

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DO EFEITO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO NA
GERAÇÃO TERMOELÉTRICA UTILIZANDO MÓDULOS DE PELTIER

Matheus Hoffmann Lisboa – matheus14@gmail.com

João Manoel Dias Pimenta – pimenta.joao@gmail.com

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, www.enm.unb.br

A3 – Fontes Energéticas

Resumo. Para suprir a crescente demanda energética global, novas formas de geração elétrica são de extrema importância, assim como o aumento da eficiência de métodos já existentes. O presente estudo se propõe a modelar analiticamente a transferência de calor através de um gerador termoelétrico (TEG) constituído por um módulo de Peltier. A geração termoelétrica a partir destes módulos tem perspectivas futuras promissoras, pois são geradores leves, pequenos e alvos de constantes melhorias. Foi idealizada a implementação de um TEG em escapamentos veiculares para aproveitamento da energia térmica presente nos gases de exaustão. Visando esta aplicação, diversas variáveis mostraram-se relevantes: características do escoamento, utilização de dissipadores de calor, sua geometria e composição e, principalmente, a descrição da interface entre as superfícies do módulo e os dissipadores de calor. Nesta interface a resistência térmica de contato afeta a transferência de calor através do módulo, sendo função da pressão de montagem, rugosidade das superfícies e presença de material intersticial. Após a modelagem da transferência de calor, um código numérico foi implementado a fim de avaliar a sensibilidade da tensão de saída e da resistência de contato do módulo com a alteração das condições de operação do TEG. Além disso, para avaliar os resultados simulados, foi desenvolvida uma bancada experimental reproduzindo as condições de operação do TEG, sob efeito de diferentes temperaturas, velocidades de escoamento, pressões de contato, rugosidades e material intersticial. Com a utilização de apenas um módulo, os valores teóricos para tensão de saída ficaram dentro do intervalo de 0.92V e 0.97V, para o pior e melhor caso, respectivamente, e os valores das medições experimentais nas mesmas condições de operação forneceram 0.75V e 1.07V. A discrepância encontrada entre a abordagem teórica e experimental resultou em um erro relativo máximo de 22.7%. Os melhores valores de tensão foram obtidos quando minimizada a resistência térmica de contato, o que indica que este é um meio de aumentar a eficiência do TEG e, consequentemente, auxiliar a suprir a demanda energética atual.

Palavras-chave: Módulo de Peltier, Geração termoelétrica, Resistência térmica de contato

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica vem aumentando com o passar dos anos (Anuário Estatístico de Energia Elétrica, 2013), assim como a preocupação e importância de encontrar meios de geração de energia mais eficientes e que afetem menos o meio ambiente. Grande parte da energia gerada deriva de fontes não renováveis, aplicadas em processos termodinâmicos pouco eficientes, por exemplo, turbinas a gás, motores de combustão interna e usinas termoelétricas possuem eficiências usuais que variam de 25% a 60%, isto é, há muito potencial desperdiçado.

Segundo a U.S. Energy Information Administration, o consumo de energia médio mundial é de 18TW com meios de produção a partir de combustíveis fósseis representando 86% (15.48 TW) da geração. Se for considerada uma eficiência média de 40%, o total de energia desperdiçada é de 9.3 TW.

Para exemplificar a quantidade o calor rejeitado nestes processos, pode-se utilizar a cadeia energética do Estados Unidos da América (Lawrence Livermore National Laboratory, 2013), onde é evidenciado que a energia rejeitada é aproximadamente 57% da energia total gerada.

O desafio torna-se, então, o de encontrar uma forma de aproveitar o calor rejeitado e que não afete o meio ambiente quando em operação. Entre diversas alternativas, módulos termoelétricos apresentam grande potencial para o aproveitamento de calor residual na geração de energia, pois são compactos, leves e duráveis, podendo ser empregados desde usinas termoelétricas a veículos automotivos oferecendo potencial para aumentar a eficiência global do sistema.

Estes módulos baseiam-se no efeito Seebeck, no qual uma força eletromotriz é gerada na junção entre dois termoelementos de materiais condutores diferentes a partir de seu aquecimento, onde quanto maior a diferença entre as temperaturas dos lados quente, T_h , e frio, T_c , maior a voltagem de saída

$$V = \alpha(T_h - T_c) \quad (1)$$

Onde α é o coeficiente diferencial de Seebeck entre o par de termoelementos que compõe o módulo, medido em V/K. Devido a este comportamento, estes módulos são elementos bastante propícios a serem inseridos em tubulações pelos quais passam escoamentos transportando calor não aproveitado em ciclos termodinâmicos. A Fig. 1 apresenta em detalhes as características construtivas de um módulo

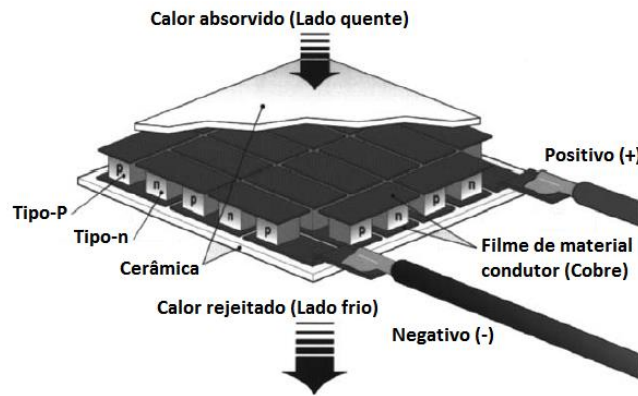


Figura 1. Esquema detalhado da construção de um módulo de Peltier (Rowe, 2006).

A eficiência de um módulo de Peltier comum atualmente é de 6% a 11% (Rowe, 2006), por isso, na prática, são utilizados diversos módulos em série que, somando-se as potências de saída geradas, resultam em valores expressivos.

2. GERADOR TERMOELÉTRICO

Tendo em vista que a potência gerada depende da diferença de temperatura entre o lado quente e frio do módulo, o presente trabalho foi proposto a fim de analisar a transferência de calor atuante no mesmo e, para isso, foi idealizado um gerador termoeletrico (TEG) composto por um módulo de Peltier e um par de aletas de alumínio que visam aumentar a transferência de calor (Çengel, 2006), representado na Fig. 2, onde os elementos P e N representam os dois termoelementos dos quais o módulo é constituído

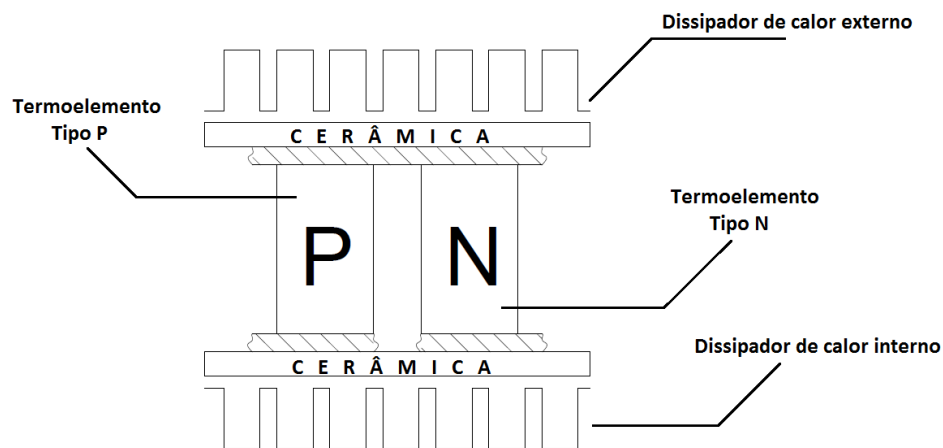


Figura 2. Desenho esquemático de um par de dissipadores de calor retangulares instalados em cada face de um módulo, formando assim, um TEG.

Três modos de transferência de calor atuam no TEG, o de condução, convecção e radiação, no entanto, nas situações consideradas nesse estudo, o calor transferido por radiação é de ordem inferior aos outros dois e, por este motivo, não foi incluído. Os fluxos de calor de condução, convecção e os dois combinados são definidos nas Eqs. 2, 3 e 4, dados em W/m^2

$$Q_{cond} = -k \frac{dT}{l} \quad (2)$$

$$Q_{conv} = h(T_w - T_\infty) \quad (3)$$

$$Q_{total} = Q_{cond} + Q_{conv} \quad (4)$$

Onde k é a condutividade térmica do material, dT é o gradiente de temperatura na direção generalizada, l é a espessura do material na qual há um fluxo de calor condutivo, T_w é a temperatura na superfície e T_∞ é a temperatura do meio.

Devido a geometria de placa plana do módulo, o TEG foi instalado em um duto de seção retangular e, para esta configuração, os números de Nusselt para determinar os coeficientes de transferência de calor por convecção dos

escoamentos externo e interno foram definidos a partir das abordagens de Churchill e Ozoe (1973) e Jensen e Vlakancic (1997), respectivamente.

Então, para o escoamento externo,

$$Re_{ext} = \frac{\rho U_{ext} X}{\mu_{ext}} \quad (5)$$

$$Nu_{ext} = \frac{[0,3387 Pr^{1/3} Re_{ext}^{1/2}]}{\left[1 + \left(\frac{0,0468}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \quad (6)$$

$$h_{ext} = \frac{Nu_{ext} k}{X} \quad (7)$$

Onde Re é o número de Reynolds, ρ é massa específica do fluido (kg/m^3), U é a velocidade do escoamento (m/s), μ é a viscosidade dinâmica ($Pa.s$), Pr é o número de Prandtl, Nu é o número de Nusselt e h é o coeficiente de convecção ($W/K.m^2$).

E para o escoamento interno, como a seção do duto não tem geometria cilíndrica, se faz necessária a utilização de um diâmetro hidráulico, D_h . Sendo a seção transversal do TEG retangular, de largura X e altura Y , temos que a área nominal, A_n , é

$$A_n = XY \quad (8)$$

Logo,

$$D_h = \frac{4A_n}{\text{perímetro}} = \frac{4XY}{2(X+Y)} = \frac{2XY}{(X+Y)} \quad (9)$$

$$Re_{int} = \frac{\rho U_{int} D_h}{\mu_{int}} \quad (10)$$

$$A_{real} = A_n - NLt \quad (11)$$

Onde N , L e t , são o número de aletas, a altura e a largura das aletas, respectivamente.

Segundo Jensen e Vlakancic (1997), essa abordagem pode ser usada apenas se a altura adimensional da aleta J for maior que 0,06

$$J = \frac{2t}{Y} \geq 0,06 \quad (12)$$

O fator de atrito interno é definido por

$$f_{geométrico} = \left(\frac{AS_{real}}{AS_n}\right)^{0,29} \quad (13)$$

Onde AS_{real} e AS_n representam as áreas real e nominal da superfície interna do duto, respectivamente,

$$AS_{real} = A_{aleta} + A_{na} \quad (14)$$

A_{aleta} é a área superficial total das aletas e A_{na} é a área total dos espaços entre aletas.

$$A_{na} = X^2 - Nxt \quad (15)$$

$$A_{aleta} = 2NXL \quad (16)$$

$$AS_n = 2XY + 2X^2 \quad (17)$$

E, finalmente,

$$\frac{Nu_{int}}{Nu_{st}} = \left(\frac{X}{Y}\right)^{-1/2} \left(\frac{A_n}{A_{real}}\right)^{0,8} f_{geométrico} \quad (18)$$

Onde Nu_{st} é o número de Nusselt para o duto sem aletas definido por Gnielinski (1976),

$$Nu_{st} = 0,012Pr^n [Re_{int}^{0,87} - 280] \quad (19)$$

Onde $n = 0,4$, pois o ar está se aquecendo, como definido pela equação de Dittus-Boelter (Çengel, 2006). Encontrados os valores de Nu_{int} e D_h , define-se o coeficiente de convecção interna como

$$h_{int} = \frac{Nu_{int}k}{D_h} \quad (20)$$

Além de quantificar os fluxos de calor, um estudo minucioso da transferência de calor que ocorre no TEG é essencial para aumentar a eficiência. Isso pode ser alcançado estudando-se o circuito de resistência térmica, representado na Fig. 3

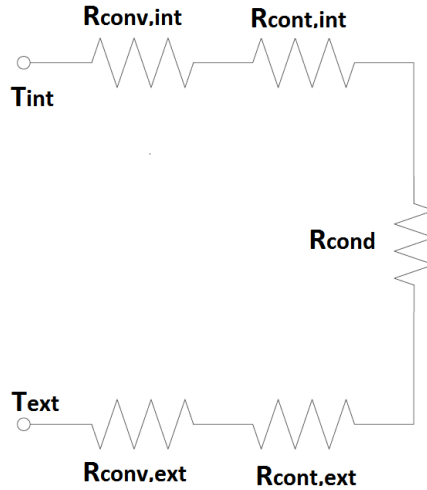


Figura 3. Circuito de resistência térmica atuante no TEG.

A resistência térmica total atuante no TEG é dada pela Eq. 21 e tem como unidade K/W

$$R_{eq} = R_{conv,int} + R_{cont,int} + R_{cond} + R_{cont,ext} + R_{conv,ext} \quad (21)$$

As resistências de condução e convecção são, respectivamente

$$R_{conv,int} = \frac{1}{h_{int}AS_{real}} \quad (22)$$

$$R_{conv,ext} = \frac{1}{h_{ext}AS_{real}} \quad (23)$$

$$R_{cond} = \frac{H}{k_{modulo}A_{modulo}} \quad (24)$$

Onde H é a espessura do módulo.

Na análise de condução de calor na interface entre duas camadas sólidas, há uma resistência gerada pela rugosidade das superfícies, pois apesar das mesmas parecerem planas e lisas a olho nu, elas se apresentam bastante rugosas se analisadas sob microscópio, com inúmeros picos e vales. Quando essas superfícies são pressionadas uma contra a outra, os picos formam bom contato material, porém os vales formam vazios preenchidos com ar e, essas lacunas, devido à baixa condutividade térmica do ar, atuam como isolante térmico. Logo, a interface oferece alguma resistência ao fluxo de calor, e essa resistência por unidade de área é conhecida como resistência térmica de contato, R_{cont} , e é definida como

$$R_{cont} = \frac{1}{h_c} = \frac{\Delta T_{interface}}{\dot{Q}/A} \quad (25)$$

Como pode-se notar, as resistências condutivas e convectivas dependem somente das características dos escoamentos e das propriedades físicas dos componentes. Logo, a resistência passível de otimização é a térmica de

contato, a qual é função da pressão de contato, do material intersticial, e da rugosidade superficial, porém não há uma equação governante para defini-la (Çengel, 2006), requerendo que uma relação empírica seja estabelecida.

Há grande incerteza dos valores de condutância térmica, h_c , reportados pela literatura, então, para este estudo, foi utilizado como referência o trabalho de Barzelay et. al (1955) no qual são apresentadas curvas de condutância de contato para interfaces entre placas de alumínio com diferentes valores de pressão de contato e rugosidade superficial.

A partir de três gráficos $h_c \times P$, um para cada valor de rugosidade superficial foram lidos valores de h_c para três pressões gerando três equações da reta do tipo

$$h_c = aP + b \quad (26)$$

Para incluir a influência da rugosidade os coeficientes A_i e B_i das equações da reta, onde $i = 1, 2, 3$, foram dispostos em gráficos com os valores de rugosidade no eixo das ordenadas e, novamente, foram extraídas equações para as curvas. Essas equações foram, então, inseridas na Eq. 27 que é a equação da condutância térmica de contato utilizada como referência

$$h_{c,calculado} = [1,307r^2 - 5,567r + 15,33]P + [409,94r^2 - 1842r + 3358,3] \quad (27)$$

3. BANCADA EXPERIMENTAL

Com o propósito de comparar com os resultados numéricos previstos pela implementação numérica do modelo matemático proposto, uma bancada experimental foi projetada e construída de modo que permita a variação das configurações do TEG, visando alterar o valor da resistência térmica de contato a fim de avaliar a sensibilidade que o fluxo de calor possui com a mesma.

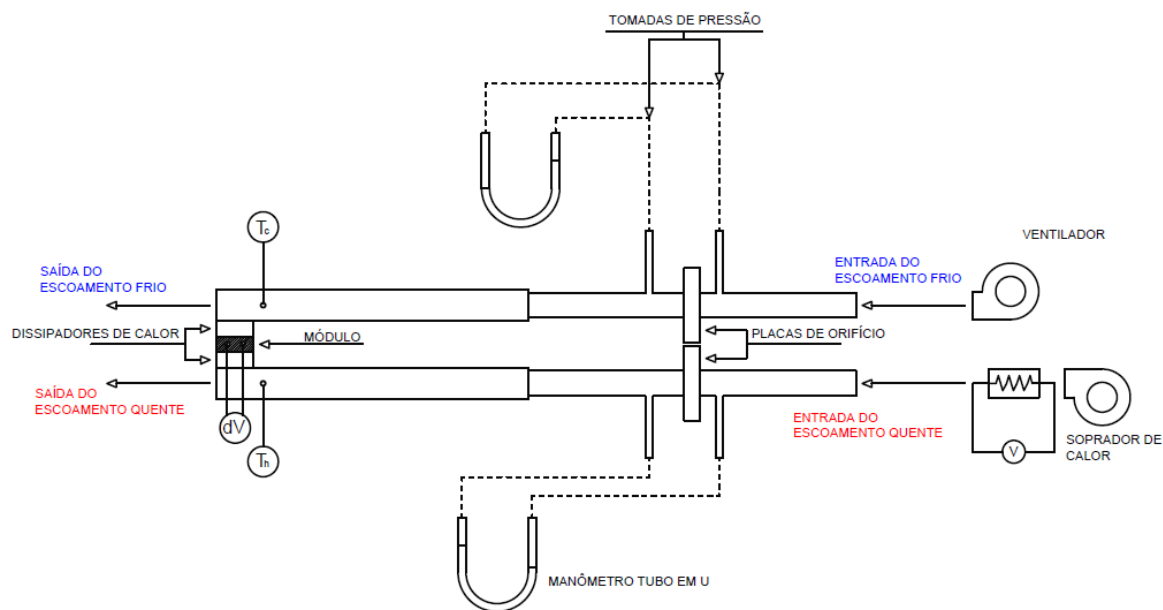


Figura 4. Esquema do aparato experimental utilizado

A bancada experimental é composta por dois dutos cilíndricos conduzindo os escoamentos de temperatura fria e de temperatura quente, nos quais estão instaladas placas de orifício para que seja possível conhecer a velocidade dos escoamentos. Posteriormente, a seção altera de cilíndrica para retangular, onde estão instaladas as aletas e o módulo de Peltier.

3.1 Procedimento experimental

Inicialmente, ligam-se o ventilador e o soprador de calor e apenas após a variação de temperatura do escoamento quente alcançar regime permanente, iniciam-se as medições

A aquisição de dados será feita para uma gama de configurações diferentes da bancada, relativas à mudança de parâmetros que devem causar variações no desempenho do gerador termoelétrico. Essas configurações são relacionadas aos fatores a seguir:

Ao tratamento superficial da base dos dissipadores de calor

- Um par de dissipadores de calor não modificados, utilizados com mesmo acabamento superficial que foram adquiridos, sem nenhum tratamento;

- Um par de dissipadores de calor com superfície lixada.
- À presença de material intersticial entre a base do dissipador de calor e o módulo termoeletrico:
- Ausência de qualquer material intersticial;
 - Utilização da Pasta Térmica 1 que tem condutividade térmica de 0,4 aplicada às interfaces da base das aletas e o módulo
 - Utilização da Pasta Térmica 2 que tem condutividade térmica de 1,2 aplicada às interfaces da base das aletas e o módulo
- À aplicação de pressão sobre o gerador termoeletrico:
- Sem aplicação de pressão adicional sobre o gerador, ou seja, a única pressão atuante é o próprio peso da estrutura do aparato experimental. Essa medida será tomada como medida de pressão relativa nula, servindo de parâmetro para os casos com pressão adicional;
 - Aplicação de 62052 Pa (9 psi) adicionais sobre o gerador termoeletrico;
 - Aplicação de 124106 Pa (18 psi) adicionais sobre o gerador termoeletrico.

4. RESULTADOS

Os valores de tensão atingidos na presença de diferentes materiais intersticiais, com diferentes pressões de contato e com diferentes rugosidades superficiais estão dispostos em gráficos representados nas Figs. 5, 6 e 7. O aumento de tensão de saída com a inserção de pastas térmicas é condizente com o antecipado pela teoria, o material inserido preenche as lacunas de ar, aumentando a condutância térmica da de contato (Fried, 1962), visto que as pastas possuem maior condutividade térmica que o ar.

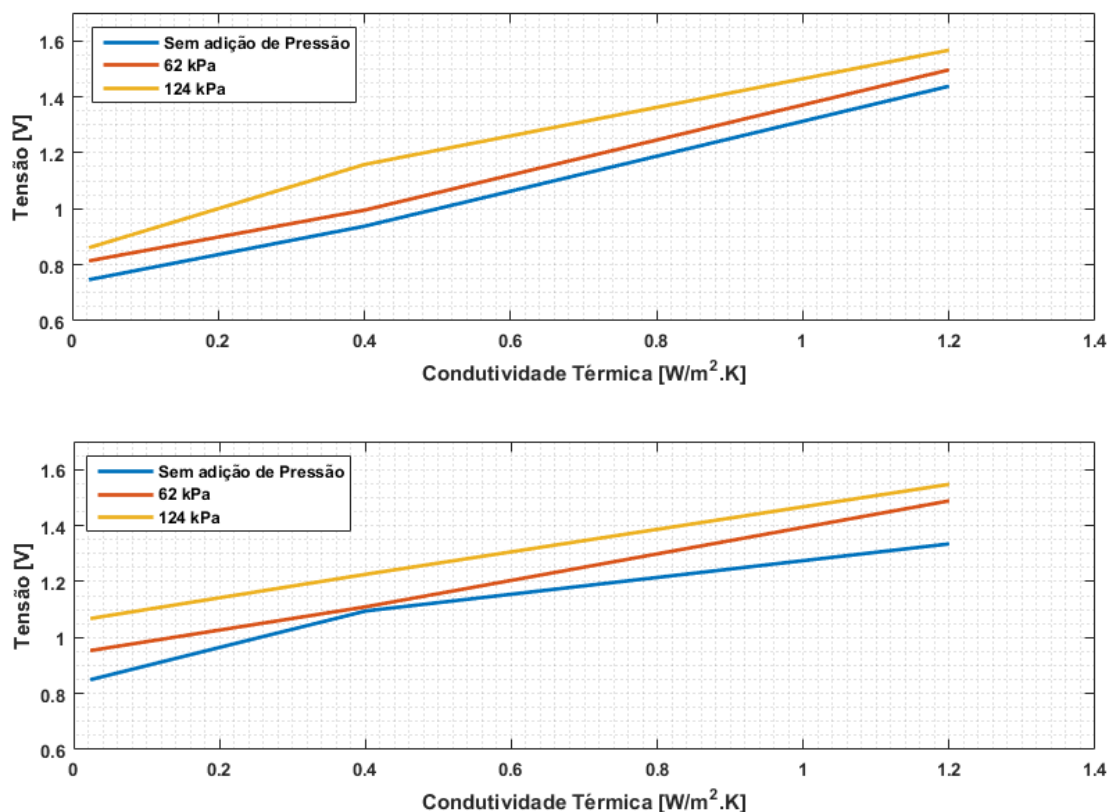


Figura 5. Valores de tensão de saída para o Par 1 (superior) e Par 2 (inferior) de dissipadores nos casos sem material intersticial, com a Pasta Térmica 1 e com a Pasta Térmica 2

A variação de pressão de contato gera aumentos bem mais sutis na voltagem de saída, o que indica uma tendência de que, para alguma pressão bastante elevada, não haja mais diferença no decréscimo da resistência térmica de contato (Barzelay et. al, 1955).

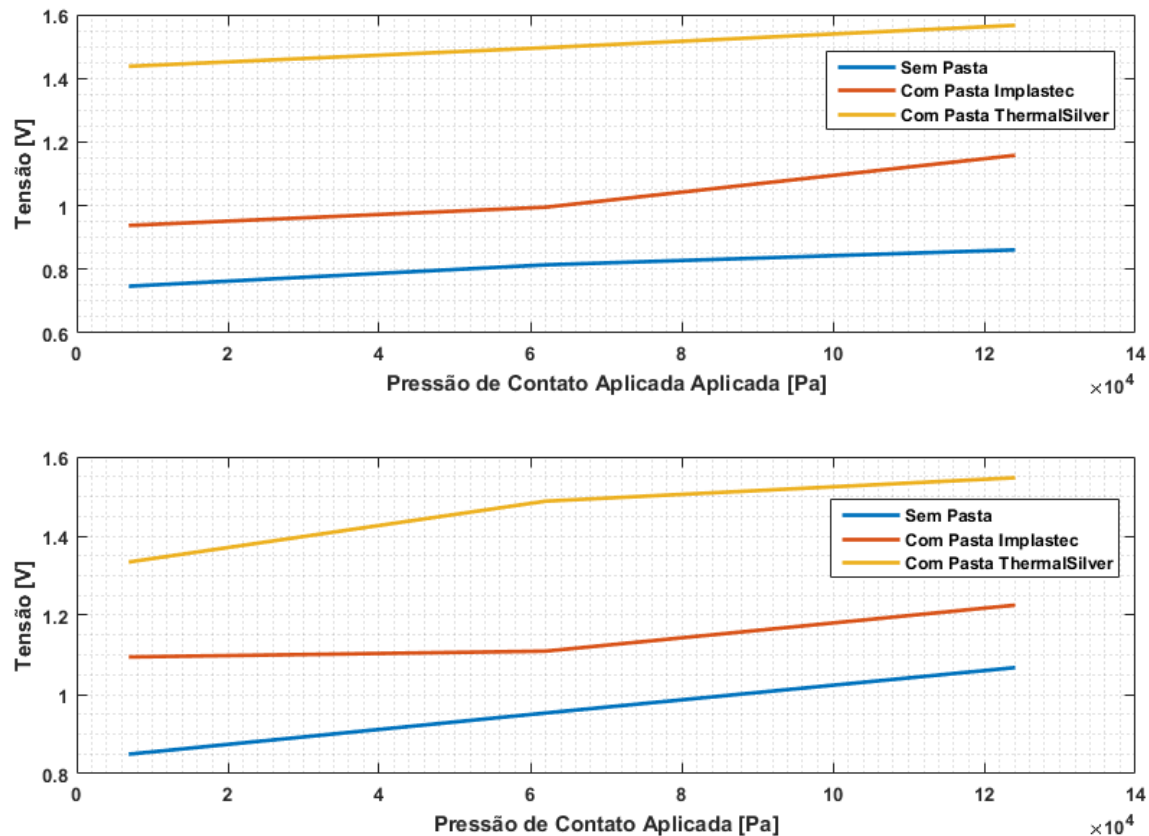


Figura 6. Valores de tensão de saída para o Par 1 (superior) e Par 2 (inferior) de nos casos onde não há pressão de contato adicional, aplicando-se 62 kPa (9 psi) e aplicando-se 124 kPa (18 psi)

Dados obtidos na literatura indicam que uma redução na rugosidade superficial gera redução na resistência térmica de contato (Çengel, 2006), aumentando o fluxo de calor e, conseqüentemente, a voltagem de saída. No entanto, os resultados obtidos experimentalmente não estão de acordo com a teoria, isso pode ser explicado pelo fato da rugosidade superficial ter característica microscópica, ou seja, não há meios de garantir o encaixe ideal entre duas superfícies e, pequenas variações de posição podem gerar grandes variações na resistência. Outro fator importante é o grau de dureza do material de que são compostas as superfícies, ou seja, para cada par de placas de material, iguais ou diferentes entre si, deverá haver uma relação empírica de condutância térmica.

Para comparar as voltagens de saída previstas pelo modelo analítico com as medidas experimentalmente, serão utilizados apenas os valores da configuração sem a presença de material intersticial devido à falta de dados ou equações que prevejam a variação da voltagem com a presença do mesmo. A Tab. 1 apresenta os valores teóricos e experimentais para cada par de dissipadores, com os três casos de pressão de contato considerados: sem pressão adicional, aplicando-se 62 kPa e 124 kPa.

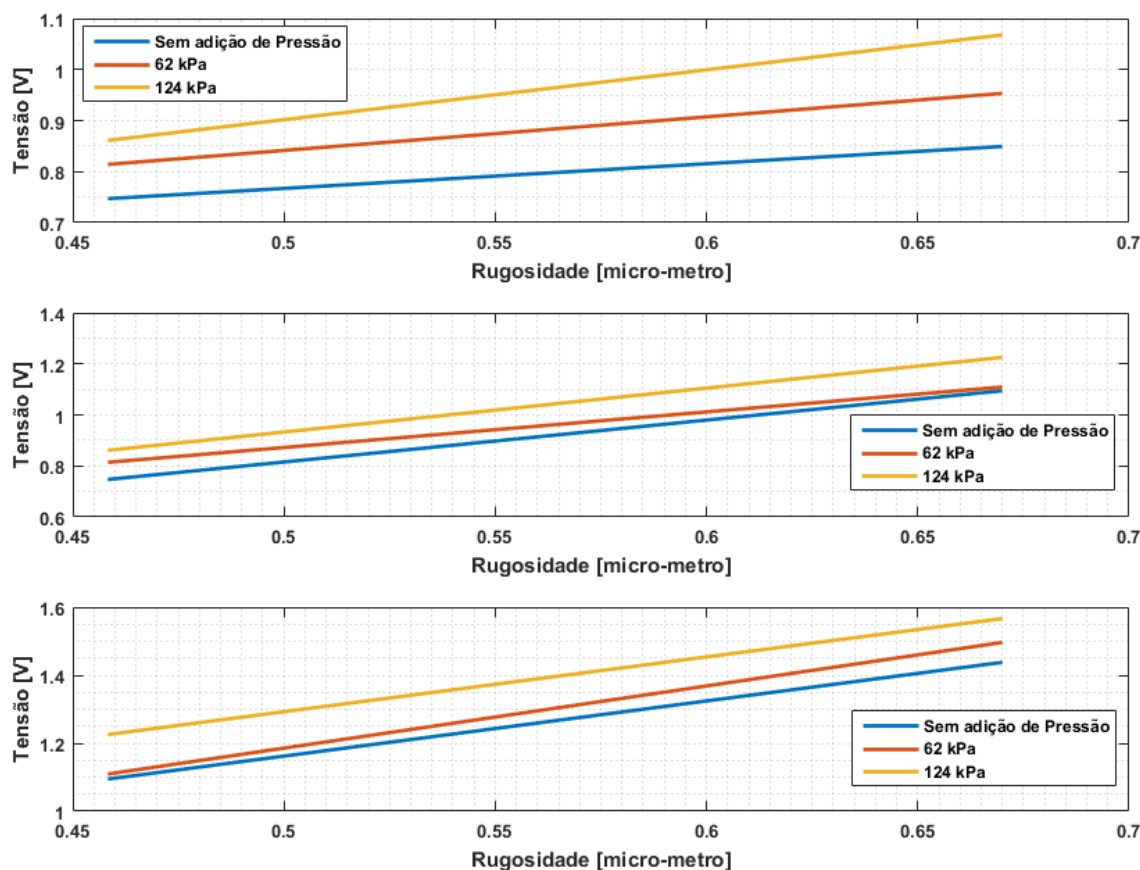


Figura 7. Valores de tensão de saída para os casos sem material intersticial (primeiro), com aplicação da Pasta Térmica 1 (segundo) e com aplicação da Pasta Térmica 2 (terceiro)

Tabela 1. Valores de tensão de saída teóricos e experimentais para os dois pares de dissipadores, na ausência de material intersticial e com três valores de pressão de contato.

Par de Dissipadores 1	Tensão Teórica [V]	Tensão Experimental [V]	Erro [%]
Sem Pressão Adicional	0,925	0,7469	23,96
62052 Pa	0,932	0,814	14,49
124106 Pa	0,941	0,8611	9,31
Par de Dissipadores 2	Tensão Teórica [V]	Tensão Experimental [V]	Erro [%]
Sem Pressão Adicional	0,937	0,849	10,38
62052 Pa	0,965	0,953	1,23
124106 Pa	0,965	1,067	10,66

5. CONCLUSÃO

Definir a resistência térmica de contato provou-se uma tarefa árdua, pois, apesar de ser comprovado que a mesma depende da rugosidade, pressão de contato e material intersticial, uma equação governante teórica não pôde ser definida visto que há a dependência de outros fatores que não puderam ser avaliados no presente trabalho, tais como variação da posição de montagem a qual provoca uma alteração no encaixe de duas superfícies e o material de que são compostas as interfaces entre os dissipadores e o módulo.

As fontes de erro presentes nos valores experimentais de tensão devem-se, principalmente, ao caráter rústico da bancada experimental, pois além de projetada, esta foi construída utilizando materiais simplórios visando alcançar o melhor resultado possível.

Para alcançar o objetivo comum de encontrar formas alternativas de geração elétrica e aumentar a eficiência de geradores termoelétricos, o estudo da transferência de calor atuante nos mesmos é imprescindível. Juntamente com avaliações de novos materiais, geometria ou regimes de operação, uma melhor compreensão da resistência térmica de contato pode desencadear um ganho expressivo na geração de energia e consequente aproveitamento de energia térmica de boa qualidade que seria desperdiçada ou mal aproveitada.

6. REFERÊNCIAS

- Anuário Estatístico de Energia Elétrica. 2013. Disponível em http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf.
- Barzelay, M E. 1955. *Effect of Pressure on Thermal Conductance*, National Advisory Committee for Aeronautics, Syracuse University, Washington, DC.
- Çengel, Y. A. 2006. *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach*, 3ª Ed., McGraw-Hill, Singapore.
- Churchill, S.W. and H, Ozoe. 1973. *Correlations for laminar forced convection in flow over an isothermal flat plate and in developing and fully developed flow in isothermal tube*, J. Heat Transfer 95, pp 78-84.
- Fried, E. 1969. *Thermal conduction contribution to heat transfer at contacts*, Thermal Conductivity, vol. 2, R. P. Tye. London: Academic Press.
- Gnielinski, V. 1976. *New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow*, International Chemical Eng. 16, pp 359-368.
- Jensen M. K. and VLAKEANCIC, A. 1997. *Experimental investigation of turbulent heat transfer and fluid flow in internally finned tubes*, International Journal of Heat and Mass Transfer 42, 1343-1351.
- Lawrence Livermore National Laboratory. 2013. Disponível em https://flowcharts.llnl.gov/content/energy/energy_archive/energy_flow_2013/2013USEnergy.png
- Rowe, D. M. 2006. *Thermoelectrics Handbook*, 1ª Ed., Taylor & Francis, Boca Raton, FL.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL CONTACT RESISTANCE EFFECT ON THERMOELECTRIC GENERATION USING PELTIER MODULES.

Abstract. To meet the growing global demand for energy, new forms of power generation are of extreme importance, as well as increasing the efficiency of existing methods. The present study intends to model analytically the heat transfer through a thermoelectric generator (TEG) comprised by a Peltier module. The thermoelectric generation from these modules have promising future prospects, as they are light, small and targets of continuous improvement. It was designed the implementation of a TEG in a vehicular exhaust for recovery of thermal energy present in the exhausting gases. Aiming this application, many variables shown to be relevant: flow characteristics, use of heat sinks, their geometry and composition and, mainly, the description of the interface between the surfaces of the module and the heat sinks. In this interface, the contact thermal resistance is a function of mounting pressure, surface roughness and the presence of interstitial material. After modeling the heat transfer, was implemented a numerical code to assess the sensitivity of the output voltage and contact resistance of the module with changes in the TEG operating conditions. Furthermore, to evaluate the simulated results, was developed an experimental bench reproducing TEG operating conditions, under the effect of different temperatures, flow velocities, contact pressures, roughness and interstitial material. With the use of only one module, the theoretical values for the output voltage was in the range of 0.92V and 0.97V for the worst and best case respectively, and the values of experimental measurements under the same operating conditions provided 0.75V and 1.07V. The discrepancy found between the theoretical and experimental approach resulted in a maximum relative error of 22.7%. The best output voltage values were obtained when minimized the thermal contact resistance, indicating that this is a way to increase the efficiency of a TEG and help meet the current demand of energy.

Key words: Peltier module, thermoelectric generation, thermal contact resistance.