores, aumentou a eficiência e melhorou a viabilidade desses sistemas. A escassez de trabalhos em língua portuguesa e a ausência deste tema nos currículos universitários evidenciam o pouco conhecimento que há nesta área no meio acadêmico em nosso país, o que motivou o desenvolvimento desse trabalho. O objetivo deste é realizar uma revisão bibliográfica sobre a utilização de módulos termoelétricos para refrigeração, projetar, construir e testar preliminarmente um protótipo de um refrigerador de pequeno porte. São apresentadas também informações referentes a um modelo numérico desenvolvido para simular o comportamento do protótipo. O plano de testes experimentais foi elaborado com base em metodologia proposta pela literatura e executado no Laboratório de Refrigeração do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. O protótipo projetado e construído tem 6460 cm<sup>3</sup> de volume e capacidade para aquecer 4 latas de refrigerante ou cerveja de 25°C até 5°C em 140 minutos por meio de um módulo termoelétrico com 72 J/s de potência (Calor Máximo). As principais conclusões alcançadas a partir dos resultados experimentais obtidos foram que as propriedades físicas conflitantes e inerentes ao fenômeno termoelétrico limitam o potencial desta tecnologia, mas avanços nas áreas de engenharia dos materiais e nanotecnologia prometem expandir o universo de aplicação da termoeletricidade, também devido a condicionantes físicas, o coeficiente de desempenho de um sistema termoelétrico sempre será melhor quando operando como aquecedor do que como refrigerador. A coerência entre as respostas fornecidas pelo modelo numérico elaborado neste trabalho e os resultados experimentais comprova a correção do algoritmo desenvolvido. As pequenas diferenças encontradas entre um e outro se devem à influência das variáveis desprezadas e as perturbações externas não consideradas no modelo. A viabilidade técnica do uso de refrigeradores termoelétricos ficou demonstrada com o protótipo desenvolvido.

**Palavras-chave:** refrigeradores; termoeletricidade; equipamentos não convencionais.

### 1. INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável assumiu notável importância a partir de meados do séc. XX quando o tema passou a ser discutido em diversos fóruns mundiais. A incidência de episódios climáticos severos tais como ciclones e furacões tornou-se mais freqüente e estudos mostraram que a temperatura média do planeta está subindo expondo um alarmante cenário batizado de aquecimento global.

Em 2001, o Brasil atravessou um episódio de crise energética que obrigou todos os consumidores a racionarem seu consumo de energia elétrica. Os investimentos para suprir a demanda de consumo não vêm sendo feitos há décadas. Com isso, o estudo de fontes de energias alternativas se acelerou e o interesse em equipamentos desta natureza, com baixo consumo energético e menos poluidores, assumiu importância especialmente nas residências.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, 22% do consumo total de energia elétrica no Brasil é utilizada pelo segmento residencial e, desta parte, a maioria é gasta com o aquecimento de água para banho [11]. Deve-se destacar que existe ainda a questão do horário de pico no consumo. O tradicional chuveiro elétrico, vilão no consumo doméstico, é acionado nas residências principalmente das 18h às 21h quando a indústria e o comércio ainda não encerraram as suas atividades e quando o consumo para iluminação de ambientes está no seu auge.

A geração de calor foi a base da civilização, o problema inverso, “a geração do frio”, foi domínio exclusivo da natureza até dois séculos atrás. Mas o ano de 1834, por uma dessas coincidências notáveis, guarda dois marcos importantes para a história da refrigeração. Nesse ano, o inventor americano Jacob Perkins, a partir do desenvolvimento de um compressor, pela primeira vez na história consegue fazer gelo artificialmente e dá início à indústria de refrigeração por compressão [1]. Também em 1834, o físico francês Jean Peltier, faz circular uma corrente por um termopar e consegue congelar uma gota d’água [2]. Descobria assim um efeito termoelétrico que mais tarde levaria seu nome.

Por anos inexplorado, foi a apenas 50 anos que a viabilidade prática de dispositivos refrigeradores baseados no efeito Peltier passou a ser considerada. Mas se esta última tecnologia vai conseguir tomar espaço da sua amplamente difundida “contemporânea”, a refrigeração por compressão de vapor, é uma questão que os laboratórios de pesquisa de materiais avançados terão a primazia de responder [3, 4].

O objetivo deste trabalho foi de projetar, construir e realizar testes experimentais preliminares em um protótipo de um refrigerador de pequeno porte para demonstrar esta tecnologia.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A termoeletricidade é o ramo da física que estuda a transformação direta de energia térmica em energia elétrica e vice-versa [3]. As bases dessa ciência foram lançadas no início do século XIX quando o físico alemão Thomas Johann Seebeck observou em seu laboratório em Berlim, a conversão de energia térmica em energia elétrica.

Hoje já se sabe que quando dois metais ou semicondutores de materiais diferentes são conectados e suas junções são mantidas em temperaturas diferentes, quatro fenômenos termoelétricos ocorrem simultaneamente: o efeito Seebeck, o efeito Peltier, o efeito Thomson e o efeito Volta [4]. Além desses, existe também o conhecido efeito Joule, que converte energia elétrica em energia térmica.

A aplicação científica e tecnológica dos efeitos termoelétricos é muito importante e sua utilização, no futuro, é cada vez mais promissora. Atualmente, pesquisadores buscam melhorar as propriedades termoelétricas de metais e semicondutores. Com isso, será técnica e economicamente viável a construção de dispositivos de geração de energia, bem como a produção de frio e calor para aplicações de larga escala, como por exemplo, a climatização de ambientes.

Em 1834, o relojoeiro e físico francês Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845) descobriu que, quando uma corrente elétrica flui pela junção de dois condutores de metais diferentes, calor é liberado ou absorvido pela junção. O sentido da corrente é quem determinará se a junção aquece ou resfria. Utilizando um par termoelétrico de antimônio e bismuto, Peltier conseguiu congelar uma gota de água .

A explicação teórica para o efeito Peltier é a seguinte: elétrons são acelerados ou desacelerados devido à diferença de potencial elétrico na junção dos dois metais. No primeiro caso, a energia cinética dos elétrons aumenta: o metal se aquece. No segundo caso, a energia cinética dos elétrons diminui: o metal se esfria. A Fig. 1 ilustra esse efeito:

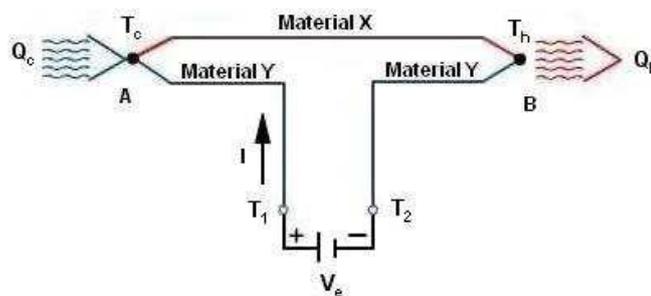


Figura 1. Efeito Peltier

O coeficiente de Peltier depende do material e da temperatura da junção sendo independente da forma ou dimensão de tais materiais. A quantidade de calor absorvida pela junção fria ou liberada pela junção quente pode ser expressa matematicamente por [10]:

$$Q = \pi_{AB} \cdot I \cdot t \tag{2.1}$$

$$\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B \tag{2.2}$$

onde:

$Q$ : quantidade de calor absorvida ou liberada (Joules);

$\pi_A$ : coeficiente de Peltier do material A (volts);

$\pi_B$ : coeficiente de Peltier do material B (volts);

$\pi_{AB}$ : coeficiente de Peltier entre o material A e o material B (volts);

$I$ : corrente elétrica que percorre o circuito (ampères);

$t$ : tempo que o circuito permanece ligado à fonte ( segundos).

## 2.1. Módulo Termoelétrico Moderno

O módulo termoelétrico moderno é um dispositivo compacto, capaz de gerar energia elétrica ou manter uma diferença de temperatura entre suas faces quando submetido a uma diferença de potencial. Eles são compostos de vários pares termoelétricos (semicondutores do tipo n e p) conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo, montados entre duas placas cerâmicas. Estas últimas formam o lado quente e frio do par termoelétrico. Sua configuração típica é mostrada na Figura 2 .

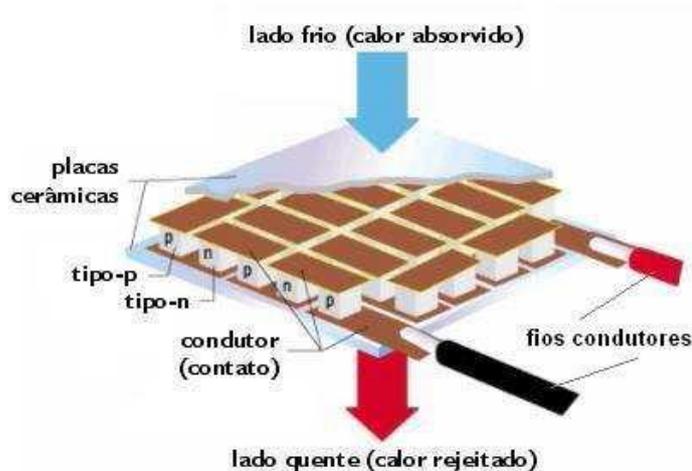


Figura 2 – Desenho de um módulo termoelétrico típico [5].

A qualidade de um material termoelétrico depende de três propriedades: o coeficiente de Seebeck ( $\alpha$ ), a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) e a condutividade térmica ( $\kappa$ ). A condutividade elétrica define a resistência interna de um dispositivo termoelétrico e o aquecimento provocado pelo efeito joule, enquanto a condutividade térmica responde pela quantidade de calor que passa através do dispositivo levando a uma diminuição na diferença da temperatura entre seus lados. Quantitativamente, a eficiência de um dispositivo termoelétrico depende do índice conhecido como “figura de mérito”, calculado conforme equação 2.3 [12].

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\kappa} \quad (2.3)$$

Onde:

$Z$  = Figura de mérito, em  $K^{-1}$ ;

$\alpha$  = Coeficiente de Seebeck, em V/K;

$\sigma$  = Condutividade elétrica, em S (siemens);

$\kappa$  = condutividade térmica, em W/m.K;

## 2.2. Vantagens e Desvantagens da Tecnologia Termoelétrica.

O uso de módulos termoelétricos é mais uma solução para o problema de controle de temperatura, sendo em alguns casos a única solução possível para algumas aplicações específicas, de pequenas ou moderadas potências. Assim como todo sistema de refrigeração, os módulos termoelétricos não serão aplicáveis em todas as situações, mas muitas vezes eles ofereceram vantagens substanciais sobre as alternativas

As principais vantagens da utilização de sistemas com esta tecnologia são: Poucas partes móveis; tamanhos e pesos reduzidos; controle preciso de temperatura; durabilidade; ausência de ruídos; capacidade de gerar energia elétrica (efeito Seebeck).

Entre as desvantagens deve-se salientar o alto custo dos módulos termoelétricos e o baixo rendimento. Outro inconveniente é a utilização de correntes contínuas de baixa tensão e alta corrente que acaba elevando os custos da instalação [10].

### 2.3. Aplicações do Módulo Termoelétrico

Os módulos termoeétricos vêm sendo utilizados em sistemas de refrigeração de pequeno porte e em geração de potência para componentes eletrônicos. Algumas aplicações mais sofisticadas são encontradas na indústria bélica e aeroespacial. A utilização deste sistema para o aquecimento é pouco difundida.

As principais vantagens da utilização de sistemas com esta tecnologia são: Poucas partes móveis; tamanhos e pesos reduzidos; controle preciso de temperatura; durabilidade; ausência de ruídos; capacidade de gerar energia elétrica (efeito Seebeck).

Interessante observar que, apesar da importância de mecanismos alternativos para bombas de calor, não existem muitos trabalhos publicados sobre a utilização dessas para aquecimento de água residencial.

### 3. METODOLOGIA

Após esta revisão bibliográfica a respeito da termoeletricidade, como já havia sido proposto foi desenvolvido um protótipo que fizesse uso desta tecnologia.

A partir de algumas idéias, projetou e construiu-se uma mini-geladeira termoeétrica. As características desejáveis que nortearam o desenvolvimento deste projeto foram a portabilidade, a capacidade de funcionar alimentada pela bateria de um automóvel e a capacidade de gelar quatro latinhas de cerveja num tempo comparável ao de uma geladeira doméstica convencional.

Vale esclarecer que neste primeiro estágio do projeto, a eficiência não foi um objetivo primordial do projeto exatamente pelo tipo de uso imaginado para este produto, que deverá ser eventual, no campo, independente da rede elétrica e alimentado por uma fonte facilmente recarregável. Ele não foi concebido para concorrer comercialmente com a geladeira, mas para atender uma necessidade aonde esta não pode ou não é conveniente ser utilizada.

O esboço do protótipo pode ser visto na fig.3.

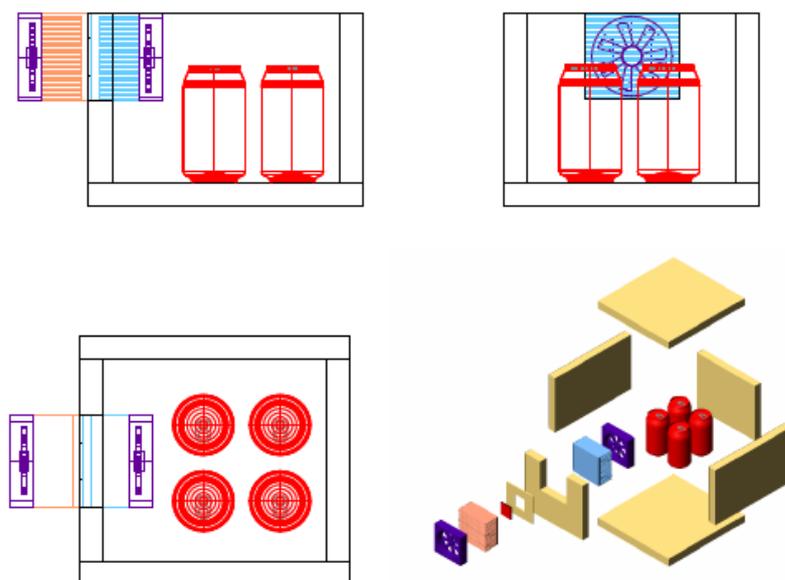


Figura 3. Esboço do protótipo do mini-refrigerador.

#### 3.1. Materiais

Na busca de um projeto que garantisse as necessidades convenientes, uma escolha consciente dos materiais foi realizada, dissipadores, isolantes térmicos e o módulo termoeétrico foram escolhidos. Observou-se também as limitações do orçamento disponível para o projeto durante as decisões.

Para o dissipador térmico foi escolhido um cooler de computador. Nos computadores, estes equipamentos são responsáveis por manter o processador operando a uma temperatura segura. Eles são capazes de atender aos exigentes requisitos térmicos de um processador moderno, como o AMD Athlon 64 X2 6000+, por exemplo, que dissipa 125 watts e não deve ultrapassar 63°C quando em funcionamento [7]. Estes coolers apresentam ainda como vantagens o fato de serem dispositivos silenciosos, confiáveis, capazes de funcionar ininterruptamente e com uma longa vida de utilização. Além disso, estão disponíveis em muitas variedades, são facilmente encontráveis e substituíveis e ainda são baratos.

Para atender aos requisitos o material para o isolamento térmico escolhido foi a espuma rígida de poliisocianurato (poliuretano). Sua principal característica é a baixa condutividade térmica que é de 0,021 W/m.K, de acordo com informação do fabricante. Este valor é inferior ao do poliestireno expandido (ou isopor, 0,031 W/m.K), largamente utilizado como isolamento térmico e que foi a outra opção avaliada. Outra característica interessante para este projeto é sua baixa densidade, de cerca de 47 Kg/m<sup>3</sup>, conforme se aferiu por medição. Como desvantagem, tem-se o fato de que a espuma de poliuretano é um material poroso, pouco resistente à abrasão, desprendendo facilmente pequenas partículas, e por isso sendo desagradável ao tato e impróprio para o contato com alimentos, além de não aderir a colas e adesivos. Para contornar este problema e viabilizar seu uso, ela deverá ser revestida por outro material.

Por conveniência, também foi adquirida uma pequena caixa térmica de isopor, utilizada na fase inicial dos testes com o protótipo. Seu comprimento, largura e altura interna são 250 x 170 x 152 milímetros e externas são 285 x 205 x 195 milímetros, nesta ordem. Posteriormente, foi construída uma caixa externa a esta, com a espuma de poliuretano, aumentando-se assim a resistência térmica do conjunto.

Uma análise mais detalhada do projeto e da escolha dos materiais pode ser encontrada no trabalho completo [9]. Para a escolha do módulo termoeletrico foi feito um cálculo da carga térmica do sistema.

### 3.2. Modelo Matemático

Após a definição dos requisitos desejáveis ao protótipo e conhecidas as características dos outros componentes, o próximo passo foi o cálculo da carga térmica a ser removida pelo sistema de refrigeração na condição de regime permanente.

Neste cálculo, considerou-se que o mini-refrigerador se encontra abrigado da radiação solar e o ar está calmo, sem vento. A temperatura ambiente foi considerada como sendo de 30°C e a temperatura do ar interno igual a 0°C. As trocas de calor por radiação foram desprezadas.

Dessa forma, a carga térmica no sistema pode ser caracterizada como sendo de dois tipos: uma de natureza parasita, representada pelo calor transferido do ambiente para a caixa térmica (Q); e outra de natureza ativa, representada pela geração de calor do motor elétrico do cooler (Q<sub>col</sub>). Baseando-se na referência [6], avaliou-se a contribuição de cada uma delas.

Os valores de calor recebido pelo ar interno do ambiente foram calculados de acordo com as relações de transferência de calor [6] tendo como resultado um valor de 9,7 W, já o calor gerado pelo motor elétrico foi calculado através do conhecimento da potência elétrica e da eficiência do mesmo e representa um valor de 1,64 W. Os cálculos detalhados podem ser encontrados no trabalho completo [9].

Por fim, a carga térmica total será obtida da soma das duas parcelas calculadas anteriormente. Tem-se então:

$$Q + Q_{col} = 9,7 + 1,64 = 11,3W$$

### 3.3. Módulo Termoeletrico

De acordo com os cálculos desenvolvidos no item 3.2, pode-se escolher o módulo termoeletrico capaz de se adequar às condições pretendidas. Na Tabela 3.3 são apresentadas as principais características do módulo termoeletrico escolhido.

Grandeza	Valor	Unidade
Pares termoeletricos	127	adimensional
Massa	25	gramas
Dimensões	39 x 39 x 3,5	milímetros
Tensão máxima (V <sub>max</sub> )	15,4	volts
Corrente máxima (I <sub>max</sub> )	8	ampères
Remoção máxima de calor (Q <sub>max</sub> , quando ΔT=0)	72,0	watts
Diferença máxima de temperatura (dT <sub>max</sub> , quando Q=0)	68	° C
Resistência elétrica	1,6	ohms

Tabela 3.3 - Características do Módulo Termoeletrico utilizado [8].

### 3.4. Planejamento dos Testes Experimentais

Durante os ensaios, os equipamentos utilizados foram um cronômetro digital, um termomedidor com mostrador digital com resolução de 0,1°C e dois termopares tipo J, uma fonte regulável, capaz de fornecer corrente contínua com tensão variando entre 0 e 30 volts e corrente entre 0 e 6 ampères, dotada de um mostrador digital com

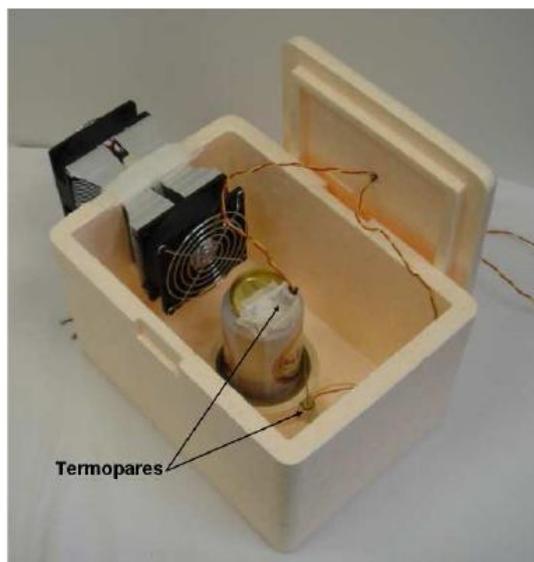
resolução de 0,01 ampère e 0,1 volt, uma fonte de corrente contínua de computador de 250W e saídas nominais de 5V e 12V e uma bateria automotiva de 12V e 40 ampère-hora.

Os ensaios foram realizados em ambiente fechado, abrigado da radiação solar, de correntes de ar e de outras fontes de calor e radiação. A temperatura ambiente não era controlada, mas variava pouco durante o tempo de realização dos ensaios. Na média, oscilou em torno de 25°C.

O intervalo de medições não era constante, variando conforme as condições do ensaio. Quando as variações de temperatura eram rápidas, as leituras eram mais frequentes, a fim de se registrar pontos suficientes para traçar o correto contorno da curva. Houve casos em que o intervalo entre leituras foi de apenas quinze segundos. Por outro lado, quando se observava pequenas variações nas medidas este intervalo era aumentado, mas não excedia a dez minutos.

Em todos os ensaios, havia uma latinha de cerveja de 350 mililitros dentro do mini-refrigerador. Ela era posicionada em seu centro, a cerca de três centímetros da grade do ventilador. Um termopar era posicionado atrás dela, sendo responsável por medir a temperatura do ar interno. Sua ponta de medição ficava situada um pouco acima do topo da latinha, o suficiente para receber diretamente o ar soprado pelo cooler.

Parte dos ensaios foi realizada com a latinha vazia. Nestes, o outro termopar era utilizado para medir a temperatura ambiente. Nos ensaios em que a latinha estava cheia de água, este termopar era fixado em sua tampa, com a ponta de medição mergulhada no líquido e posicionada no centro da lata. Esta última configuração pode ser vista na Fig. 4.



**Figura 4 – Posicionamento dos Termopares.**

#### **4. RESULTADOS E ANÁLISES**

Antes da realização dos testes no protótipo construído era desejável ter uma referência, um padrão de comparação. Para tanto, executou-se um ensaio de resfriamento de uma latinha de cerveja contendo 350 mililitros de água em uma geladeira doméstica convencional.

As variáveis medidas foram a temperatura do ar interno da geladeira e a temperatura da água dentro da latinha. Antes de iniciar o ensaio, a geladeira se encontrava há mais de uma hora com a porta fechada e há no mínimo quatro horas sem o acréscimo ou retirada de qualquer produto em seu interior. Devido a isso, considerou-se que o ar interno e estes produtos estavam em equilíbrio térmico.

A porta só foi aberta para inserção da latinha instrumentada e do termopar responsável por medir a temperatura do ar interno. Eles foram colocados na mesma prateleira, lado a lado, numa operação que não demorou nem cinco segundos. Após isso, a porta da geladeira permaneceu fechada até o término das medições.

O ensaio durou 120 minutos. Neste tempo, a temperatura ambiente não sofreu grande variação, permanecendo em torno de 24,5°C. Foram realizadas 27 medições de temperatura em cada termopar.

Apresentam-se na Figura 6 os dados coletados neste ensaio.

Da análise dos dados coletados e do gráfico, destaca-se que a temperatura média do ar interno da geladeira foi de 5,1°C; a queda de temperatura da água em 120 minutos foi de 12,4°C e as mudanças abruptas da inclinação da curva da temperatura do ar interno, observadas aos 11, 50 70 e 105 minutos coincidem com os momentos de acionamento e desligamento do compressor da geladeira.

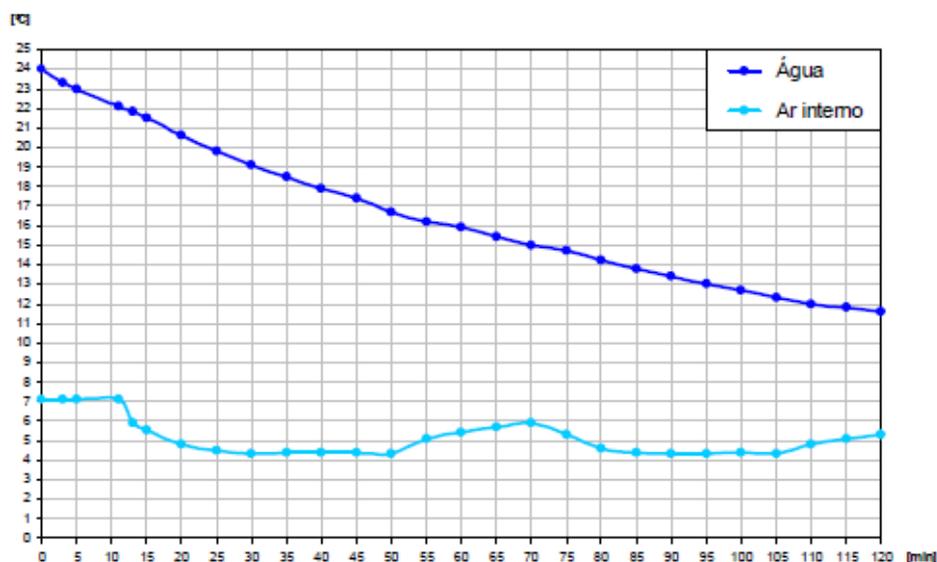


Figura 5 - Curva de resfriamento em geladeira doméstica convencional.

#### 4.1. Testes de Refrigeração com o Protótipo.

##### 4.1.1 Primeiro teste de Refrigeração

Os objetivos deste teste eram verificar o limite inferior de temperatura que poderia ser atingido para diferentes valores de corrente circulando pelo módulo. O produto sendo refrigerado era uma latinha contendo 350 mililitros de água.

Primeiramente foi realizado o teste com a geladeira sendo composta apenas pela caixa térmica, o cooler interno foi mantido funcionando sob uma tensão de 5 volts e o externo operava sob 11 volts. Iniciou-se o teste com uma corrente constante de 2A, que foi elevada posteriormente para 3, 4 e 5 ampères. O tempo total de ensaio foi 140 minutos. A temperatura ambiente inicial era 25,6°C e a final era 24,6°C.

Com o intuito de melhorar o desempenho do refrigerador termoelétrico, construiu-se uma cobertura externa de poliuretano sobre a caixa térmica anterior, aumentando-se o isolamento térmico. Com essa medida, haveria menos calor infiltrando do ambiente para o interior da câmara refrigerada. Esperava-se assim, conseguir atingir menores temperaturas e em menos tempo. Feito essa, melhoria o mesmo teste foi feito e os resultados encontrados foram comparados.

Na segunda configuração, os coolers interno e externo funcionaram sob a mesma configuração anterior; utilizou-se isolamento térmico duplo: uma camada interna de 16 milímetros de poliestireno envolvida por uma camada externa de 25 milímetros de poliuretano. A corrente circulando pelo módulo era de 4 ampères.

A Fig. 7 apresenta os dados coletados nos dois ensaios para comparação.

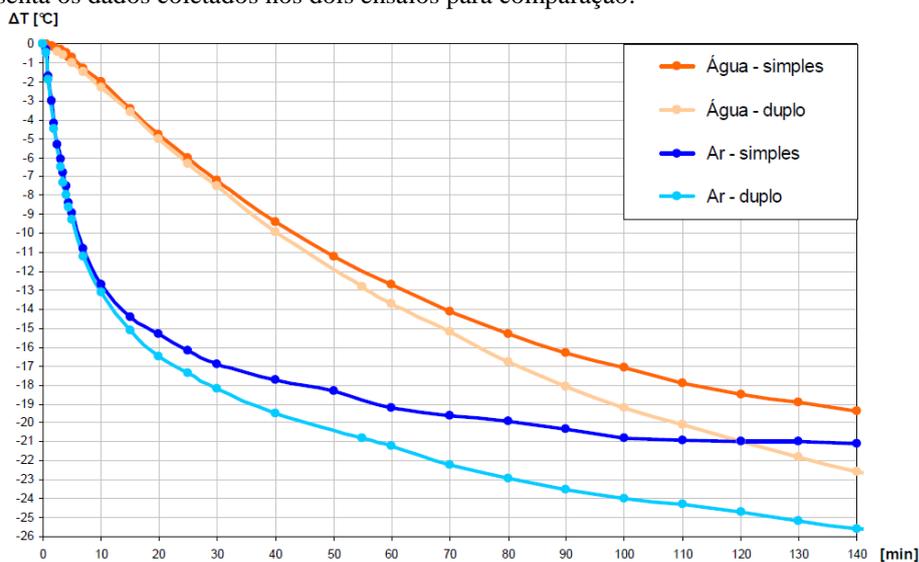


Figura 6 – Gráfico comparativo do resfriamento com isolamento simples x duplo.

#### 4.1.2 Segundo teste de Refrigeração

Sabe-se da teoria que a capacidade de transferência de calor de um módulo termoeletrico é inversamente proporcional à diferença de temperatura entre suas faces. Sabe-se também que quanto maior a quantidade de transferência de calor mais rápido se dará o resfriamento/aquecimento. Desta forma, é desejável que os coolers (dissipadores térmicos) do nosso protótipo tenham a menor resistência térmica possível, pois isso implicaria num menor gradiente de temperatura entre o fluido e a face do módulo para a mesma quantidade de calor transferida.

Uma forma de se aumentar a transferência de calor no cooler é aumentando sua vazão, o que é conseguido pelo aumento da tensão aplicada. O inconveniente disto é que também se aumenta o calor liberado pelo cooler por efeito joule e atrito. Portanto, existe um compromisso entre o ganho de transferência de calor pelo aumento da velocidade do cooler e a quantidade de calor extra produzida por ele.

A fim de verificar este comportamento e definir qual a configuração mais vantajosa, repetiu-se os primeiros 120 minutos do teste anterior (quando circulava pelo módulo uma corrente de 2 ampères) só variando a tensão aplicada no cooler interno, aumentada para 11 volts. O resultante desta comparação é apresentado na Fig. 8.

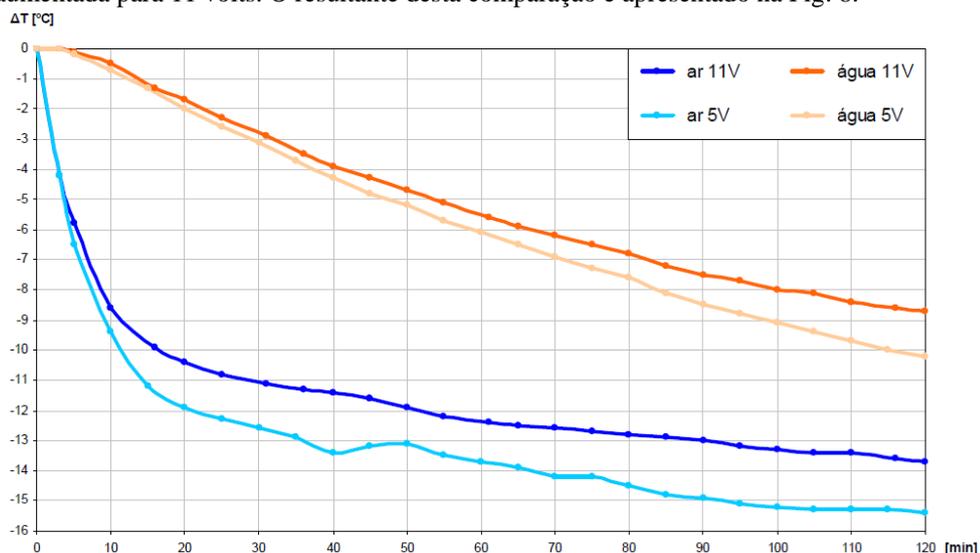


Figura 7 – Queda da temperatura para diferentes tensões no cooler.

Observando o gráfico, verificou-se que o resfriamento mais rápido foi obtido com o cooler interno funcionando sob uma tensão de 5 volts. Como isso contraria ao que seria esperado pela teoria de funcionamento do módulo termoeletrico, credita-se este resultado ao fato de que, para uma corrente de 2 ampères, o acréscimo de calor representado pelo aumento da potência no cooler (saltou de 0,23 para 1,36 watts) foi mais significativo do que o aumento da retirada de calor em decorrência da redução do gradiente de temperatura entre as faces do módulo.

## 5. MODELO MATEMÁTICO

Para melhor explorar as possibilidades oferecidas, pensou-se em desenvolver um modelo numérico do refrigerador que fosse capaz de nos fornecer a temperatura mínima em regime permanente e principalmente, o tempo que seria necessário para alcançá-la. Deveria também ser flexível o bastante para simular uma grande variedade de configurações, justamente por ser utilizado nesta fase em que poucas coisas estão definidas.

Desenvolveu-se então um modelo em linguagem MATLAB que considera as trocas de calor que acontecem no nosso sistema por condução, convecção e pelo efeito Peltier. Por simplificação, as trocas de calor por radiação não foram consideradas. De qualquer forma, devido às baixas diferenças de temperaturas envolvidas, seu efeito seria mesmo de pouca importância. Outra simplificação adotada é que o modelo não considera o calor latente, não devendo portanto ser utilizado em situações onde ocorra mudança de fase.

Ao fazer uma simulação, o usuário pode configurar uma série de variáveis de entrada, como temperaturas ambiente e do produto a ser refrigerado, características do cooler, do módulo termoeletrico e do isolamento térmico, dimensões do refrigerador, modo de operação, tempo de ensaio e tempo limite de processamento, entre outras. Como resposta, o programa apresenta três gráficos, todos em função do tempo: um de temperaturas, um das taxas de transferência de calor e outro da eficiência térmica do sistema.

Uma grande dificuldade no desenvolvimento deste modelo foi o cálculo dos coeficientes convectivos de transferência de calor entre a água e a latinha e entre esta e o ar interno, ambos de grande importância para uma simulação correta do sistema real. Não foram encontradas na literatura correlações que correspondessem adequadamente ao caso em estudo. Este problema foi contornado após os ensaios realizados com o protótipo

construído, que forneceu dados suficientes para calcular o coeficiente global de troca de calor, síntese desses dois parâmetros que faltavam. Uma vez configurado com os coeficientes corretos, o programa se mostrou capaz de fornecer respostas consistentes, muito próximas às obtidas experimentalmente, como pode ser observado na Fig. 9, em que os pontos destacados são os dados medidos experimentalmente e a linha contínua é o resultado da simulação numérica.

Maiores detalhes sobre o modelo podem ser encontrados no trabalho completo [9].

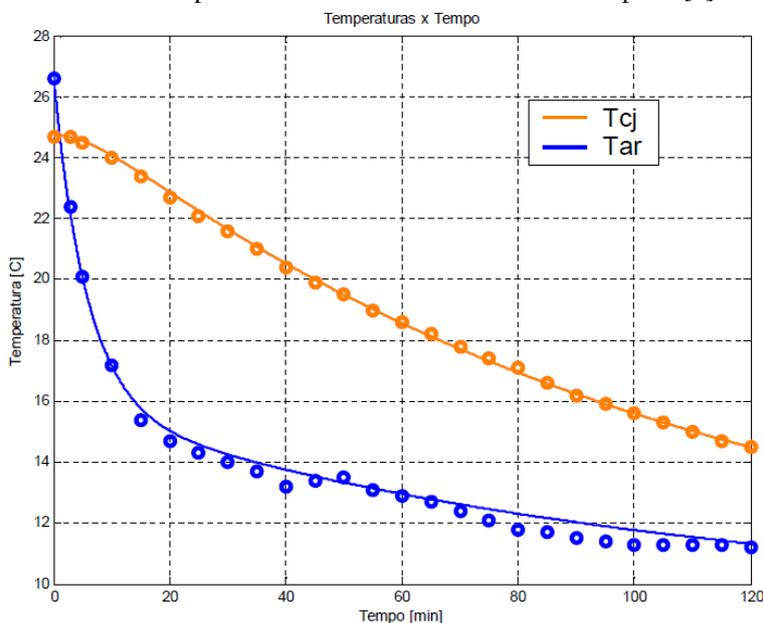


Figura 8 - Comparação entre modelo numérico e resultado experimental

A validação completa do modelo ainda prescinde da realização de ensaios complementares. Quando estiver devidamente validado, ele tornará possível simular uma variedade de condições de operação sem a necessidade de ter que efetuar os exaustivos e morosos testes reais. Poderá também ser utilizado para auxiliar no projeto de novos sistemas, ajudando na definição das especificações adequadas, explorando as configurações possíveis, antecipando a identificação de problemas e auxiliando na busca por soluções.

## 6. CONCLUSÃO

A análise do sistema de refrigeração termoelétrico montado indicou a existência de propriedades físicas conflitantes e inerentes ao fenômeno termoelétrico limitam o potencial desta tecnologia, mas avanços nas áreas de engenharia dos materiais e nanotecnologia prometem expandir o universo de aplicação da termoeletricidade.

Também devido a condicionantes físicas, o coeficiente de desempenho de um sistema termoelétrico sempre será melhor quando operando como aquecedor do que como refrigerador.

O projetista de um equipamento que faça uso da tecnologia termoelétrica não deve subestimar a importância da escolha correta dos dissipadores de calor e do dimensionamento do isolamento térmico.

O modelamento numérico facilitou muito o entendimento da interação dos componentes do protótipo desenvolvido. A capacidade de simular previamente o comportamento esperado do sistema é uma ferramenta muito valiosa na fase de projeto, pois permite a identificação antecipada de problemas, a comparação entre as soluções possíveis e a escolha pela melhor delas. A coerência entre as respostas fornecidas pelo modelo numérico e os resultados experimentais comprova a correção do algoritmo desenvolvido. As pequenas diferenças encontradas entre um e outro se devem à influência das variáveis desprezadas e as perturbações externas não consideradas no modelo.

A viabilidade técnica do uso de refrigeradores termoelétricos ficou bem demonstrada com o protótipo desenvolvido. Ele foi capaz, mesmo sendo operado abaixo de sua capacidade máxima, de refrigerar uma latinha com 350 mililitros de água a uma temperatura e tempo menores do que os obtidos com uma geladeira doméstica convencional.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VEJA – ESPECIAL DO MILÊNIO. **A mais fresca das invenções**. p. 66. Editora Abril.
- [2] NETTO, Luiz Ferraz. **Termoeletricidade (Inversor de Peltier)**. Disponível em: <[http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/12\\_08.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/12_08.asp)>. Acesso em: 12 nov. 2006.
- [3] WIKIPEDIA. **Termoeletricidade**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Termoeletricidade>>. Acesso em: 12 nov. 2006.

- [4] SALCAS. **Termometria**. p.8-11. Disponível em: <<http://www.salcas.com.br/catalogo/0-20Catalogo%20Geral.pdf>>. Acesso em 06 nov. 2006
- [5] **faq2.jpg**. Altura: 308 pixels. Largura: 418 pixels. 20,3 Kb. Formato JPEG. Disponível em: <<http://www.efeitopeltier.com.br/faq2.jpg>>. Acesso em: 13 nov. 2006
- [6] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Quinta Edição. Ed.LTC. 2003. p. 698
- [7] **Processor Electrical Specifications**. Disponível em: <<http://users.erols.com/chare/elec.htm>>. Acesso em: 02 jun. 2007
- [8] DANVIC EQUIPAMENTOS LTDA. **Datasheet DV-40-08**. Disponível em: <<http://www.efeitopeltier.com.br/files/dv-40-08.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2007
- [9] MENEZES, Thiago Antunes Vieira. Contribuição ao Estudo sobre a Viabilidade Técnica da Utilização de Aquecedores e Refrigeradores Termoelétricos. Trabalho de Graduação. DEMEC – UFMG, 2007.
- [10] COSTA, Ênio Cruz da. **Refrigeração**. 3a ed. Edgard Blucher Ltda, 1982. 322p. Cap. 7: Refrigeração Termoelétrica, p. 215-221.
- [11] PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Controle de Demanda. Disponível em <http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp>. Acesso em 06/04/2008.
- [12] DUARTE, Públio Otávio Oliveira; PRATA, Álvaro; MELO, Cláudio et al. **Determinação experimental das propriedades físicas e do coeficiente de performance de um módulo termoelétrico**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 3, 2004, Belém. Proceedings... Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2004. (CD-ROM).

#### DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.

## CONTRIBUTION TO THE STUDY ON TECHNICAL FEASIBILITY FOR THE USE OF THERMOELECTRIC HEATING AND REFRIGERATION

Ricardo Nicolau Nassar Koury, [koury@ufmg.br](mailto:koury@ufmg.br)<sup>1</sup>

Luiz Machado, [luizm@demec.ufmg.br](mailto:luizm@demec.ufmg.br)<sup>2</sup>

Tiago Antunes Vieira de Menezes,<sup>3</sup>

Claudio de Oliveira Mendonca, [com@ufmg.br](mailto:com@ufmg.br)<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> UFMG, Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP 31270-901

**Abstract.** *The growing concern about preserving the environment and the need to seek sources and equipments to set the future energy matrix of each country draw up a great necessity for searching intelligent and alternatives techniques. One of the branches that search evolution is refrigeration and it has developed an alternative technology, the thermoelectricity. The thermoelectric effect is given by the direct transformation of thermal energy (temperature difference) into electrical energy and vice versa. The studies carried out by scientists Thomas Seebeck and Jean Charles Peltier proved in the early nineteenth century, that when a thermocouple, initially at the same temperature is fed by direct current, a temperature difference is generated in the joints one of which cools while the other heats. The evolution of materials and processes used in those coolers, such as semiconductors, increased efficiency and improved the viability of these systems. The purpose of this is to do a literature review on the use of thermoelectric modules for cooling and to design, build and test a preliminary prototype of a small refrigerator. Are also presented information concerning a numerical model developed to simulate the behavior of the prototype. The experimental test plan was based on the methodology proposed by the literature and performed at the Refrigeration Laboratoire, Department of Mechanical Engineering, UFMG. The prototype designed and built is 6460 cm<sup>3</sup> in volume and heat capacity for 4 cans of soda or beer from 25 °C to 5 °C in 140 minutes with one thermoelectric module with 72 J/s power (Max Heat). The main findings from the experimental results obtained showed conflicting physical properties inherent in the thermoelectric phenomenon that limit the potential of this technology, but advances in engineering materials and nanotechnology promise to broaden the scope of thermal power, also because of physical constraints, the coefficient of performance of a thermoelectric system is always greater when operating as a heater than as a coolant. The consistency between the answers given by the numerical model developed in this paper and experimental results proves the correctness of the algorithm developed. The small differences found between them are due to the influence of the neglected and the external disturbances, not considered in the model. The technical feasibility of the use of thermoelectric coolers has been demonstrated with the prototype.*

**Keywords:** Refrigeration, thermoelectricity, Non-convencional equipments

