

ESTUDO DO APROVEITAMENTO DOS GASES DE EXAUSTÃO DE
UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.

Sarah Raposo Melo – sraposom@hotmail.com
Nickolas Gonçalves Dutra – nickolas_gd@hotmail.com
Marina Ribeiro Moura - marinafisica@yahoo.com.br
João M. D. Pimenta – pimenta@unb.br
Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Mecânica

A3 - APLICAÇÕES ENERGÉTICAS

Resumo. *O presente trabalho apresenta uma introdução aos processos de geração termoelétrica através dos efeitos Peltier-Seebeck. A partir de uma análise do estado atual da arte e das formulações teóricas envolvidas no processo, propõe-se o projeto de um gerador termoelétrico a ser acoplado no escapamento de um veículo comercial, de forma a aproveitar o calor dos gases quentes gerados pelo motor de combustão interna para produção de energia elétrica. O modelo analítico de transferência de calor é adaptado a um código computacional desenvolvido para este caso, para que seja possível modelar o comportamento do sistema através de todo o comprimento do tubo de escapamento ocupado pelo gerador.*

Palavras-chave: *Energia, Termoelétrico, Calor, Escapamento, Veículo*

1. MODELO COMPUTACIONAL DO TEG

O objetivo deste trabalho é modelar, projetar e construir um sistema ETEG que seja capaz de contribuir para a alimentação sistemas de refrigeração automotivos elétricos já presentes no mercado, alimentando uma bateria com a energia produzida. Com isso, pretende-se diminuir a solicitação do alternador, gerando, assim, uma redução do consumo de combustível.

Esse gerador será alimentado através do efeito Seebeck, observado em células termoelétricas conhecidas como Células de Peltier-Seebeck, que produzem uma diferença de potencial elétrico entre duas junções de condutores se essas junções estiverem submetidas a uma diferença de temperatura. Quando instaladas no cano de descarga de um veículo, as células aproveitarão o calor dos gases de exaustão do motor de combustão interna para gerar o gradiente de temperatura necessário.

A energia será armazenada na própria bateria do carro para, por exemplo, reduzir a solicitação do dor. O alternador carrega a bateria de 12V, que alimenta todo o sistema elétrico com sua corrente quando o motor do veículo está em funcionamento. Logo, como o funcionamento do alternador depende do movimento do motor, o uso dos equipamentos elétricos causa maior consumo de combustível. A utilização da energia fornecida pelo gerador termoelétrico pode servir para carregar diretamente a bateria automotiva, diminuindo a necessidade de extrair potência do motor para acionar esses componentes elétricos.

A partir do dimensionamento inicial proposto para o sistema, gera-se um código computacional, de forma a simular virtualmente o comportamento de todos os seus componentes e colocá-los em diferentes situações de funcionamento. Essa simulação tem a finalidade de determinar se, com o número pré-definido de módulos termoelétricos que serão instalados, é possível gerar uma potência elétrica coerente com as expectativas de projeto e se essa geração é compatível com as especificações da bateria veicular, ou seja, se é possível armazenar a produção na bateria já presente no carro.

1.1 Considerações feitas para modelagem computacional

Desenvolve-se uma simulação MATLAB para determinar o comportamento de um gerador termoelétrico acoplado no escapamento de um automóvel para geração de energia a partir do aproveitamento do calor dos gases de exaustão (ETEG). Essa análise teórica considera, em primeiro lugar, cada módulo individualmente, e depois a associação entre eles formando o sistema gerador, de forma a obter os dados sobre a potência gerada de acordo com os parâmetros aos quais o sistema está submetido.

Alguns pontos importantes devem ser considerados no desenvolvimento do modelo computacional do um gerador termoelétrico em questão:

- A localização do sistema de geração termoelétrico no interior do escapamento, ou seja, a distância do gerador até o motor e a temperatura correspondente na sua entrada;

- A dependência das propriedades dos materiais que compõe os módulos termoeétricos em relação à temperatura;
- A queda de temperatura entre o gás de exaustão e o material termoeétrico e a capacidade térmica do sistema;
- Perdas no processo de conversão devidas às resistências ôhmicas e formação de correntes de Peltier.

E as hipóteses tomadas para representar o sistema foram:

- A distribuição espacial de temperatura $T(x)$ é paralela à direção do escoamento dos gases de exaustão;
- A transferência de calor $Q(y)$ é perpendicular à direção do escoamento dos gases de exaustão.

Assim, é necessário pré-definir como essas considerações serão inseridas no código computacional. Como mostrado na Fig. (1):

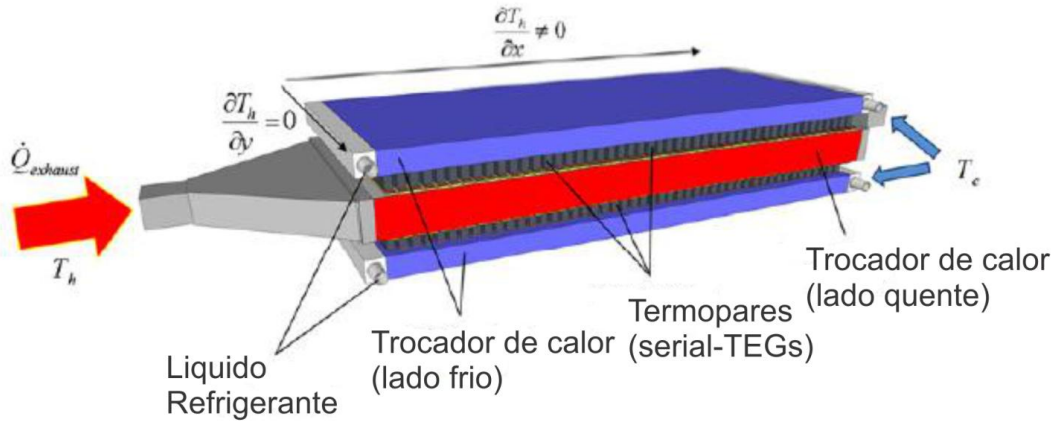


Figura. 1 - Considerações feitas para modelar o sistema de geração como um todo (Tatarinov et al., 2013)

O modelo é construído de forma que:

- A distribuição de temperatura na direção y é homogênea, e cada termopar do TEG opera na mesma temperatura (segmentação na direção x);
- O sistema TEG é discretizado na direção x ;
- O número de divisões feitas na discretização do termopar corresponde ao número de seções compostas cada uma por 3 módulos. Logo, como o sistema é composto por 7 seções de 3 módulos cada, serão calculadas 7 temperaturas quentes diferentes, uma para cada seção.

A temperatura quente correspondente a cada seção é calculada de acordo com a Eq. 1:

$$T_{h \ i + 1} = T_{h \ i} - \frac{Q_i}{m_g \cdot c_{pg}} \quad (1)$$

A partir dela, considera-se que a temperatura varia na direção x à medida que o gás troca calor com os módulos (convecção entre o gás quente de exaustão e as aletas). A eficiência será calculada seguindo a Eq. 2:

$$\Phi_{conversão} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \cdot \frac{1 + \frac{\alpha(T)^2 \cdot \sigma \cdot T_h + T_c}{2 \cdot \lambda'}^{\frac{1}{2}} - 1}{1 + \frac{\alpha(T)^2 \cdot \sigma \cdot T_h + T_c}{2 \cdot \lambda'}^{\frac{1}{2}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (2)$$

E então será incorporada à geração elétrica do sistema de acordo com a Eq. 3:

$$P_{TEGS} = \sum_{i=1}^y P_{iTEG} \cdot \Phi_{conversão} \quad (3)$$

2. SELEÇÃO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO

O módulo termoeétrico a ser usado nesse trabalho foi selecionado a partir das características predominantes dos módulos disponíveis no mercado e das faixas de temperatura às quais ele seria submetido durante sua operação, quando instalado no escapamento do veículo. Buscou-se, primeiramente, um módulo que pudesse operar em temperaturas altas, cerca de 300 °C. Então, buscou-se aquele que oferecesse uma potência de saída alta em relação à maior parte dos módulos comerciais, assim como um preço que correspondesse à sua capacidade de geração. Isso faz com que a eventual substituição de um módulo seja facilmente executada.

Foi estimada uma potência de 300 W para o gerador termoeétrico, que corresponde a aproximadamente 30% da potencia gerada por um alternador. Assim, o módulo selecionado foi o TEG1-12611-6.0 fabricado pela TECTEG MFR. Esse modelo é apresentado na Fig. 2. Suas especificações são descritas na Tab. 1.

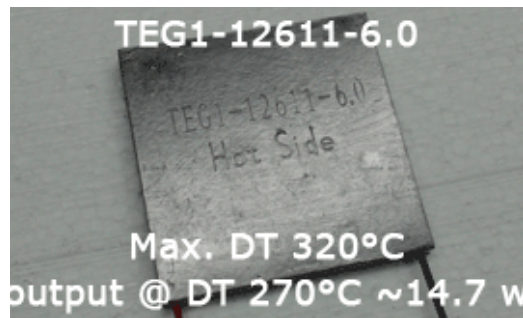


Figura 2. Módulo termoeétrico TEG1-12611-6.0

Tabela 1. Especificações do módulo selecionado

Temperatura do lado quente [°C]	300
Temperatura do lado frio [°C]	30
Voltagem de circuito aberto [V]	8.4
Resistencia [Ω]	1.2
Voltagem de saída [V]	4.2
Potência de saída [W]	14.6
Corrente de saída [A]	3.4
Fluxo de calor através do módulo [W]	365
Resistencia do circuito [Ω]	0.5~0.7
Coefficiente Seebeck [V/K]	0,023254
Condutividade elétrica [S/m]	$2,11 \cdot 10^4$
Condutividade térmica [°C.m/W]	1,8

A geometria é descrita na Fig. 3.



Figura 3. Geometria do módulo selecionado

Como cada módulo é capaz de gerar 14.6 W quando operando em suas condições máximas ideais de geração elétrica. Assim, serão necessários aproximadamente 21 módulos para gerar os 300 W determinados como objetivo a se cumprir. Esse valor corresponde a uma estimativa inicial e não considera as perdas e a eficiência do conjunto. Porém,

sabe-se que, devido à eficiência do gerador, esse valor não poderá ser alcançado. Busca-se, então, otimizar o modelo termodinâmico do gerador de forma que seja possível extrair o máximo potencial de geração elétrica de cada módulo.

3. GEOMETRIA E PROJETO DO TEG

Para a construção do gerador será utilizado o aço inox AISI 409, já que é o mesmo utilizado na fabricação da grande maioria dos escapamentos automotivos. A estrutura do gerador será constituída basicamente de um tubo de seção quadrada com adaptadores para a seção circular do escapamento.

Três das paredes do duto terão aberturas nas quais os módulos serão fixados, com exceção da parede superior. Como a parede superior estará em contato com o veículo, ela não oferecerá um fluxo de ar atmosférico suficiente para resfriar o lado frio do módulo. Aletas serão acopladas no lado interno e externo do tubo para aumentar a área de convecção e, conseqüentemente, o fluxo de calor.

Logo, define-se que a estrutura do gerador, que substituirá uma seção do escapamento já existente no veículo, será constituída por um duto de aço inox AISI 409 de seção quadrada 7,6 x 7,6 cm, com 42 cm de comprimento e espessura de 3 mm. Sete cortes de 5,8 x 5,8 cm serão feitos em cada uma das paredes com exceção da parede superior, totalizando 21 cortes para a fixação dos módulos. Em cada uma das extremidades do duto haverá um adaptação da geometria quadrada para a geometria circular de forma que o duto possa ser adaptado ao escapamento de um veículo.

3.1 Configuração proposta

A diferença de temperatura encontrada na primeira configuração foi muito pequena para gerar uma quantidade significativa de energia elétrica, já que, quanto maior for essa diferença, maior será a geração associada. Surge, então, a necessidade de adaptar a estrutura do TEG de forma que se estabeleça uma diferença de temperatura maior entre os lados quente e frio dos módulos.

Sendo assim, na segunda configuração do gerador, as paredes internas e externas do tubo serão revestidas por aletas de forma a aumentar a área de transferência de calor, como é mostrado na Fig. 4.

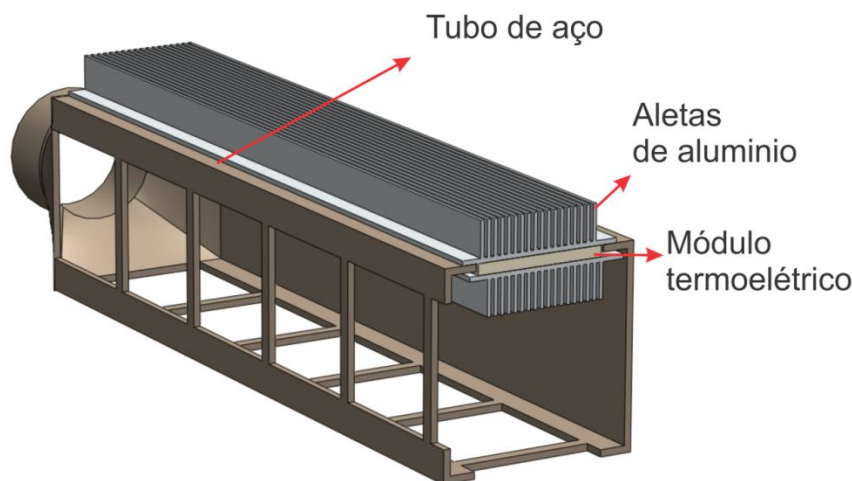


Figura 4. Estrutura do TEG com aletas

Aletas são superfícies que estendem a partir da superfície de um objeto, de modo a aumentar a taxa de transmissão de calor para o ambiente (ou vice-versa) através do aumento da convecção. Aumentando a área de transmissão de calor, aumentando o coeficiente de transmissão de calor por convecção ou aumentando a diferença de temperatura entre o objeto e o ambiente, aumenta-se a quantidade de calor transferido.

Adicionando uma aleta a um objeto, aumenta-se a área superficial e pode ser uma solução econômica para os problemas de transmissão de calor.

Para a aplicação no TEG em questão, aletas comerciais disponíveis no mercado (conhecidas como dissipadores de calor) foram analisadas de forma a selecionar aquela que apresentasse uma geometria capaz de ser adaptada à estrutura tubular do gerador. Após a seleção das aletas pela geometria, buscou-se aquela que também possuísse baixa resistência térmica, de forma a aumentar o fluxo de calor através do sistema. Selecionou-se a aleta FNT-020-AL (Fig. 5), que possui resistência térmica básica de $1,22^{\circ} \text{C} / \text{W} / 4$.

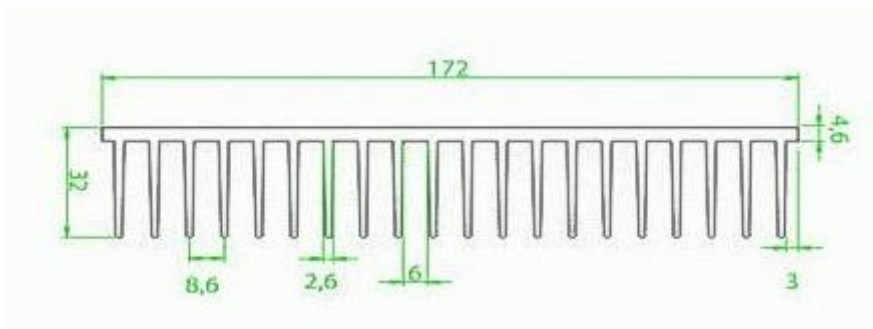


Figura 5. Dimensões da aleta FNT-020-AL

Para aletas com comprimento diferente de 4", usa-se um fator de correção da resistência térmica básica. Como os módulos termoeletrônicos tem comprimento de 56 mm (aproximadamente 0,5"), o fator de correção é igual a 1,36. Multiplica-se, então, o fator de correção pela resistência térmica básica, e chega-se ao valor da resistência térmica da aleta usada no projeto igual a 1,34 °C/W.

O fabricante já fornece a resistência térmica da aleta. Essa resistência térmica será adicionada ao cálculo do fluxo de calor, e então as temperaturas serão calculadas a partir delas.

Assim, o novo fluxo de calor é calculado de acordo com a Eq. 4:

$$R_{eq} = \frac{1}{h_{int,A}} + \frac{l}{k,A} + \frac{1}{h_{ext,A}} + R_{aleta\ interna} + R_{aleta\ externa} = \frac{\Delta T}{q} \quad (4)$$

e é igual a 14,46 W/m².

As temperaturas dos lados quente e frio podem ser finalmente calculadas de acordo com as Eq. 5 e Eq. 6:

$$1,34 = \frac{350 - T_h}{14,46} \quad (5)$$

$$1,34 = \frac{T_c - 21,2}{14,46} \quad (6)$$

e são iguais a $T_h = 330,62^\circ C$ e $T_c = 40,58^\circ C$. A diferença de temperatura entre os lados quente e frio do módulo termoeletrônico passa a ser de 290,04°C, justificando a utilização de aletas para maior geração de energia no TEG.

4 O CÓDIGO COMPUTACIONAL E OS DADOS A SEREM EXTRAÍDOS

O código em questão foi desenvolvido com auxílio do software MATLAB. Nele, a partir do modelo descrito na seção 1.1 deste artigo e dos valores numéricos já calculados no anteriormente, foi possível simular a geração dos 21 módulos termoeletrônicos quando inseridos no sistema gerador. Foi possível, então, considerar a variação da temperatura do lado quente dos módulos através da perda de calor dos gases de exaustão ao longo do comprimento do escapamento. Não foi necessário contabilizar a influência da resistência de contato e da ação da pasta térmica já que sua resistência térmica é desprezível quando comparada às outras que agem sobre o sistema. A geração elétrica final obtida ao final da simulação também considerou a eficiência global do sistema. Os dados a serem extraídos ao final dessa simulação são:

- A geração elétrica do sistema quando submetido à situação descrita na Seção 3.1;
- A curva teórica de geração elétrica do sistema quando se mantém as características do escoamento dos gases de exaustão e se varia a velocidade do carro (logo, a convecção do lado frio dos módulos);
- A curva teórica de geração elétrica do sistema quando se mantém as características do escoamento externo do ar ambiente (mesma velocidade do carro) e se varia a temperatura dos gases de exaustão através da variação da rotação do motor.

Os dados para obtenção dessas curvas serão selecionados da seguinte maneira:

- Para a curva de geração elétrica x velocidade do automóvel, serão arbitrados 3 valores de velocidade que correspondem àqueles mais observados em situações cotidianas de tráfego urbano: 40 km/h, 60km/h e 80km/h. A

partir dessas velocidades, é possível calcular o coeficiente de convecção forçada do ar ambiente correspondente a cada uma. Assim, os cálculos poderão ser refeitos para cada situação arbitrada;

- Para a curva de geração elétrica x temperatura dos gases de exaustão, serão utilizados dados coletados diretamente de um motor automotivo convencional, de forma que a máxima temperatura utilizada corresponderá à máxima rotação do motor informada pelo fabricante.

Valle (2010) apresenta os dados coletados de um motor Palio1.0, 8 válvulas, com dimensões do bloco: 600X460X300 mm, dimensões do radiador: 360X350 mm, diâmetro interno do bocal de entrada de ar no motor: 54 mm, velocidade do ar no radiador (com a menor velocidade do eletroventilador): 2,352 m/s e temperatura ambiente: 21°C . A Tab. 2 sintetiza os dados que serão utilizados neste modelo:

Tabela 2. Rotação do motor vs. temperatura de exaustão

Rotação do motor [RPM]	Temperatura de saída dos gases na descarga [°C]
1100 RPM	118 °C
2450 RPM	300 °C
3300 RPM	402 °C

Sabe-se que há uma relação entre rotação do motor do automóvel e sua velocidade. Porém, para essa simulação, essa relação será desconsiderada. Dessa forma, pretende-se observar em quais situações cotidianas de utilização do automóvel a geração elétrica será mais eficiente.

5 RESULTADOS OBTIDOS

O primeiro resultado obtido considerou a situação onde a diferença de temperatura entre os lados quente e frio do primeiro módulo foi de 290,04°C e a velocidade do carro foi de 60 km/h.

A discretização do comprimento do gerador ao longo do eixo x possibilitou que a temperatura do lado quente de cada módulo pudesse variar de acordo com as perdas de calor entre os gases e as aletas. Porém, essa discretização mostrou que a queda de temperatura dos gases quentes entre os três primeiros e os três últimos módulos é extremamente pequena, da ordem de 0,01°C. Esse resultado é otimista, pois mostra que o potencial de geração de todos os módulos é praticamente o mesmo.

Por outro lado, o modelo computacional considerou a eficiência de conversão dos módulos, que atualmente representa o maior desafio da tecnologia de geração termoeletrica. Essa eficiência ainda é baixa, o que torna esse tipo de geração muito caro e pouco viável para muitas aplicações. Esse fato foi confirmado pelo modelo: a eficiência calculada foi de apenas 46,7%. Dessa forma, a geração estimada de 353,8W para o sistema caso a eficiência fosse de 100% foi reduzida para 165,2W.

É importante ressaltar que a eficiência depende tanto da temperatura do lado quente quanto da temperatura do lado frio dos módulos. Portanto, ela não se manterá constante nas análises que serão feitas variando a rotação do motor.

5.1. Geração em função da rotação do motor

A partir dos dados da Tab. 2, foi possível relacionar a rotação do motor de combustão interna com a geração elétrica do ETEG. Nesse caso, como a eficiência de geração do sistema é função das temperaturas dos lados quente e frio dos módulos, ela também variou durante a análise. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 6. A discussão dos resultados será feita na seção 6 deste artigo.

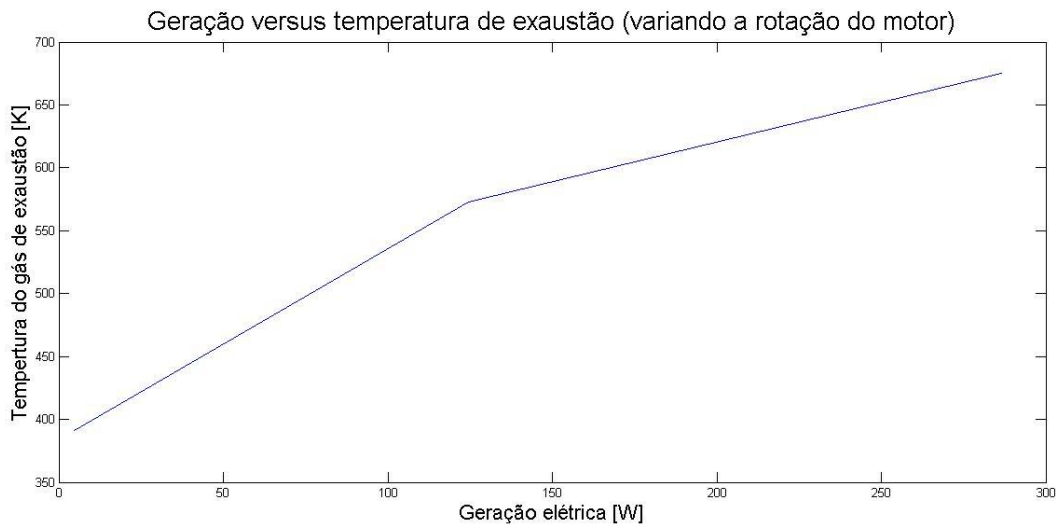


Figura 6. Geração vs. temperatura do lado quente

5.2. Geração em função da velocidade do carro

Definindo-se três pontos de velocidade (40 km/h, 60 km/h e 80 km/h), foi possível relacionar a velocidade do automóvel com a geração elétrica do ETEG. Nesse caso, como a eficiência de geração do sistema é função das temperaturas dos lados quente e frio dos módulos, ela não variou durante a análise. O parâmetro que define essa geração é o coeficiente de convecção forçada, função da velocidade. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 7. A discussão dos resultados será feita na seção 6 deste artigo.

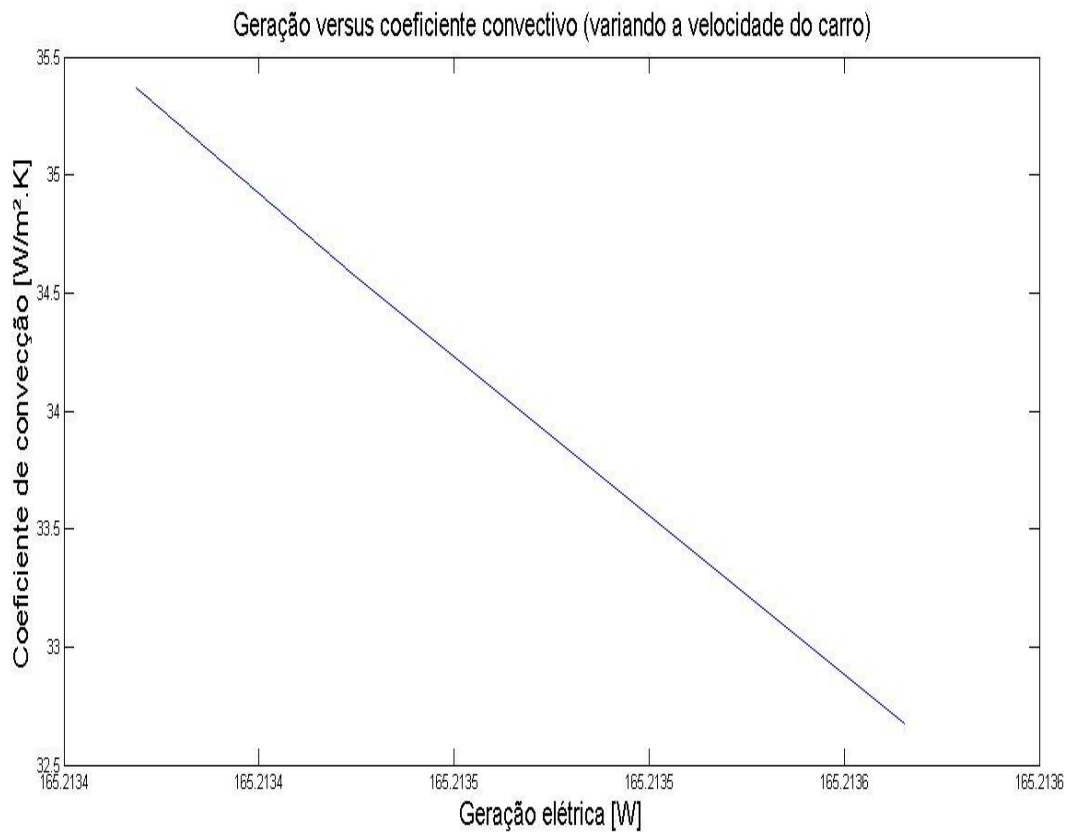


Figura 7. Geração versus velocidade do carro
ASBRAV - 25 a 27 de agosto - Porto Alegre

6 CONCLUSÕES TEÓRICAS PRELIMINARES

A partir dos gráficos das Figs. 6 e 7, é possível perceber que a influência da velocidade do automóvel na geração elétrica é pouco significativa, enquanto que o aumento da rotação do motor tem influencia muito maior no processo.

Isso ocorre porque, além de gerar uma variação muito pequena no coeficiente de convecção do ar, o aumento da velocidade não muda a eficiência do sistema. Por outro lado, o aumento da rotação do motor gera um aumento significativo da temperatura dos gases de exaustão. Assim, além de proporcionar uma maior diferença de temperatura entre os lados quente e frio dos módulos, proporcionando maior potencial de geração, o aumento da rotação também gera um aumento da eficiência de conversão do sistema.

Conclui-se, desta análise, que uma maior geração elétrica depende de uma maior rotação do motor de combustão interna. Quanto mais potente for o motor, maior será a dissipação de calor através dos gases de exaustão. Logo, com o objetivo de otimizar a geração, deve-se buscar instalar o sistema ETEG em automóveis mais potentes.

Espera-se futuramente construir o modelo do sistema trabalhando nesse artigo e comparar os dados experimentais com os dados teóricos.

7 REFERÊNCIAS

TATARINOV, D.; KOPPERS, M.; BASTIAN, G.; SCHRAMM, D.; 2013. Modeling of a Thermoelectric Generator for Thermal Energy Regeneration in Automobiles. Journal of Electronic Materials, Vol. 42, No. 7, 2013.

VALLE, R.M., 2010. Roteiro de aula prática nº2 - balanço térmico de motores. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.

8 ABSTRACT

The following work shows an introduction to the process of thermoelectric generation by Peltier-Seebeck effects. By doing one analysis of the actual state of art and the theoretical formulations involved in the process, it is proposed the project of a thermoelectric generator to be attached to the exhaust manifold of a commercial vehicle, with the objective of harvesting the energy of the exhaust gases generated by the internal combustion engine and producing electric energy. The analytical model of heat transfer is adapted to a computational code developed to this case, so that the behavior of the system can be analyzed thru the entire length of the exhaust pipe occupied by the generator.

Key-Words: Energy, Peltier-Seebeck, Thermoelectric, Heat, Exhaust Manifold, Vehicle