

## **PROJETO DE UM CONDICIONADOR DE AR AUTOMOTIVO PELTIER- SEEBECK AUTOSUSTENTÁVEL**

**José Rui Camargo, rui@unitau.br<sup>1</sup>**

**Maria Claudia Costa de Oliveira, maclau\_oliveira@hotmail.com<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>UNITAU – Universidade de Taubaté, Rua Daniel Danelli, s/ nº, Jardim Morumbi, Taubaté / SP

**Resumo:** Este trabalho tem por objetivo testar experimentalmente a viabilidade da utilização de módulos termoeletrônicos para condicionamento de ar automotivo utilizando como fonte de energia o calor dos gases de exaustão do motor. Sabe-se que os efeitos térmicos e elétricos são detectados em um circuito de dois materiais semicondutores, cujas junções estão em temperaturas diferentes. Esse fenômeno, denominado efeito Seebeck e efeito Peltier, podem ser utilizados para fornecer energia elétrica e refrigeração. De acordo com o efeito Peltier, se uma corrente passa por um termopar, a temperatura de uma junção aumenta enquanto a do outro diminui, de modo que o calor é transferido de uma face para a outra. A taxa de transferência de calor é proporcional à corrente elétrica e a direção da transferência é revertida se a corrente é invertida. Efeito Seebeck consiste na produção de energia elétrica entre dois semicondutores de junção de materiais diferentes quando estão sob diferentes temperaturas. Módulos termoeletrônicos são feitos de materiais semicondutores selados entre duas superfícies de material cerâmico, uma abrangendo a junta quente e outra que abrange a mais fria. Assim, este trabalho apresenta a concepção de um sistema de ar condicionado automotivo que utiliza ambos os efeitos, ou seja, os módulos termoeletrônicos são utilizados para refrigerar o interior do veículo e para fornecer a energia necessária para este arrefecimento. O gerador utiliza o calor residual dos gases de escape do motor para gerar energia para o condicionador. São apresentados os resultados experimentais de testes em protótipos desenvolvidos com o objetivo de avaliar a viabilidade do projeto e concluir sobre sua exequibilidade.

**Palavras-chave:** condicionamento de ar, efeito Seebeck, efeito Peltier, energia limpa.

### **1. INTRODUÇÃO**

Ultimamente muito se têm discutido sobre fontes de energia limpas e renováveis, neste contexto a energia proveniente dos fenômenos termoeletrônicos, através dos efeitos Seebeck e Peltier, surge como uma alternativa. Sabe-se há mais de um século que a reversibilidade térmica e os efeitos elétricos podem ser detectados em um circuito constituído de dois materiais semi-condutores de energia estando suas junções expostas a diferentes temperaturas. Existem inúmeras formas de se aproveitar o efeito termoeletrônico. As mais conhecidas e aplicadas são a geração de energia elétrica e a refrigeração.

Este trabalho apresenta um estudo preliminar visando a aplicação de módulos termoeletrônicos de forma sustentável para condicionamento de ar automotivo sendo que o projeto constitui-se no desenvolvimento de um protótipo de um condicionador de ar automotivo acionado pelo fenômeno Peltier-Seebeck que utiliza como energia o calor dissipado pelos gases de combustão do próprio veículo.

O protótipo experimental consiste em módulos termoeletrônicos acoplados a dissipadores de calor e montados dentro de dutos por onde fluem duas correntes de ar sendo que uma delas é resfriada e a outra aquecida e utiliza-se a corrente de ar frio para resfriar o interior de um veículo automotivo. A energia necessária para isso é obtida através de outros módulos termoeletrônicos acoplados ao cano de escapamento dos gases de exaustão do motor, que aproveitam o calor excedente transformando-o em potência elétrica.

Hoje em dia encontram-se diversas aplicações do sistema termoeletrônico em diferentes áreas, tais como: militar, aeroespacial, medicina, microeletrônica, sensores, dentre outros, porém o uso em dimensões maiores como o condicionamento ambiente e a conversão da energia presente na forma de calor em potência elétrica tem caráter inovador.

Alguns problemas vêm sendo encontrados para aplicação do sistema, como por exemplo, a especificação de um material capaz de dissipar o calor excessivo que pode vir a danificar a placa termoeletrônica e o projeto do circuito de controle de temperatura. Além disso, há uma dificuldade no desenvolvimento de novas tecnologias capazes de prover um melhor rendimento do sistema. Entretanto, esse assunto vem sendo pesquisado cada vez mais, apresentando perspectivas promissoras.

O Efeito Seebeck foi observado pela primeira vez pelo físico Thomas Johann Seebeck, em 1821 quando ele juntou dois fios de metais diferentes (fio de cobre e fio de bismuto) para formar um circuito. A junção era feita pela ligação dos dois fios entre si. Ele então descobriu que se ele aquecer um lado a uma temperatura elevada, e o outro permanecer a uma temperatura mais fria iria gerar um campo magnético ao redor do circuito de diferentes temperaturas. Ele não reconheceu que uma corrente elétrica estava sendo gerada quando o calor foi aplicado a um lado da junção dos dois metais. Ele usou o termo “corrente termomagnética” para manifestar a sua descoberta.

O Efeito Peltier baseia-se na teoria de que quando uma corrente elétrica é induzida através de uma junção entre dois semicondutores com propriedades diferentes, o calor em um dos lados é absorvido e do outro dissipado. Os módulos são feitos por materiais termoelétricos semicondutores, selados entre duas placas através do qual uma corrente contínua mantém uma face quente e a outra fria.

Os módulos termoelétricos são formados por materiais semicondutores, sendo mais utilizada a liga de Telureto de Bismuto, selados entre duas placas e conforme o sentido que a corrente flui uma placa torna-se aquecida e a outra resfriada. Um módulo termoelétrico é constituído de elementos semicondutores tipo p e n que são fortemente dopados com cargas elétricas. Os termopares são eletricamente ligados em série, mas termicamente em paralelo. Esse arranjo é então montado sobre dois substratos de cerâmica, um em cada lado dos elementos conforme pode ser observado na Fig. (1).

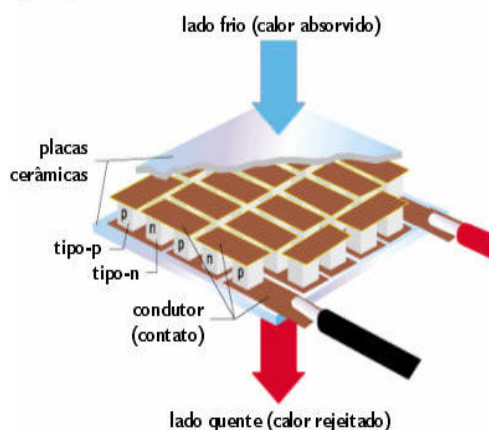


Figura 1. Constituição da placa termelétrica.

## 2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver, testar e analisar tecnicamente um condicionador de ar termelétrico automotivo autônomo, por meio do desenvolvimento de inovação tecnológica pela utilização efetiva de módulos termelétricos, comercialmente disponíveis, para geração de potência elétrica e para condicionamento de ar, otimização da utilização da energia térmica descartada para o ambiente, pelo seu reaproveitamento na geração de potência elétrica e energia térmica, obtenção de um equipamento tecnicamente e comercialmente viável, realização de um estudo metodológico efetivo e sistematizado visando a ampliação do nível de conhecimento a respeito da utilização dos efeitos Seebeck e Peltier em sistemas frigoríficos e de geração de energia elétrica, uma vez que a pesquisa neste campo, no Brasil, é pouco desenvolvida até o momento. Espera-se ampliar a pesquisa que já se encontra em desenvolvimento e analisar teoricamente o modelo proposto através da confecção de protótipos para ensaios, visando obter dados práticos para validar as estimativas teóricas.

## 3. MODELO MATEMÁTICO

Neste tópico apresentam-se as equações que permitem avaliar o desempenho de um refrigerador e de um gerador termelétrico.

### 3.1. Refrigerador Termelétrico

Os parâmetros mais importantes para a avaliação da eficiência de um processo de refrigeração termelétrico são: o coeficiente de desempenho ( $\phi$ ), também chamado (COP), a taxa de bombeamento de calor ( $Q_c$ ) e a máxima diferença de temperatura ( $\Delta T_{\text{máx}}$ ) que o dispositivo irá produzir. O coeficiente de desempenho  $\phi$  é definido por:

$$\varphi = \frac{Q_c}{P} \quad (1)$$

onde:  $Q_c$  é a taxa de bombeamento de calor a partir do lado frio e  $P$  é a energia elétrica consumida. A carga térmica é a taxa de bombeamento de calor a partir do lado frio e é dada por:

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (2)$$

onde:  $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck,  $T_c$  é a temperatura do lado frio do módulo termoeletrico,  $I$  é a corrente elétrica,  $R$  é a resistência elétrica ( $\Omega$ ).  $K$  é o total de condutância térmica do módulo termoeletrico de refrigeração e  $\Delta T$  é a diferença entre as temperaturas dos lados quente e fria ( $T_h - T_c$ ). O balanço energético dos resultados do resfriamento resultante será:

$$Q_c = \dot{m}_a C_p (T_i - T_o) \quad (3)$$

onde:  $\dot{m}_a$  é a massa de ar frio,  $C_p$  é o calor específico a pressão constante,  $T_i$  é a temperatura do ar de entrada e  $T_o$  é a temperatura do ar de saída. A potência requerida é:

$$P = V.I = \alpha.I.\Delta T + I^2.R = \frac{V(V - \alpha.\Delta T)}{R} \quad (4)$$

onde  $V$  é a tensão aplicada:

$$V = \alpha \Delta T + IR \quad (5)$$

### 3.2. Gerador Termelétrico

Os parâmetros mais importantes para um gerador de energia são a eficiência e a potência de saída. A eficiência é definida como a razão entre a potência de saída ( $P_o$ ) pela quantidade de calor na entrada ( $q_h$ ) da junção quente:

$$\eta = \frac{P_o}{q_h} \quad (6)$$

A potência na saída é a potência dissipada na carga. A quantidade de calor na entrada da junção quente é dada por:

$$q_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R + K \Delta T \quad (7)$$

onde:  $\alpha$  é o coeficiente Seebeck,  $T_h$  é a temperatura do lado quente do módulo termoeletrico,  $I$  é a corrente,  $R$  é a resistência elétrica ( $\Omega$ ),  $K$  é a condutância térmica do módulo termoeletrico e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre o lado quente e frio ( $T_h - T_c$ ). A potência elétrica na saída é:

$$P_o = I^2 R_L = V I \quad (8)$$

onde  $R_L$  é a resistência. A corrente é dada por:

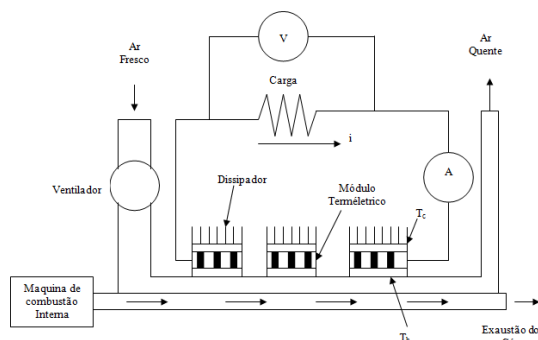
$$I = \frac{\alpha \Delta T}{(R + R_L)} \quad (9)$$

Uma vez que a tensão de circuito aberto é  $\alpha \Delta T$ , a eficiência é dada por:



## 4.2. Protótipo Experimental para o Gerador de Potência

Nesse protótipo pode-se monitorar as temperaturas dos lados quente e do lado frio dos módulos termoeletrônicos, as temperaturas de entrada, a tensão gerada pelo sistema, bem como a corrente na carga. Com esses dados é possível obter e analisar o desempenho do sistema, verificar a potência, a tensão e a corrente para maximizar o coeficiente de desempenho. As Fig. (5) e Fig. (6) ilustram o protótipo de geração de potência.



**Figura 5. Esquema de um sistema de geração termoeletrônica experimental, por conversão direta.**



**Figura 6. Módulo termoeletrônico e dissipador de calor acoplados no duto de exaustão de gases.**

Foi utilizado um motor 2 tempos modelo IntekT I/CR OHV, 10 HP, ilustrado pela Fig. (7), um dispositivo dissipador de calor, em alumínio, medindo (150 x 80 x 40) mm, 19 aletas e com espaçamento entre aletas de 2 mm, similares as apresentadas pela Fig. (2), um sistema de ventilação com potência e vazões ajustáveis e uma resistência de 50Ω, através da qual pode-se mensurar o valor da corrente elétrica e conseqüentemente da potência de saída do sistema.

A quantidade de módulos termoeletrônicos que serão aplicados ao sistema irá depender do valor da potência de saída designada no projeto. O sistema de ventilação se faz necessário, pois o módulo termoeletrônico possui um limite de temperatura no qual o mesmo pode estar submetido.

Nesse sistema é de suma importância o monitoramento da temperatura do lado quente, pois caso essa exceda o limite de temperatura do módulo termoeletrônico, esse poderá ser danificado, e para tanto, foi utilizado Termopares Tipo J – Sensor Termoelemento Fe-Co, modelo TE/AA.

Para verificação da velocidade do ar foi utilizado anemômetro modelo “Instrutherm TAFR-180 e para medição da corrente elétrica e tensão foram utilizados respectivamente multímetros Minipa ET-1502 e ET-2052.



**Figura 7. Máquina de combustão interna (Motor 10 HP).**

## 5. RESULTADOS

Com os dados obtidos através dos ensaios realizados com os protótipos descritos anteriormente, a fim de se avaliar a eficácia do sistema, e nesse tópico os resultados serão apresentados.

### 5.1. Resultados do Condicionador de Ar

O desempenho do dispositivo de ar condicionado termoeletrônico pode ser verificado nas Figs. (8) e (9). A Fig. (8) mostra o COP (coeficiente de desempenho) como função da diferença de temperatura ( $T_h - T_c$ ) (°C) e a Fig. (9) mostra a potência elétrica requerida como função de diferença de temperatura. Pode ser observado que o COP diminui quando a diferença temperatura aumenta. A potência requerida aumenta ao aumentar a diferença de temperatura.

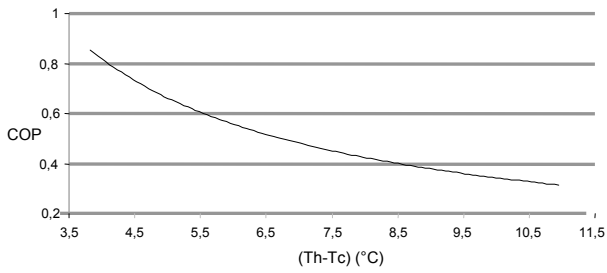


Figura 8. Coeficiente de desempenho em função de diferença de temperatura.

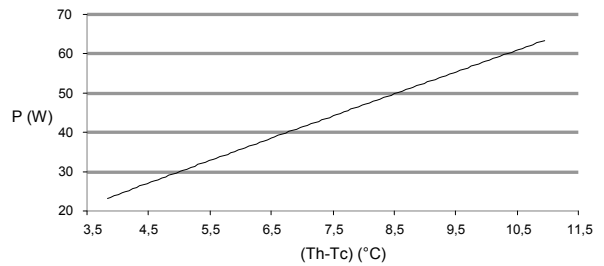


Figura 9. Potência consumida em função da diferença de temperatura.

### 5.2. Resultados do Gerador de Potência

A Fig. (10) apresenta os valores de tensão gerada sem carga ligada aos terminais do módulo, com controle da temperatura do lado frio (Tc) do módulo através do sistema de ventilação, o qual manteve a temperatura do lado frio o mais baixo possível. Para isso, foi acionado o ventilador que compõe esse sistema, o qual soprou ar fresco, mantendo a temperatura do lado frio baixa.

Já na Fig. (11) apresenta a tensão gerada com carga aplicada aos terminais, nessa situação a tensão obtida é menor que a encontrada no sistema sem carga, em virtude da queda de resistência. É importante ressaltar que em todos os ensaios realizados a faixa de variação da temperatura do lado quente do módulo (Th) foi a mesma, logo o ΔT se deu apenas em função da variação da temperatura do lado frio (Tc).

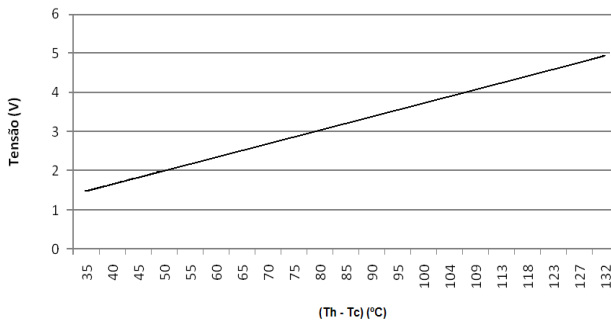


Figura 10. Tensão gerada sem carga.

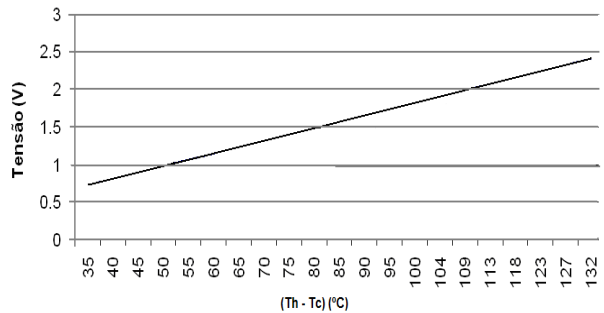


Figura 11. Tensão gerada com carga.

Uma das variáveis mais importantes nesse sistema é a potência elétrica que o sistema é capaz de fornecer à carga. Essa grandeza pode ser observada e analisada na Fig. (12), cujas informações comprovam a modelagem apresentada nesse trabalho, ou seja, quanto maior for a diferença de temperatura entre os lados da placa, maior será a potência elétrica que o sistema será capaz de fornecer à carga.

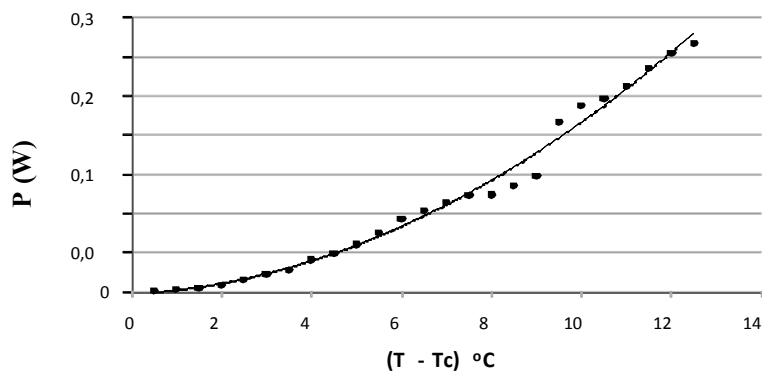


Figura 12. Potência de saída em relação à diferença de temperatura.



## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos dos testes permitem observar tanto o desempenho do condicionador de ar termoelétrico quanto do gerador de potência termoelétrico e concluir que os parâmetros mais importantes a serem considerados e monitorados são: a) no sistema de geração de energia termoelétrico, a temperatura do lado quente e do lado frio, e conseqüentemente a diferença entre elas, a tensão gerada e a potência elétrica do circuito, quando esse é submetido a uma carga e b) no sistema de condicionamento de ar, o coeficiente de desempenho e a diferença de temperatura obtida.

Porém, ainda existem alguns problemas que foram observados e devem ser resolvidos: deve-se procurar modelos mais eficientes para os dissipadores de calor, estudar outros modos de se promover o isolamento térmico dos módulos e minimizar a vibração a que os módulos são submetidos quando ligados ao cano de descarga do veículo.

Constata-se que o COP da refrigeração termoelétrica pode ser aumentado pela diminuição da diferença entre as temperaturas dos lados quente e frio, mas isso leva a uma menor taxa de calor transferido. A maximização do coeficiente de desempenho, para cada diferença de temperatura, pode ser feita pelo ajuste da tensão aplicada e melhores resultados do dispositivo termoelétrico de ar condicionado podem ser obtidos com o aumento do número de módulos termoelétricos, ligados em série e/ou em paralelo.

O desenvolvimento de novos materiais com grande potencial termoelétrico, coeficiente Seebeck e de tecnologia apropriada podem fazer um avanço em aplicações dos dispositivos termoelétricos neste campo. Conclui-se que a tecnologia estudada traz resultados promissores quanto ao objetivo almejado, porém mais pesquisas devem ser feitas para aperfeiçoar e viabilizar o sistema economicamente. Assim, pode-se afirmar que investimentos nesta tecnologia são desejáveis, por tratar-se de uma forma de energia limpa, uma vez que utiliza apenas o calor gerado por um determinado processo, não apresenta nenhum tipo de resíduo e não emite gases tóxicos.

## 7. REFERÊNCIAS

- Astrain, D., Viá, J. G., Domínguez M., 2003, "Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation". *Applied Thermal Engineering* 23, 2183-2200.
- Bojic, M., Savanovic, G., Trifunovic, N., Radovic, L., Saljic D., 1997, "Thermoelectric cooling of a train carriage by using a coldness-recovery device". *Energy*, vol.22, No. 5, p.493-500.
- Camargo, J. R., Oliveira, M.C.C., 2010, "Aplicação de módulos termelétricos para condicionamento de ar". In: VI Workshop Universidade - Empresa em Automação Industrial, Energia, Materiais e Processos, Produção. Taubaté, SP.
- Camargo, J. R., 1999, "Parâmetros básicos para avaliação da eficiência de um refrigerador que utiliza o sistema termelétrico". In: XIX Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência – XIX CBRAVIC. Campinas, SP.
- Camargo, J. R., Ebinuma, C. D., Silveira, J. L., 2003 "Thermoeconomic analysis of an evaporative desiccant air conditioning system". *Applied Thermal Engineering*, v.23, p.1537-1549.
- Camargo, J. R., Nogueira, E., 2004, "Thermoelectric cooling – state of art review". In: IX Encontro de Iniciação Científica e V Mostra de Pós-graduação, Universidade de Taubaté, Taubaté, SP.
- Camargo, J. R., Santos, L. P., Silva, J. M., Silva, R. E., 2009, "Experimental performance of a thermoelectric power generator. In: 8th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission", Ubatuba, SP. Book of Abstracts and proceedings of the VIII Latin- American Congress: Electricity generation and Transmission. São Paulo, SP : UNESP, v. 1
- Camargo, J. R. ; Silva, J. M., Silva, R. E., Santos, L. P., 2009, "Analysis and optimization of a thermoelectric cooling air system". In: 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Foz do Iguaçu, Brasil. Proceedings of the 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems.
- Chein, R., Huang, G., 2004, "Thermoelectric cooler application in electronic cooling". *Applied Thermal Engineering*; 24: 2207-217.
- Chen, J., Zhou, Y., Wang, H., Wang, J. T., 2002, "Comparison of the optimal performance of single-stage and two-stage thermoelectric refrigeration systems". *Applied Energy* 73, 285-298.
- Cheng, Y., Lin, W., 2005, "Geometric optimization of thermoelectric coolers in a confined volume using genetic algorithms". *Applied Thermal Engineering* 25, 2983-2997.
- Chih, W., 1995, "Analysis and waste-heat thermoelectric power generators".
- Dai, Y. J., Wang, R. Z., Ni, L., 2003, "Experimental investigation on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells". *Renewable Energy* 28, 949-959.
- Duang, C.L., Huang, B.J., 2000, "System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler". *International Journal of Refrigeration* 23, 197-207.
- Göktun, S., 1995, "Design considerations for a thermoelectric refrigerator". *Energy Conversion and Management*, Vol.36, No.12, p.1197-1200.

- Hansen, K., 2004, "Thermal performance of a 61-cell Si-drift detector module with thermoelectric cooler". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 517: 254-263.
- Heikes, R. R., Ure Jr, R. W., 1961, "Thermoelectricity: Science and Engineering". Interscience Publishers.
- Huang, B.J., Duang, C.L., 2000, "System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler". International Journal of Refrigeration; 23:197-207.
- Lindler, K. W., 1998, "Use of multi-stage cascades to improve performance of thermoelectric heat pumps". Energy Conversion and Management, vol. 39, No.10, p.1009-1014.
- Lingen, C., Fengrui, S., Chih, W., 2004, "Thermoelectric generator with linear phenomenological heat-transfer law".
- Lingen, C., Jianzheng, G., Fengrui, S., Chih, W., 2001, "Effect of heat transfer on the performance of thermoelectric generators".
- Lingen, C., Jun, L., Fengrui, S., Chih, W., 2005, "Performance optimization of a two-stage semiconductor thermoelectric generator".
- Luo, J., Chen, L., Sun, F., Wu, C., 2003, "Optimum allocation of heat transfer surface area for cooling load and COP optimization of a thermoelectric refrigerator". Energy Conversion and Management 44, 3197-3206.
- Khatthab, N.M., El Shenawy, E.T., 2005, "Optimal operation of thermoelectric cooler driven by solar thermoelectric generator".
- Oliveira, M. C. C., Camargo, J. R., 2008, "Aplicação de Módulos Termelétricos para Condicionamento de Ar. In: XIII Encontro de Iniciação Científica e IX Mostra de Pós-graduação, 2008, Taubaté, SP.
- Paghi, C. E., et al, 2001, "Um estudo sobre o circuito de detecção do efeito Seebeck no anemômetro a efeito Peltier". VII Workshop de Iberchip. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Laboratório de Circuitos Integrados.
- Santos, J. H., Camargo, J. R., 2008, "Aplicação de Módulos termelétricos para Geração de Potência". In: XIII Encontro de Iniciação Científica e IX Mostra de Pós-graduação, 2008, Taubaté, SP.
- Sofrata, H., 1996, "Heat rejection alternatives for thermoelectric refrigerators". Energy Conversion and Management, vol.37, No.3, p.269-280.
- Vasiliev, L.L., 2007, "Micro and miniature heat pipes – Electronic component coolers". Applied Thermal Engineering.

## **8. DIREITOS AUTORAIS**

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





**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**

## **DESIGN OF A SUSTAINABLE PELTIER-SEEBECK AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING SYSTEM-**

**José Rui Camargo, rui@unitau.br<sup>1</sup>**

**Maria Claudia Costa de Oliveira, maclau\_oliveira@hotmail.com<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> UNITAU – Universidade de Taubaté, Daniel Danelli street, Jardim Morumbi, Taubaté / SP

***Abstract.** The use of heat from automotive exhaust gases is studied in the present paper. It is known that thermal and electric effects are detected in a circuit of two semiconductor materials with their junctions at different temperatures. This phenomenon called Seebeck effect and Peltier effect, can be used to provide electric power and refrigeration. According to the Peltier effect, if a current passes through a thermocouple, the temperature of one junction increases and the temperature of the other decreases, so that heat is transferred from one junction to the other. The heat transfer rate is proportional to the electric current and the direction of transfer is reversed if the current is reversed. Seebeck effect consists in the production of an electric power between two semiconductors join of different materials when they are under different temperatures. Thermoelectric modules are made of semiconductors materials sealed between two surfaces of ceramic material, one covering the hot joins and the other covering the cold ones. This paper presents the design of an automotive air conditioning system that uses both effects, it means, thermoelectric modules are used to cool the vehicle's inside air and to provide the needed energy to this cooling. The generator uses the waste heat from the engines' exhaust gases to generate power to the cooler. There are presented the thermoelectric modules performance, available temperatures, air flow rates and other design characteristics. It is made the cooling system and the thermoelectric generator projects ad presented experimental performance data obtained from a prototype developed aiming to evaluate the feasibility f the project and it concluded that system is executable.*

**Keywords:** air conditioning, Seebeck effect, Peltier effect, clean energy.