



INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO FUNCIONAMENTO DE UM GERADOR TERMOELÉTRICO DO TIPO *TEG* E DA INFLUÊNCIA DA FORÇA DE APERTO EM SEU DESEMPENHO

Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@alunos.utfpr.edu.br
Luis Vitorio Gulinelí Fachini, luisfachini@alunos.utfpr.edu.br
Guilherme Antônio Bartmeyer, gabartmeyer@hotmail.com
Carlos Henrique Diedrich, chd145@hotmail.com
Romeu Miqueias Szmoski, rmszmoski@gmail.com
Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330 - Jardim Carvalho - CEP 84017-220 - Ponta Grossa - PR – Brasil.

Resumo. Este estudo compreende a investigação experimental da influência da força de aperto sobre a geração de potência elétrica de um gerador termoelétrico por meio do efeito Seebeck. Esse efeito consiste na movimentação de elétrons proveniente da exposição de uma junção de dois materiais distintos a um gradiente de temperatura, podendo então ser responsável pelo aproveitamento de energia em atividades industriais em que há a ocorrência de calor residual. Neste contexto, no presente estudo um gerador termoelétrico foi submetido a diferentes gradientes de temperaturas, sendo utilizados resistores no sistema de aquecimento que simula o calor residual e um trocador de calor como forma de arrefecimento a proporcionar tais gradientes, além de diferentes forças de aperto obtidas pela aplicação de diferentes massas ao sistema. Os resultados demonstram medições da potência gerada pelo gerador termoelétrico em função da potência dissipada nos resistores e da força de aperto exercida sobre o sistema.

Palavras chave: Reaproveitamento de energia. Termogerador. Efeito Seebeck. Calor Residual.

1. INTRODUÇÃO

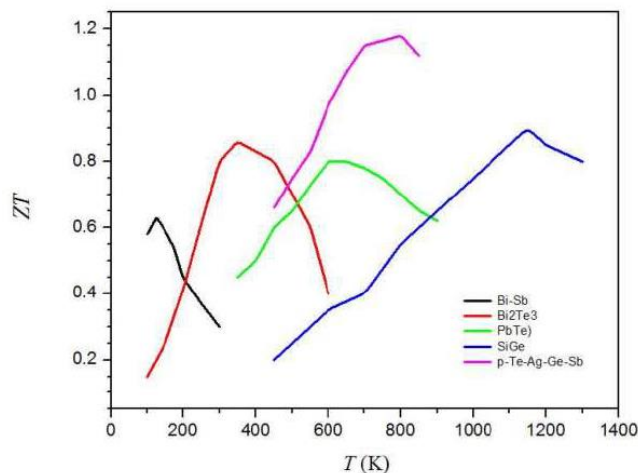
Os materiais termoelétricos são aqueles capazes de converter gradientes de temperatura diretamente em eletricidade devido a um fenômeno conhecido como efeito *Seebeck* (Nascimento *et al.*, 2012). Tal efeito, estudado e descoberto em 1821 pelo cientista *Thomas Seebeck*, mostra que a união de dois metais diferentes sob o efeito de um gradiente de temperatura faz com que os elétrons se movimentem, gerando corrente elétrica (Ando Junior, 2014; Fernandes, 2012; Gonçalves, 2008).

O módulo de *Peltier* utilizado para geração de energia elétrica a partir de uma fonte de calor, também conhecido como *thermoelectric generator* (TEG), é a maneira mais prática para utilização do efeito *Seebeck*, uma vez que consiste em um arranjo de pequenos blocos de telureto de bismuto (Bi_2Te_3) dopado tipo *N* e tipo *P*, montados de maneira alternada, eletricamente em série e termicamente em paralelo, entre duas placas de boa condução térmica. A dopagem eletrônica consiste em adicionar elementos químicos de maneira controlada para fazer com que um semicondutor passe a conduzir energia elétrica mais facilmente, sendo que na dopagem do tipo *N* o átomo da estrutura cristalina é substituído por outro com um número maior de elétrons na camada de valência, enquanto na dopagem do tipo *P* os átomos introduzidos na estrutura cristalina do semicondutor possuem deficiência de elétrons em relação aos do semicondutor (Moura, 2010).

O material termoelétrico ideal é aquele que apresenta elevado coeficiente *Seebeck*, baixa condutividade térmica e alta condutividade elétrica, sendo essas características que compõem a Figura de Mérito *Z* (Fig. 1). Isso se deve ao fato de que uma alta condutividade elétrica reduz o efeito *Joule*, um coeficiente de *Seebeck* alto maximiza a conversão de calor em eletricidade e uma baixa condutividade térmica ajuda a manter o calor numa única junção ao manter o gradiente de temperatura entre as junções (Fernandes, 2012).

Neste contexto, o presente trabalho propõe uma pesquisa científico-tecnológica de caráter experimental sobre a influência da força de aperto como possível forma de se elevar a eficiência de um gerador termoelétrico.

Figura 1. Relação da figura de mérito de algumas ligas com a temperatura (Fernandes, 2012)



2. METODOLOGIA

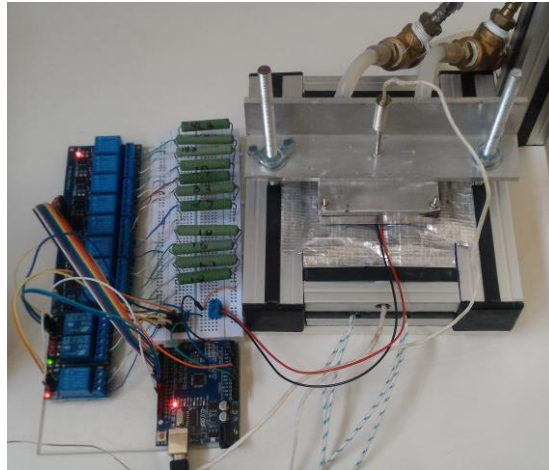
A bancada experimental, mostrada na Fig. 2, foi composta por um *notebook Dell*TM, um *nobreak NHS*TM, um bloco de alumínio contendo resistências elétricas de cartuchos, um gerador termoelétrico TEG1-12611-6.0, um trocador de calor arrefecido por água, um sistema automatizado de variação de cargas resistivas controlado por *Arduino*TM, um sistema de aquisição de dados *Agilent*TM 34970A com um multiplexador *Agilent*TM 34901A de 20 canais, duas fontes de alimentação *Politem*TM 16E, um banho ultratermostatzado *SOLAB*TM SL-130 e um rotâmetro de área variável *Omega Engineering*TM FL-2051 com válvula reguladora.

Figura 2. Bancada Experimental



Os testes experimentais consistiram em simular um gradiente de temperaturas ao gerador termoelétrico e obter seus dados de potência em função dos gradientes ao qual esse foi submetido. Para isso, foi utilizado um módulo de aquecimento composto por dois resistores de cartucho de 250 W de potência associados em paralelo e inseridos em um bloco de alumínio, além de um trocador de calor arrefecido a água, que consiste em um bloco de alumínio com uma série de canais usinados em seu interior, permitindo o escoamento de água. A Figura 3 ilustra o aparato experimental e o sistema de aquisição de dados de cargas resistivas.

Figura 3. Aparato Experimental



Os resistores de cartucho foram conectados a duas fontes de potência conectadas em paralelo, de forma que, para obter diferentes gradientes de temperatura, variou-se a DDP das fontes de forma a se aumentar a potência dissipada pelos resistores por meio do efeito *Joule*. A DDP foi variada de 0 a 320 W de 40 em 40 W. A temperatura ambiente foi mantida em 16 °C, mesma temperatura da água que escoo pelo trocador de calor, fornecida pelo banho ultratermostatizado, de forma que se evite a troca térmica entre o trocador de calor e o ambiente. O gerador termoelétrico foi posicionado entre o módulo de aquecimento e o trocador de calor, sendo utilizada pasta térmica no contato entre as superfícies para se aumentar a eficiência da troca de calor entre essas.

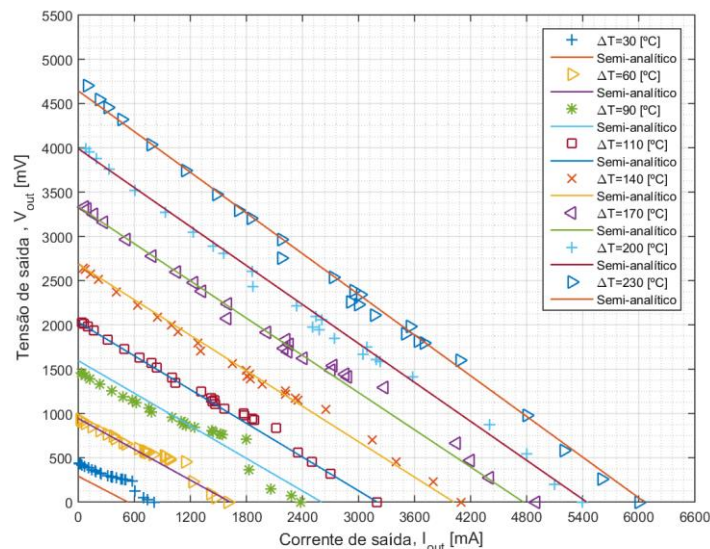
Para obtenção dos valores de potência gerada pelo TEG, esse foi submetido a cargas resistivas controladas por um microcontrolador *Arduino™* UNO. Esse sistema comuta cargas resistivas pela associação de diferentes resistores em paralelo por meio da ativação de diferentes relés, e foi responsável por coletar dados de tensão e potência do gerador. O sistema de aquisição de dados somente foi acionado quando o sistema térmico entrou em regime permanente.

Primeiramente foi realizado um teste preliminar para validar o sistema de aquisição de dados, o qual foi realizada uma força apenas para manter todo o sistema fixo, sendo que posteriormente foram realizados testes com quatro forças de aperto distintas, sendo essas aplicadas por meio de barras chatas e blocos de aço posicionados sobre a chapa de aço contida no aparato experimental. As forças de aperto utilizadas foram: 0,138 kgf; 2,238 kgf; 4,704 kgf e 8,296 kgf.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta uma comparação entre os dados de corrente [mA] e tensão [mV] obtidos experimentalmente em função do gradiente de temperaturas e os valores de tensão obtidos por meio da curva do gerador. Os dados experimentais foram comparados com curvas semi-analíticas.

Figura 4. Tensão de saída V_{out} [mV] versus corrente de saída I_{out} [mA] para diferentes gradientes de temperatura



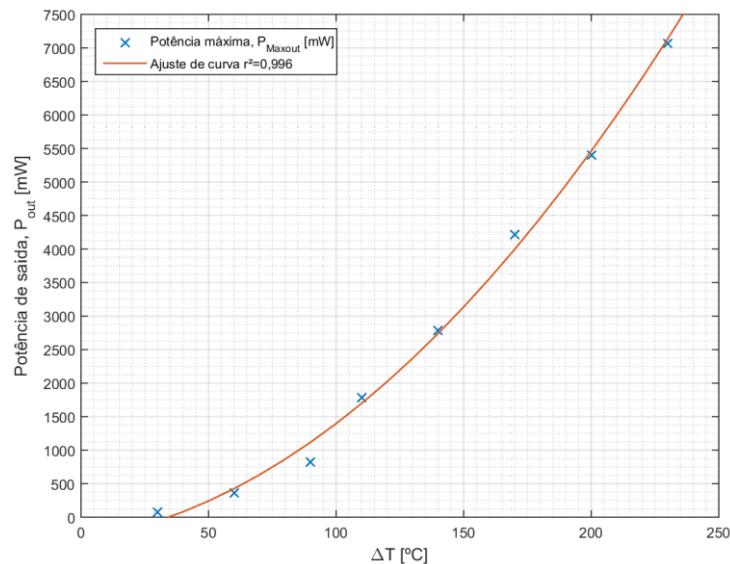
As curvas semi-analíticas foram obtidas a partir da equação de um gerador elétrico, apresentada na Eq. (1), em que V_{out} corresponde a tensão útil do gerador, V_{cc} corresponde a sua tensão de circuito aberto, ao passo que I e R_{int} correspondem a corrente e a resistência interna do gerador, respectivamente. Por meio de resultados experimentais, foram obtidas expressões para V_{cc} e R_{int} em função do gradiente de temperaturas. Essas expressões foram substituídas na Eq. (1) e foi obtida uma expressão para a tensão do gerador em função de sua corrente e gradientes de temperatura, a qual pode ser observada na Eq. (2), em que ΔT representa o gradiente de temperaturas. Pode ser notado pela Fig. 4 que os dados experimentais apresentam comportamento muito semelhante ao das curvas semi-analíticas, validando então o método experimental.

$$V_{out} = V_{cc} - I.R_{int} \quad (1)$$

$$V_{out} = 21,664.\Delta T - (1,092.10 - 3.\Delta T + 0,515).I - 343,27 \quad (2)$$

Para as condições utilizadas nessa investigação preliminar, os dados de potência gerada em função do gradiente de temperatura são apresentados na Fig. 5. Pode ser notado que com o aumento do gradiente de temperatura, existe um aumento da potência gerada, o que é justificado pela definição do efeito *Seebeck*, uma vez que quanto maior a energia térmica disponível, maior a energia que permite a movimentação dos elétrons, aumentando então os valores de corrente e tensão do gerador, conseqüentemente, aumentando sua potência gerada.

Figura 5. Potência de saída P_{out} [mW] versus diferença de temperatura ΔT [°C]



Para os testes experimentais com diferentes forças de aperto, a Fig. 6 apresenta os resultados de potência gerada pelo termogerador em função da potência dissipada pelo módulo de aquecimento e a força de aperto.

Tratando-se da força de aperto de 0,138 kgf, foram obtidos resultados apenas até a $P_{dis} = 160W$ por motivos de segurança, uma vez que a temperatura do módulo de aquecimento ultrapassou 270 °C. Pela Figura 6 pode ser observado que em geral, quanto maior a força de aperto, maior a potência gerada pelo TEG. Isso se deve à redução da resistência térmica de contato entre o gerador e os outros componentes, fazendo com que a potência seja dissipada de forma mais eficiente para o gerador termoelétrico, proporcionando um maior ΔT ao qual o termogerador é submetido, e fazendo com que a hipótese de que a superfície do módulo de aquecimento e a superfície do TEG estejam na mesma temperatura seja cada vez mais próxima da realidade. Analisando esta figura também pode ser verificado que para a P_{dis} de 280W foram gerados praticamente os mesmos valores de potência para as forças de aperto (F_{ap}) de 4,704 kgf e 8,296 kgf. Esse fato pode ser melhor visualizado pela Fig. 7.

Figura 6. Potência de saída em função da potência dissipada

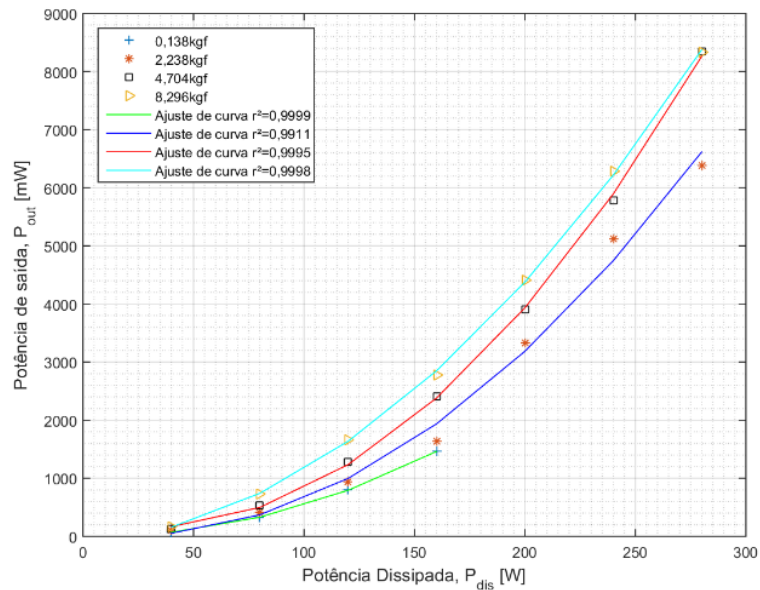
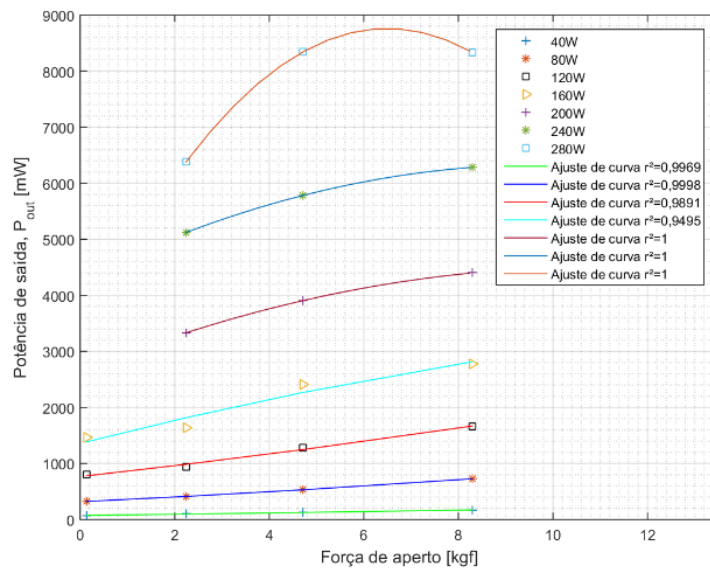


Figura 7. Potência de saída em função da força de aperto



Surgem então duas hipóteses para tal fato, ambas envolvendo o ΔT a qual o TEG foi exposto. A primeira hipótese consiste no fato de que o ΔT mais elevado ocasionou a geração de uma potência elevada o suficiente para aquecer os resistores que compõem o sistema de aquisição de dados, alterando então sua resistência e afastando do valor de resistência interna do gerador. Tratando-se da segunda hipótese, essa é formulada com base na Fig. 1. Pode ser observado em tal figura que, para o telureto de bismuto, ocorre um decréscimo na Figura de Mérito a partir de certo valor de temperatura, ou seja, as propriedades físicas do material se afastam das ideais necessárias para maximizar a geração de energia. Com isso, o ΔT atingido pode estar em uma faixa de temperatura em que se alteram as condutividades térmicas e elétricas, fazendo com que parte da energia disponível seja dissipada na forma de calor ao invés de convertida em energia elétrica.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados de potência elétrica gerada em função da potência dissipada e da força de aperto. Pode ser notado que a maior potência gerada ocorreu para a força de 4,704 kgf, sendo essa de aproximadamente 8,34 W, correspondendo a uma eficiência de 2,98 %.

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos

P_{dis} [W]	P_{out} [mW]			
	0,138kgf	2,238kgf	4,704kgf	8,296kgf
40	72,57	99,79	123,20	171,55
80	322,33	415,98	527,90	727,49
120	801,12	933,40	1287,34	1659,38
160	1460,03	1634,61	2406,91	2779,73
200	-	3331,36	3905,09	4402,04
240	-	5121,50	5780,91	6285,15
280	-	6377,88	8339,70	8334,64

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma investigação experimental do funcionamento de um gerador termoelétrico do tipo TEG e também da influência da força de aperto na potência elétrica gerada por um gerador termoelétrico. Os resultados obtidos indicam que, em geral, ocorre um aumento na potência gerada pelo gerador com o aumento da força de aperto e gradiente de temperaturas a que esse está submetido. A comparação entre resultados experimentais e semi-analíticos foi satisfatória, validando o método experimental. Dentre as forças de aperto foi verificado que a que permitiu a maior geração de potência elétrica foi a de 8,296 kgf, apresentando uma geração de aproximadamente 8,34 W para uma potência dissipada de 280 W. Desta forma fica evidenciado que a força de aperto exerce influência significativa no desempenho de um gerador termoelétrico, sendo então necessários cada vez mais estudos acerca desse parâmetro, utilizando maiores faixas de análise de forma a se buscar um aumento em sua potência elétrica gerada e, consequentemente sua eficiência, contribuindo para que se possa reaproveitar o calor residual de diversos processos e gerar energia sem impactos negativos ao meio ambiente.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à CAPES, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e ao Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa.

6. REFERÊNCIAS

- ANDO JUNIOR, O. H. Protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no Efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável. 2014. 165f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- Fernandes, A. E. S. S. Conversão de energia com células de Peltier. 97f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2012.
- Gonçalves, L. M. V. Microsistema termoelétrico baseado em teluretos de bismuto e antimônio. 198f. Tese (Doutorado em Electrónica Industrial). Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Guimarães, 2008.
- Moura, J. A. S. Filmes nanométricos de FeN e AlN crescidos por Sputtering e aplicações do efeito Peltier. 147f. Tese (Doutorado em Física). Centro de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.