



UTILIZAÇÃO DO EFEITO SEEBECK PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Deivid Pedroso Vieira¹

Jorge Ricardo Rizatki²

Resumo: Com a preocupação em diminuir a utilização de combustíveis fósseis e a redução do aquecimento global se vê a necessidade em melhorar a eficiência em máquinas de combustão interna. Com isso o trabalho teve como propósito, verificar o comportamento de alguns modelos de módulos termoelétricos e seus rendimentos objetivando a geração de energia elétrica em um automóvel através do efeito Seebeck. Os experimentos basearam-se em verificar qual o melhor ponto de colocação das pastilhas no sentido de garantir a obtenção da maior diferença de temperatura entre os dois lados do módulo, conseguindo assim a maior potência possível. Foram testados três modelos de módulos termoelétricos em uma bancada, construída para simular um escapamento no lado quente, e com um sistema de refrigeração a água na parte fria do módulo termoelétrico, mantendo assim uma diferença de temperatura, relativamente constante, entre os dois lados dos módulos. Foram feitas leituras das tensões e correntes na saída de cada pastilha, e posteriormente analisados os resultados e plotados gráficos com a variação de potência, tensão e corrente obtidos no ensaio. Com os dados obtidos foi analisado a área necessária para a geração de energia em um automóvel e sua viabilidade para uma eventual substituição da energia gerada pelo alternador do automóvel. A solução de eliminar um gerador mecânico e aumentar a eficiência do motor a combustão interna mostrou-se inviável em função do baixo desempenho das pastilhas analisadas. Os resultados experimentais foram comparados com outros trabalhos e os resultados analisados.

Palavras-chave: Gerador termoelétrico; Módulos termoelétricos; Efeito Seebeck.

1 INTRODUÇÃO

A questão energética vem sendo discutida em diversos países, tendo como preocupação diminuir a utilização de combustíveis fósseis e a redução do aquecimento global, com isso a crescente necessidade de uma melhor eficiência em máquinas de combustão interna, a fim de reduzir a poluição e obter um melhor aproveitamento de energia, torna-se muito importante desenvolver estudos mais detalhados, a fim de maximizar sua eficiência e reduzir cada vez mais suas perdas, fazendo com que sua energia seja melhor utilizada.

¹ Graduado em Engenharia Mecânica, Faculdade Satc. E-mail: deivid@hotmail.com

² Professor Faculdade Satc. E-mail: jorge.rzatki@satc.edu.br



Apesar das máquinas de combustão interna atualmente possuírem uma tecnologia bastante avançada, percebe-se que sua eficiência é bastante baixa devido a três principais fatores: a grande troca térmica entre fluidos e componentes; os atritos gerados internamente no motor; e a entalpia gerada no escape dos gases. Em um automóvel, por exemplo, sua eficiência gira em torno de 25 % a 30 % dependendo do combustível, os outros 65 % a 70 % são perdas, e as maiores perdas são aproximadamente 30 % em troca térmica e 32 % na entalpia dos gases do escapamento (CARVALHO, 2011).

Para o aumento dessa eficiência nas máquinas de combustão interna, são estudadas diversas maneiras de aproveitamento de energia, e uma delas seria a utilização da diferença de temperatura para gerar um potencial elétrico, sem a presença de geradores de energia com partes moveis, esse fenômeno de geração de energia é conhecido como efeito Seebeck.

O presente trabalho se faz com intuito da melhoria da eficiência das máquinas de combustão interna, através do aproveitamento de energia térmica gerada no escapamento pelos gases da combustão e a transformando em energia elétrica. Essa energia térmica descartada será adquirida com auxílio de módulos termoelétricos que utilizam o efeito Seebeck como princípio de funcionamento. O trabalho também tem o objetivo de ampliar estudos na área de geração de energia alternativa e limpa, afim de reduzir a poluição e suprir a demanda energética que está em constante crescimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos seguintes tópicos serão levantadas as mais relevantes informações que venham a acrescentar para a realização do trabalho. Os tópicos serão descritos da seguinte forma: Efeito Seebeck, módulos termoelétricos, Transferência de calor e estudos correlatos.

2.1 EFEITO SEEBECK

O efeito Seebeck foi descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1821, quando acidentalmente colocou dois condutores diferentes unidos em suas extremidades e colocado a uma diferença de temperatura entre estas extremidades,

fazia uma agulha que estava no entre os condutores se deslocasse. Thomas Seebeck publicou seus resultados dizendo que condutores ou semicondutores diferentes unidos em suas extremidades e submetido a uma diferença de temperatura entre elas produzem tensão (CAVALCANTI, 1997).

Segundo Santos (2010), ao aquecermos um lado da junção a energia térmica é recebida pelo lado quente ocasionando o movimento dos elétrons livres para junção fria, se deslocando como se fossem um fluido através de uma substância devido a uma diferença de temperatura, esse fluxo tem a direção do material de maior temperatura para o de menor, como mostra a Fig. 1 e a diferença de potencial está relacionada com o tipo de material dos condutores e com a diferença de temperatura aplicada entre os condutores.

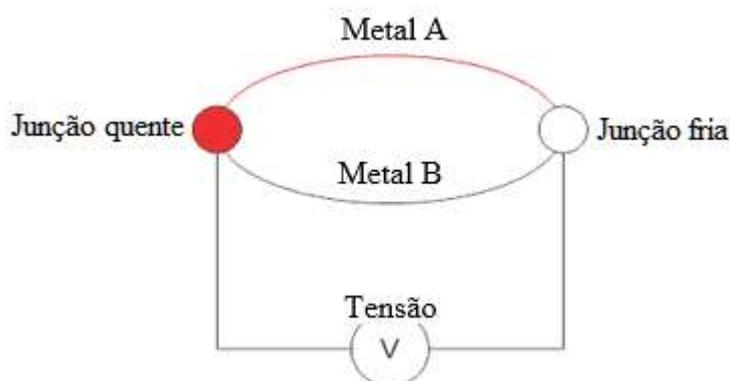


Figura 1: Efeito Seebeck
Fonte: Electrical4u (2017)

Conforme Ando (2014), um bom material termoelétrico tem um coeficiente de Seebeck (α) entre 100 mV/K e 300 mV/K, assim para atingir alguns volts, são necessários muitos pares termoelétricos ligados em série, e a diferença de potencial gerada é dada pela Eq. (1):

$$\Delta V = \alpha \times \Delta T \quad [V] \quad (1)$$

Onde:

$\Delta T [K]$: é a diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio.

$\alpha \left[\frac{V}{K} \right]$: é chamado de coeficiente de Seebeck, que depende de propriedades dos

materiais.

Em 1834, Jean Charles Peltier descobre outro efeito termoelétrico que é o inverso do Seebeck, chamado de efeito Peltier. Onde dois condutores ou

semicondutores distintos, unidos nas extremidades e submetido a uma tensão em circuito fechado, produzem uma diferença de temperatura entre suas junções. Numa junção ocorre o aquecimento enquanto a outra esfria (ALVES, 2008).

2.2 MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Segundo Afonso (2011), módulos termoelétricos utilizam o efeito de Seebeck como princípio de funcionamento, e tem objetivo de converter energia térmica em energia elétrica, através de uma diferença de temperatura, ou aquecimento e resfriamento através de uma diferença de potencial. Estes módulos são construídos com diversos conjuntos de elementos do tipo P, e do tipo N, conforme mostra a Fig. 2. Os conjuntos mais utilizados são de 7-31-71-127, e as placas cerâmicas possuem pistas de cobre que permitem unir os semicondutores eletricamente em série e termicamente em paralelo conforme a Fig. 2.

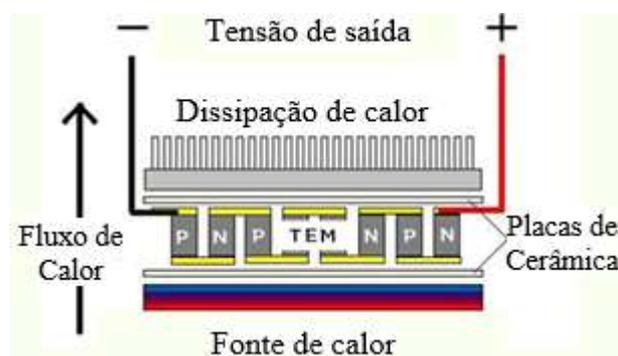


Figura 2: Junções de um módulo termoelétrico
Fonte: Tegpowe (2017)

De acordo com Santos (2010), estes módulos termoelétricos podem ter duas aplicações típicas distintas: 1) refrigeração e aquecimento, quando se aplica uma diferença de potencial no módulo termoelétrico, o calor é bombeado de um lado para outro formando um lado quente e outro frio. 2) produção de corrente elétrica, que quando mantida uma diferença de temperatura entre os dois lados e o fluxo de calor que atravessa é convertido em corrente elétrica.

Conforme Afonso (2011), existem vários fabricantes de módulos termoelétricos com diferentes características entre si, uns apresentam módulos com



menor resistência a temperatura que suportam 180 °C, já outros fabricantes possuem módulos que suportam temperaturas na ordem dos 320 °C.

Para obter um melhor rendimento dos módulos termoelétricos, as principais características que os materiais termoelétricos precisam ter são: elevado coeficiente de Seebeck (α), alta condutividade elétrica (σ) e baixa condutividade térmica (k), essas três características juntamente com (T) que seria a temperatura absoluta estabelecem a Figura de Mérito (ZT) dos módulos termoelétricos, expressa pela Eq. (2) (VALLURI *et al.*, 2014).

$$ZT = \left(\frac{\alpha^2 \times \sigma}{K} \right) \times T \quad (2)$$

Hendricks (2011), cita que os metais não possuem as características necessárias para uma elevada Figura de Mérito (ZT), e por esses motivos os módulos atuais raramente excedem o rendimento de 5%, mas algumas pesquisas levaram a descoberta de uma nova geração de materiais termoelétricos, estes materiais de baixa dimensão, conhecidos como nanofios serão alternativas para alcançar melhores Figuras de Mérito, a eficiência máxima nos módulos e dado pela Eq. (3), (FAIRBANKS, 2012).

$$\eta = \left[\frac{T_h - T_c}{T_h} \right] \times \left[\frac{(1 + ZT)^{1/2} - 1}{(1 + ZT)^{1/2} + \frac{T_c}{T_h}} \right] \quad (3)$$

Onde:

η [%]: Rendimento do módulo

T_h [K]: Temperatura lado quente do módulo.

T_c [K]: Temperatura lado frio do módulo.

ZT : Figura de Mérito



2.4 ESTUDOS CORRELATOS

Neste tópico serão obtidas informações sobre alguns estudos desenvolvidos para geração de energia através do calor, alguns resultados obtidos em outros estudos e novos materiais termoelétricos sendo desenvolvidos.

2.4.1 Utilização na indústria aeroespacial

O conhecimento das primeiras aplicações de módulos termoelétricos foi na sonda espacial Voyager I desenvolvida pela NASA, e atualmente existem diversas naves espaciais que utilizam esta tecnologia para geração de energia em missões espaciais, isto devido a necessidade de energia com simplicidade e baixo peso (ANDO, 2014).

Como as missões exigem o máximo de segurança e confiabilidade para longa duração de energia e do aquecimento da aeronave são utilizadas baterias nucleares que convertem calor em eletricidade, usam como fonte de calor a decomposição natural do plutônio radioativo-238, e o frio do espaço exterior como fonte fria (RITZ; PETERSON, 2004).

2.4.2 Utilização na indústria automotiva

Segundo Afonso (2011), no século XX foram desenvolvidos alguns geradores termoelétricos por marcas como a Porsche no modelo 944, Nissan Motors, e a Universidade de Clarkson em colaboração com a General Motors. A produção de energia elétrica nos geradores desenvolvidos por estas marcas está entre 30 W e 1 kW.

Em novembro de 2004 a BSST, equipe constituída por técnicos da BMW, começou o desenvolvimento de um gerador termoelétrico de produção de energia elétrica de elevada eficiência. Este sistema visava a redução do consumo de combustível através da redução de trabalho pelo alternador. O veículo usado para implementação de testes foi um BMW modelo 530i a gasolina 3.0, no qual os resultados foram uma economia de 10 % de consumo de combustível e uma capacidade de gerar energia de 1 kW (MARTINS *et al*, 2011)



Em 2008 a Volkswagen apresentou um veículo protótipo equipado com gerador termoelétrico capaz de gerar 600 W de energia elétrica através do calor do escape, com isto a marca conseguiu suprir 30 % da energia elétrica consumida pelo veículo, refletindo numa economia de 5 % no consumo de combustível (GREENCARCONGRESS, 2009).

Módulos termoelétricos construídos utilizando metade-Heusler e Bi₂Te₃ foram utilizados pela Ford afim de desenvolver também um gerador termoelétrico, que produzia uma potência de 500 W sendo testado no Ford Fusion 3.0 V6 (ENERGYHARVESTINGJOURNAL, 2011).

Em 2010 a General Motors implementou no modelo Suburban da Chevrolet um gerador termoelétrico desenvolvido pela empresa, com uma redução de 5 % no consumo de combustível e sem divulgarem a potência gerada. Uma inovação seria o modo como era implementado no escape do veículo o gerador, no tubo de escape apresentava uma bifurcação ao meio que levava os gases de escape para a zona do gerador. Nesta bifurcação existia uma válvula by-pass para limitar a passagem dos gases e controlar o calor (MARTINS *et al.*, 2011).

2.4.3 Utilização em aeronaves

Estudos da *Boeing research and technology* mostram que a utilização de módulos termoelétricos ainda é limitada devido à baixa eficiência e ao custo, porém análises preliminares comprovam que a redução do peso do avião com aplicação de módulos , é superior a 0,5 % de economia de combustível, onde nos Estados Unidos nos 4 primeiros meses de 2009 foram gastos 2,415 bilhões de dólares em combustíveis, e com a aplicação de módulos termoelétricos poderia se economizar 12,075 milhões de dólares por mês (HUANG, 2009).

2.4.4 Novos materiais termoelétricos

Em estudos mais avançados, o pesquisador europeu Wulf Glatz foi premiado por seu trabalho de micro geração termoelétrica. O processo também utiliza a diferença de temperatura em consequência do efeito Seebeck para gerar energia, e necessita de uma diferença de temperatura de aproximadamente 30 °C para recarregar um celular. Contribuindo para o estudo dos materiais termoelétricos, desenvolvendo um dispositivo pequeno, flexível e versátil, sem partes móveis, como

mostra a Fig. 3. Sua fabricação consiste em depositar material termoelétrico diretamente em uma folha plástica, e os custos são dez vezes menores que o do processo clássico (SWISSINFO, 2009).

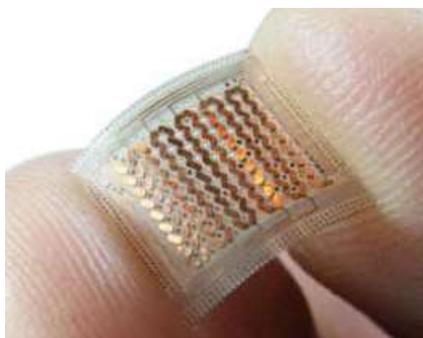


Figura 3: Protótipo de TEG flexível da greenTEG
Fonte: Swissinfo (2009)

Sua geração de potência pode alcançar duas vezes mais que a maior potência já verificada em outros dispositivos de mesmo princípio. Inicialmente, o produto não apresenta a possibilidade de transformar eletricidade em calor, conforme o efeito Peltier. A “GreenTEG” Fig. 3 que é o nome dado ao produto, resfria ambiente ao sequestrar o calor, contudo gerando energia ao invés de gastar (ANDO, 2014).

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Neste tópico, serão apresentados os procedimentos e métodos utilizados para obtenção dos dados, o local mais adequado para aplicação de geração de energia foi o escapamento devido a alguns módulos trabalharem em uma temperatura máxima de 300 °C, com a possibilidade da instalação de uma válvula de desvio de fluxo de calor para o controle de temperatura, pois quanto maior for a diferença de temperatura entre os dois lados do módulo maior será sua potência. Foi utilizado uma bancada para simular o funcionamento de um escapamento e todos os componentes necessários para a aplicação do efeito Seebeck, e posteriormente foram realizados ensaios na bancada e coletado os dados para analisar seus resultados.

3.1 MODELAMENTO SÓLIDO DO SISTEMA

Foi desenvolvido um projeto para a construção da bancada conforme a Fig. 4, de acordo com a necessidade do trabalho, para melhor avaliar seu funcionamento e custo de fabricação.

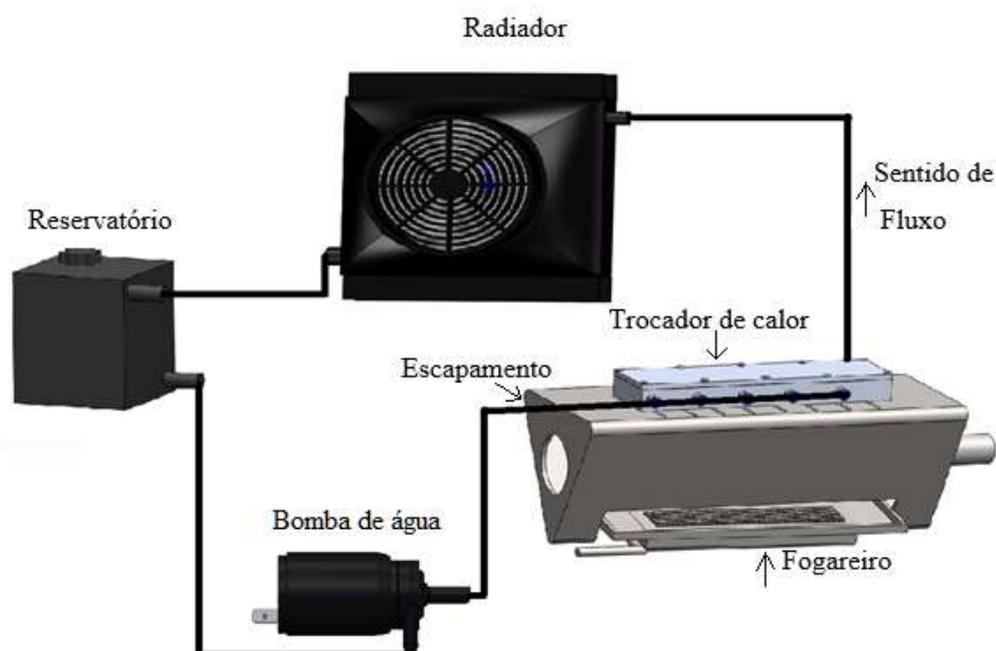


Figura 4: Modelamento da bancada de teste
Fonte: Do autor

A Fig. 4 mostra o projeto detalhado da bancada para testes, e seus principais componentes para a geração de energia através do efeito Seebeck.

3.2 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Para construção da bancada foram utilizados alguns materiais essenciais para seu funcionamento, com o intuito de melhor funcionamento e menor custo de aquisição sem comprometer os resultados.

3.2.1 Escapamento e fonte de calor

Como fonte de calor foi utilizado um escapamento usado de Automóvel (Chevrolet Astra) devido ao seu formato se adequar a aplicação na bancada. Com uma de suas faces cortada e soldada a uma chapa de aço SAE 1020 que, devido ao formato de fabricação, suas faces não serem planas, sendo assim não teria o assentamento ideal dos módulos termoelétricos. Como fonte de calor foi utilizado um fogareiro a gás com regulagem de fluxo para controlar a temperatura em função do seu baixo custo.

3.2.2 Reservatório, bomba e refrigeração

Para controlar o fluxo do fluido no sistema de refrigeração foi utilizada uma bomba de combustível de Automóvel (Corsa - GM) com aproximadamente 3 bar de pressão e uma vazão de 3 l/min. foram utilizados um total de 5 litros de fluido no sistema e reservatório, um radiador com ventilador de um sistema de ar-condicionado de janela para o arrefecimento da água que sai do trocador de calor. Estes elementos foram utilizados devido a facilidade de aquisição e baixo custo.

3.2.5 Módulos termoelétrico

Foram adquiridos 3 modelos diferentes de módulos termoelétricos com as características necessárias ao trabalho, para operarem em temperaturas de até 300 °C e com uma boa eficiência. Os modelos adquiridos são: SP1848, TEP1-142T300, TE-MOD-22W7V-56. O Qd. 1 apresenta alguns valores de suas respectivas especificações.

Quadro 1: Especificações dos módulos

Especificações	SP1848	142T300	22W7V-56
Temperatura do lado quente [°C]	300	300	300
Temperatura do lado frio [°C]	30	30	30
Tensão de saída sem carga [V]	9,8	17,7	14,4
Resistencia [Ω]	3,3	4,4	2,4
Tensão de saída com carga [V]	4,7	8,8	7,2
Corrente de saída [A]	1,5	2,0	3,0
Potência de saída [W]	7,5	17,6	21,6
Fluxo de calor através do modulo [W]	312	327	415
Densidade do fluxo de calor [$W \times cm^{-2}$]	9,6	10,4	13,2
Resistencia a corrente elétrica medida abaixo de 27 °C em 1000 Hz [Ω]	2,5	2,4	1,2
Dimensão [mm]	40x40x3,6	40x40x3,6	56x56x4

Fonte: Do autor

3.2.4 Trocador de calor

Foi desenvolvido um trocador de calor com as dimensões necessária para comportar de forma adequada os módulos termoelétricos sendo então realizado o desenho no software Solidworks, confeccionado em alumínio e usinado em um centro de usinagem. A Fig. 5 mostra o projeto detalhado do trocador de calor.

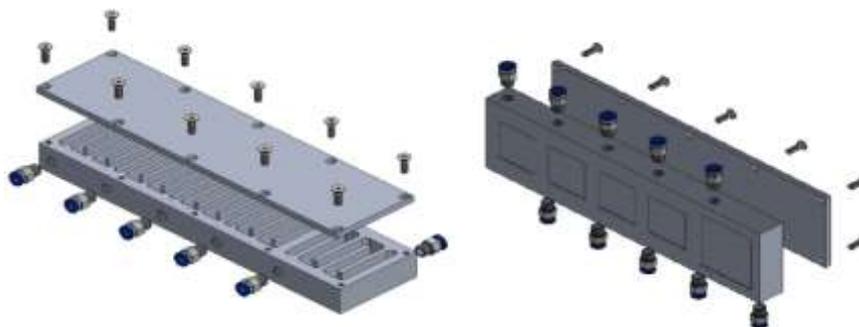


Figura 5: Projeto do trocador de calor
Fonte: Do autor

O trocador de calor tem capacidade para abrigar 5 módulos termoelétricos e os canais de água foram projetados para ter um percurso de tal forma a permitir uma menor variação de temperatura na superfície dos módulos

3.2.5 Instrumentação

Para medição de temperatura foram utilizados dois multímetros; GC-266, com termômetro tipo K modelo TP-01 e sensibilidade a 400 °C de $(0,75\% \pm 2,5\text{ }^\circ\text{C})$; um multímetro GC-226 para medir tensão e; um multímetro UNI-T UT30B para medir a corrente, conforme mostra a Fig. 6.



Figura 6: Aparelhos de instrumentação
Fonte: Do autor

3.3 MONTAGEM DA BANCADA

Após a aquisição dos materiais foi montada a bancada conforme o projeto, os módulos termoelétricos foram colocados sobre o escapamento com uma camada de pasta térmica entre eles, e sobre os módulos foi colocado o trocador de calor, também com uma camada de pasta térmica. Entre o trocador de calor e o escapamento, onde não há contato com os módulos, foi colocado um isolante térmico

(lã de vidro) para evitar a troca térmica entre o escapamento e o trocador de calor. A Fig. 7 mostra a montagem da bancada testes.

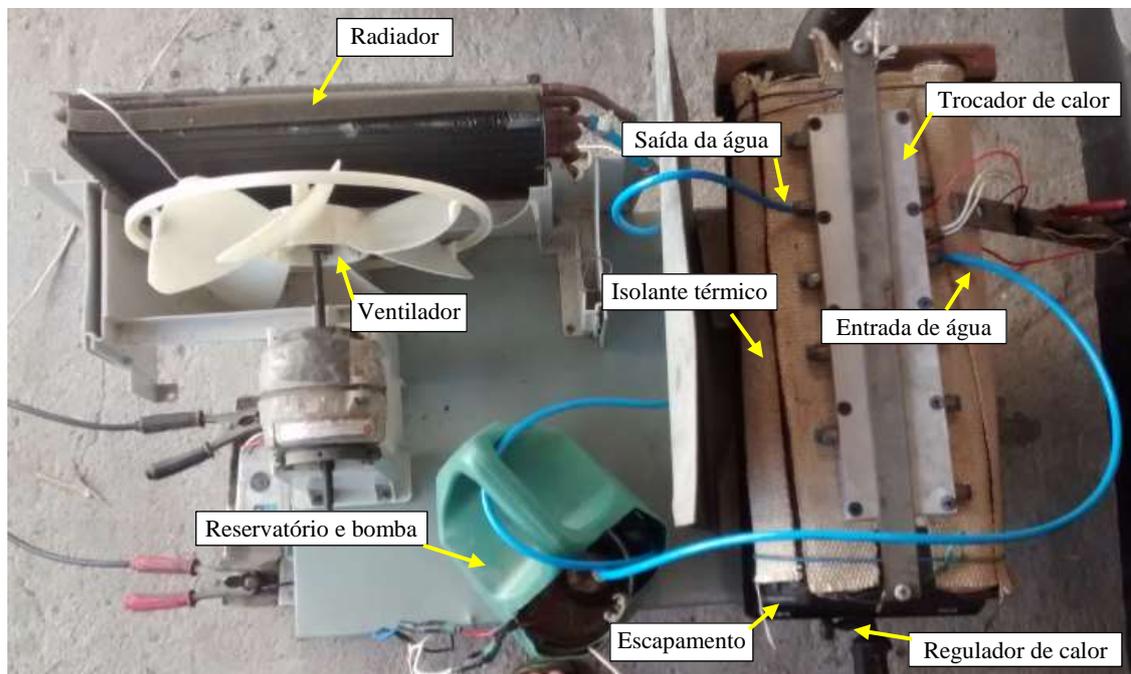


Figura 7: Bancada de testes
Fonte: Do autor

A ligação do fluido refrigerante com o sistema foi feita com mangueira e engates pneumáticos com diâmetro interno de 4,00 mm, e o fluido refrigerante utilizado foi a água. A Fig. 7 mostra a montagem da bancada testes.

3.4 METODOLOGIA DE TESTES

Foi avaliado o desempenho de cada módulo termoelétrico individualmente, aplicando uma diferença de temperatura entre suas faces, e verificando a tensão e corrente. Com os dados obtidos foi plotado um gráfico, e o mesmo foi comparado com os dados fornecidos em suas especificações pelo fabricante. Antes de fazer as medições, os termopares foram colocados dentro de um recipiente com água para proceder a uma verificação quanto a seu erro de leitura da temperatura. O erro obtido foi de 1 °C, o que está dentro da faixa de erro mostrada em sua resolução. Para fazer as medições foi utilizada uma lâmpada de 21 W e 12 volts devido a potência máxima especificada de um dos módulos adquiridos ser de 21,6 W, medindo-se a tensão na saída dos módulos termoelétricos e a corrente do circuito conforme Fig. 8.

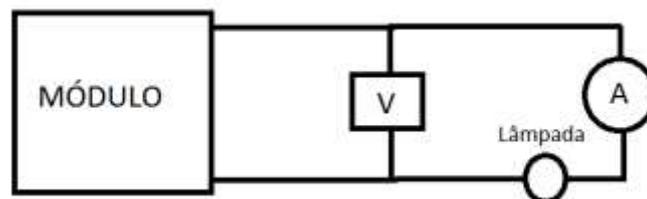


Figura 8: Ligação para medição
Fonte: Do autor

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste tópico será feita a análise dos resultados experimentais obtidos nos testes e será verificada a viabilidade do projeto na recuperação de energia térmica em máquinas de combustão interna.

4.1 MÓDULO SP1848

Este módulo foi submetido a uma temperatura máxima de 250 °C e gerou uma tensão e corrente máximas de 2,9 V e 0,85 A, respectivamente, para uma diferença de temperatura máxima de 211 °C, conforme mostra a Fig. 9.

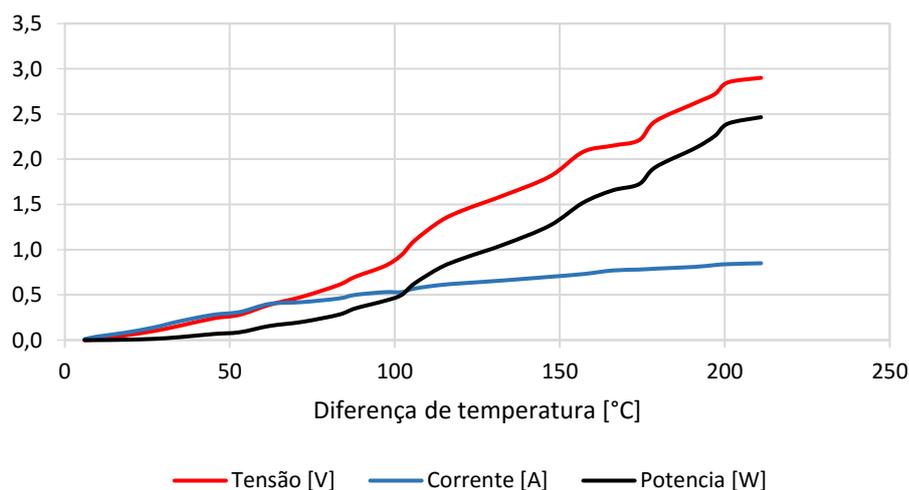


Figura 9: Valores experimentais do módulo SP 1848
Fonte: Do autor

O módulo apresentou uma potência máxima de 2,46 W abaixo do especificado pelo fabricante e apresentado na Tab. 1, porém comparados com os

demais modelos este foi o que obteve melhor resultado de potência por área, e também o que se aproximou mais de suas especificações.

4.2 MÓDULO TEP1-142T300

Este módulo foi submetido a uma temperatura máxima de 290 °C e uma tensão e corrente máximas respectivamente de 2,5 V e 0,7 A, a uma diferença de temperatura máxima de 255 °C como mostra a Fig. 10.

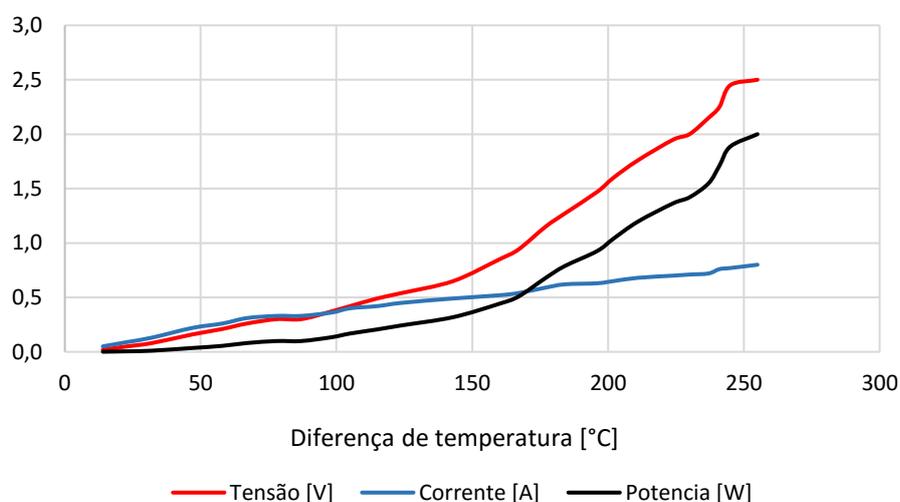


Figura 10: Valores experimentais do módulo TEP – 142T300
Fonte: Do autor

Os valores apresentados na Fig. 10 estão abaixo dos especificados pelo fabricante e apresentados na Qd. 1, com uma potência máxima de 2 W.

4.3 MÓDULO TE-MOD-22W7V-56

Este módulo foi submetido a uma temperatura máxima de 280 °C e uma tensão e corrente máximas, respectivamente, de 3,37 V e 0,9 A, com uma diferença de temperatura máxima de 235 °C e apresentou os respectivos valores de tensão, corrente e potência mostrados na Fig. 11.

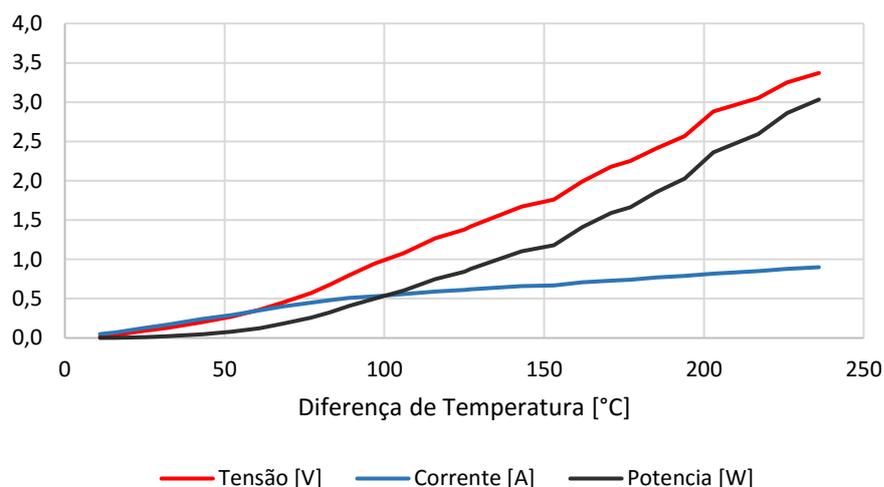


Figura 11: Valores experimentais do módulo TE-MOD-22W7V-56
Fonte: Do autor

O módulo apresentado na Fig. 11 mostrou uma potência máxima de 3 W, porém devido a sua área maior, a potência por área é inferior aos demais módulos e também abaixo do especificados na Qd. 1.

4.4 EFICIÊNCIA ENTRE OS MÓDULOS

Comparando os valores obtidos experimentalmente neste trabalho assim como alguns dados obtidos por, Ando (2014), no modelo (TEHP1-24156-1.2), ambos não condizem com suas especificações, como sua potência abaixo do especificado, porém na mesma pesquisa, Ando (2014), conseguiu obter experimentalmente uma potência de 5,49 W, que é bem próximo do especificado pelo fabricante, utilizando um módulo de modelo INBC-127.OHTS.

Através da Eq. (3) considerando um ZT tabelado para o material de telúrio de bismuto que é aproximadamente 1, temos uma eficiência de 0,22 % em todos os modelos testados, muito baixa, comparada com a citada por Hendricks (2011) que foi de 5 %.

4.5 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PESQUISA

Analisando os resultados o módulo termoeétrico que obteve melhor desempenho de potência por área foi o SP 1848, e conforme (BOSCH, 2016) a potência nos alternadores varia conforme o modelo do automóvel, por isso foi tomado



por base o modelo de um corsa 1.8 MPFI 2002/2012 que tem um alternador com uma tensão de 14 V e uma corrente de 70 A gerando uma potência de 980 W.

Um gerador termoelétrico com o módulo SP 1848, para substituir um alternador de 980 W, precisaria de uma área de 0,627 m², correspondente a 392 módulos. Porém, o escapamento utilizado nos testes, possui uma área disponível de apenas 0,2 m², capaz de alojar 125 módulos termoelétricos, a uma potência máxima de 312 W. Contudo, se os módulos testados obtivessem resultados semelhantes das suas especificações, com o modelo TEP – 142T300, teria-se uma potência de 17 W cada módulo, e com isso precisaria de pelo menos 60 módulos para alcançar 1.000 W de potência.

Considerando-se que a temperatura não será constante ao longo do escapamento, pois cada módulo trocará calor com o escapamento, diminuindo a temperatura do escapamento ao longo de seu comprimento, os módulos trabalhariam em temperaturas diferentes e nem todos trabalhariam com potência máxima. Além disso, necessita-se considerar o consumo de energia necessário para sua refrigeração da face fria dos módulos, que por consequência seria necessário um número ainda mais elevado de módulos.

Sabe-se que um alternador tem um rendimento aproximado de 70 %. Então para gerar 1 kW em potência elétrica ele necessita de aproximadamente 1,4 kW de potência mecânica. O motor aproveita cerca de 25 % da potência liberada na combustão, ou seja, é necessário consumir uma quantidade de gasolina que libere 5,6 kW ou mais em energia. Cada mililitro de gasolina queimada libera cerca de 36 kW em energia, portanto 0,155 ml de gasolina seria para gerar 1 kW de energia elétrica. Com isso, um automóvel a 90 km/h com um consumo de 12 km/l gastaria aproximadamente 7,5 % de combustível para gerar 1 kW de energia através de um alternador. Se os módulos termoelétricos testados obtivessem um rendimento conforme o especificado, estima-se que teríamos uma economia de combustível de aproximadamente 7,5% com um gerador de 60 módulos de potência de 17 W, somando uma potência total de 1 kW.

5 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste artigo pode-se chegar as seguintes conclusões:



- Os valores apresentados experimentalmente não reproduzem os apresentados em suas especificações, isso pode ser devido aos procedimentos que diferem dos utilizados pelo fabricante, ou os módulos não tem o desempenho informado.
- Para geração total ou parcial de energia de um automóvel, precisaria de muitos módulos termoelétricos com uma área superficial muito grande e um sistema complexo de refrigeração, tornando-se inviável e pouco eficiente.
- Com este artigo percebe-se a necessidade de estudos mais aprofundados em módulos termoelétricos com melhor eficiência, e que operem em temperaturas mais altas, pois, os módulos termoelétricos testados nessa pesquisa não tem uma boa eficiência em conversão de energia térmica para elétrica.
- Necessita-se também de um estudo para avaliar o quanto de energia seria necessária para a refrigeração de uma quantidade maior de módulos, e o comportamento do calor ao longo do escapamento devido a que cada módulo irá trocar calor com o escapamento baixando assim a temperatura ao longo do escapamento.

REFERÊNCIAS

AFONSO, J. U. B. **Gerador termoelétrico para escape de automóvel com controle de temperatura**. 2014. 125 p. Dissertação de Mestrado - Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2014.

ALVES, P.P. **A experiência de Joule revisitada**. 2008. 95 p. Dissertação de Mestrado - Universidade nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2008.

ANDO, J. O. H. **Protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. 2014. 166 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre/RS, 2014.

CARVALHO, M. A. S. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2011. 147 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Bahia, Salvador/Ba, 2011.

CATÁLOGO BOSCH. Alternadores, motores de partida e principais componentes. 2015/2016.



CAVALCANTI, M. J. P. **Fundamentos de eletrotécnica**. 21. ed. Ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1997. 224 p.

ENERGY harvesting jornal. Waste heat recovery systems in vehicles. Disponível em: <<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/waste-heat-recovery-systems-in-vehicles-00003754.asp?sessionid=1>>. Acesso em: abr.2017.

FAIRBANKS, J. W. Automotive thermoelectric generators and HVAC. In: **Proceedings of DEEE Conference**. Dearborn, MI, USA. 2012.
GREEN car congress: volkswagen show thermoelectric generator for waste heat recovery. Disponível em: <<http://www.greencarcongress.com/2009/02/Volkswagen-show>>. Acesso em: abr. 2017.

HENDRICKS, Terry; CHOATE, William T. Engineering scoping study of thermoelectric generator systems for industrial waste heat recovery. **Pacific Northwest National Lab. (PNNL)**. Richland, WA, 2006.

HUANG, J. Aerospace and aircraft thermoelectric applications. **Boeing Management Company**. Huntington Beach, Califórnia. out. 2009.

MARTINS, J. et al. Thermoelectric exhaust energy recovery with temperature control: through heat pipes. **SAE 2011 World Congress & Exhibition**. Warrendale, USA. Apr. 2011.

RITZ, F., AND PETERSON C. E. Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) program overview. Aerospace Conference, 2004. Proceedings. vol. 5. IEEE. 2004.

SANTOS, L.P. **Análise de desempenho de um gerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck**. 2010. 45 P. Dissertação de mestrado - Universidade de Taubaté, Taubaté/SP, 2010.

TEGPOWER. Disponível em: <<http://www.tegpower.com>>. Acesso em: abr. 2017.
VALLURI, S. R. et al. **The enhancement of the figure of merit for thermoelectric materials**. 2014.

ELECTRICAL4U. **Electrical engineering study site**. Disponível em: <<https://www.electrical4u.com/seebeck-effect-and-seebeck-coefficient>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

TURMO, Iván. Calor do corpo para recarregar o celular do futuro. **Swissinfo.ch**. 30 de setembro de 2009. Disponível em: <<https://www.swissinfo.ch/por/calor-do-corpo-para-recarregar-o-celular-do-futuro/885188>>. Acesso em: 12 jun. 2017.