

3.12.99 – Engenharia Aeroespacial.

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO POSICIONAMENTO DE UM GERADOR TERMOELÉTRICO EM CUBESATS

André Luiz A. Ostrufka^{1*}, Anderson W. Spengler², Kleber V. de Paiva³

1. Estudante de IC do Centro Tecnológico de Joinville da UFSC

2. CTJ-UFSC - Doutor – Co-orientador

3. CTJ-UFSC - Doutor - Orientador

Resumo:

O objetivo deste trabalho consiste em uma avaliação experimental do desempenho de um gerador termoeletrico (TEG) para a geração de energia elétrica através de gradientes de temperatura em CubeSats ao longo de uma órbita. O desempenho é avaliado a partir da capacidade de geração em diferentes configurações de posicionamento do TEG em relação aos painéis solares do CubeSat, considerando dois tipos de circuitos de energy harvesting, que armazenam e gerenciam a energia gerada.

A partir de dados de temperatura de um projeto de CubeSat real, com uma órbita de 51.5° de inclinação, foi possível determinar a posição do TEG de maior capacidade de conversão de energia. Como resultado, uma mesma configuração apresentou melhor desempenho para ambos os circuitos de energy harvesting analisados, e através de uma análise comparativa entre o sistema de geração com o TEG e com os painéis solares, constatou-se que o sistema proposto pode gerar até 38.5% da energia gerada pelo sistema convencional.

Palavras-chave: Geração de energia; Gradientes de Temperatura; Circuitos de Energy Harvesting.

Apoio financeiro: CNPq.

Trabalho selecionado para a JNIC pela instituição: UFSC.

Introdução:

Os CubeSats, que consistem em modelos de nanossatélites com peso e dimensões padrão, vêm se tornando soluções cada vez mais populares no meio científico e acadêmico, pois devido ao baixo custo e a menor complexidade, é possível que universidades, institutos de pesquisa e empresas possam também contribuir com o setor espacial através do desenvolvimento de seus próprios nanossatélites [1].

A captação e armazenamento de energia é uma das áreas mais desafiadoras no desenvolvimento de CubeSats, uma vez que os recursos energéticos no espaço são bastante limitados e todos os subsistemas precisam de energia para se manterem em operação. Atualmente, a principal forma de captação de energia no espaço é por meio de painéis solares, que geram energia através da conversão da energia luminosa em energia elétrica [2]. Porém, existem algumas limitações com o uso desta tecnologia, como a dependência do contato direto com os raios solares, que faz com que a captação de energia cesse nos momentos de eclipse, assim como o próprio limite de eficiência das células solares, que está diretamente relacionado aos materiais que compõem tais dispositivos. Essas e outras limitações contribuíram para que novos estudos de formas alternativas de geração de energia no espaço fossem realizados, buscando soluções que permitam uma captação contínua, principalmente quando a captação solar não é possível.

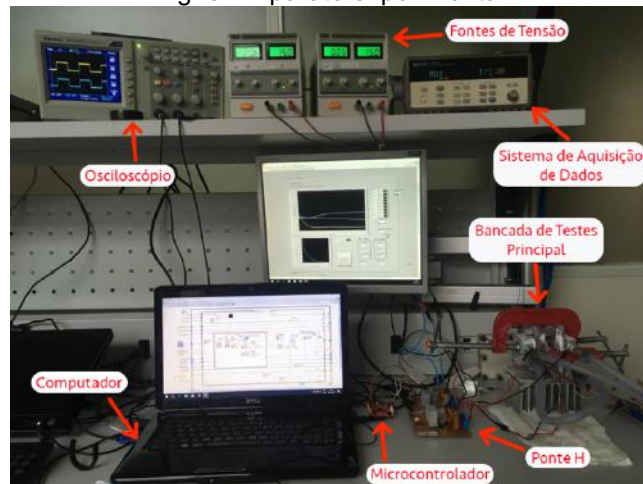
Neste contexto, os dispositivos termoeletricos, também conhecidos como TEGs, que são capazes de converter energia térmica em energia elétrica [3], apresentam-se como uma das alternativas encontradas para utilizar os gradientes de temperatura existentes em um satélite como fonte energética.

Portanto, este trabalho tem como objetivo analisar, como uma solução paralela aos painéis solares para geração de energia no espaço, o desempenho de geração de energia de um TEG através de uma avaliação experimental em bancada para diferentes configurações de posicionamento em um CubeSat. Através da variação dos gradientes de temperatura de forma experimental, usando como referência valores simulados de temperaturas nas faces do FloripaSat, que é um nanossatélite integralmente projetado pela UFSC [4], pode-se avaliar o desempenho do TEG durante a órbita planejada, avaliando as condições de maior eficiência para a geração de energia, validar o desempenho do aparato experimental para a realização dos testes e comparar o potencial de geração do sistema TEG com o sistema de geração por painéis solares.

Metodologia:

Para simular as variações de temperatura nas faces do TEG durante uma órbita do FloripaSat de forma experimental, assim como avaliar o perfil de tensão gerado pelo TEG durante este período, foi desenvolvida uma bancada de testes que permite um controle dinâmico da variação dos gradientes de temperatura simulados. A Fig. 01-a mostra o aparato experimental utilizado, incluindo todos os componentes do sistema.

Fig. 01: Aparato experimental

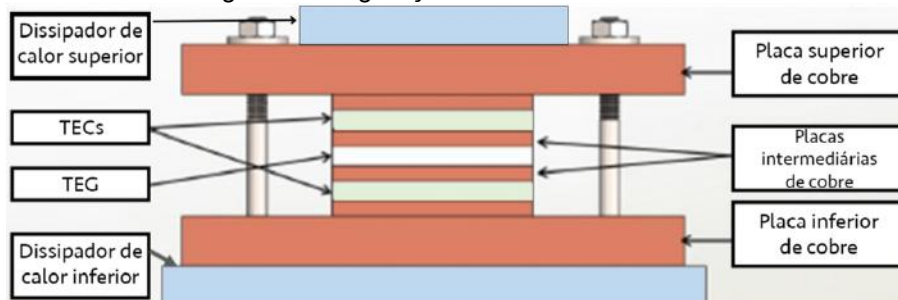


Fonte: Autor

O sistema consiste em uma bancada de testes principal, responsável por gerar fisicamente os gradientes de temperaturas sobre o TEG. Todos os dados de temperatura são lidos por um sistema de aquisição de dados e enviados para um computador responsável por armazená-los. Além disso, os dados são usados em um controlador PID que dita a variação de temperatura do sistema de acordo com os perfis simulados em software referentes ao nanossatélite FloripaSat. Através do software LabVIEW [5], os comandos do controlador PID são enviados para um microcontrolador que gera sinais PWM de controle, que em seguida são amplificados através de dois circuitos de ponte H que controlam os atuadores de temperatura na bancada de testes. Os circuitos de ponte H são alimentados por duas fontes de tensão externa.

A bancada de testes, ilustrada na Fig. 02, visa simular fisicamente todas as condições de variação de temperatura encontradas entre as duas superfícies do TEG durante a órbita. Para tornar isso possível, dois TECs são usados para gerar os gradientes de temperatura desejados, sendo localizado um em cada lado do TEG. Os TECs são dispositivos termoelétricos caracterizados por aquecer uma de suas superfícies, enquanto a outra é resfriada, por isso, a função dos TECs na bancada de testes é exclusivamente de gerar a temperatura desejada nos lados em contato com o TEG. Entre cada dispositivo termoelétrico, placas de cobre são colocadas para conduzir o calor entre os TECs e o TEG. Por fim, todo o calor gerado nos extremos da bancada deve ser dissipado, portanto, dissipadores de calor são usados em ambos os extremos da bancada para remover o calor nas extremidades.

Fig. 02: Configuração da bancada de testes



Fonte: Adaptado de [6]

Para avaliar se a bancada de testes consegue gerar os gradientes de temperatura esperados, foram utilizados termopares do tipo T para medir a temperatura em algumas posições da bancada em tempo real. Foram colocados 3 termopares em cada superfície do TEG para medir com precisão as temperaturas das faces e alimentar o controlador PID, e 1 termopar em cada superfície externa dos TECs, para monitorar os valores de temperatura nas regiões de dissipação de calor. Todos os termopares estão conectados ao sistema de aquisição de dados que lê cada medição dos termopares em intervalos de tempo determinados, além de armazenar e enviar os dados para o computador. Este equipamento também adquire os valores de tensão gerados pelo TEG durante o experimento.

Resultados e Discussão:

Sabendo que um CubeSat tem formato cúbico, foram realizados experimentos para as 6 configurações de posicionamento possíveis do TEG referente às faces do CubeSat, sendo estas nomeadas de 1 a 6. Porém, para explicar como as análises foram feitas, apenas alguns casos específicos serão mostrados.

O controlador PID faz com que os valores de temperatura medidos pelos termopares tendam a se igualar aos valores de referência que variam de acordo com os perfis simulados da órbita do nanossatélite FloripaSat. Como vemos na Fig. 03-a, referente a uma das configurações de posicionamento, os valores de

temperatura dos termopares tendem a ser muito próximos dos valores de referência, nomeados como "T inferior" e "T superior". Todavia, quando o gradiente de temperatura ultrapassa um valor aproximado de 35°C, há uma divergência entre os valores esperados e os valores lidos, como vemos na parte final do gráfico da Fig. 03-a. Contudo, realizando outro teste, nas mesmas condições, porém substituindo o TEG por uma borracha, que é um material isolante térmico, como mostrado na Fig. 03-b, observou-se que a divergência não mais ocorreu, o que prova que a origem da diferença é proveniente da condução térmica do próprio TEG, e não de alguma falha do experimento. Portanto, o aparato experimental foi capaz de reproduzir fielmente o comportamento esperado em órbita.

Fig. 03-a: Temperaturas - Posição Célula 1 (TEG)

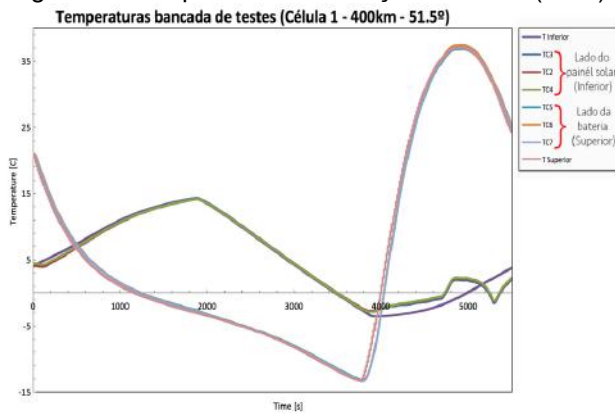
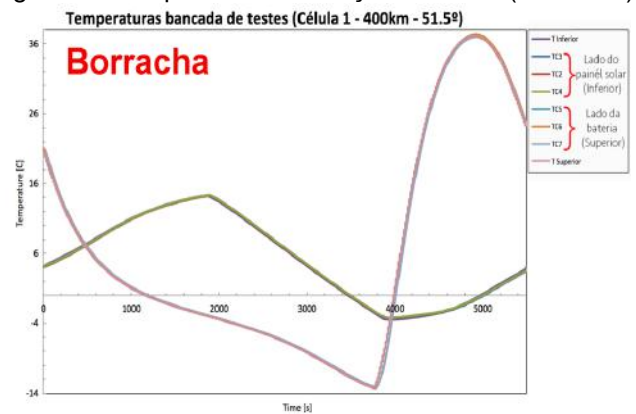


Fig. 03-b: Temperaturas - Posição Célula 1 (Borracha)



Fonte: Autor

Além das temperaturas, o sistema de aquisição de dados também captura a tensão gerada pelo TEG ao longo da órbita, como mostrado na Fig. 04-a. Através dos resultados de [7], que a partir de testes práticos concluiu que o perfil de variação da resistência interna do TEG com a temperatura é praticamente linear, foi possível estimar a curva de potência gerada pelo TEG, como mostrado na Fig. 04-b, através da fórmula abaixo:

$$P_{inst} = \frac{V_{inst}^2}{R_{in}(T)}$$

Fig. 04-a: Tensão Gerada - Posição Célula 1

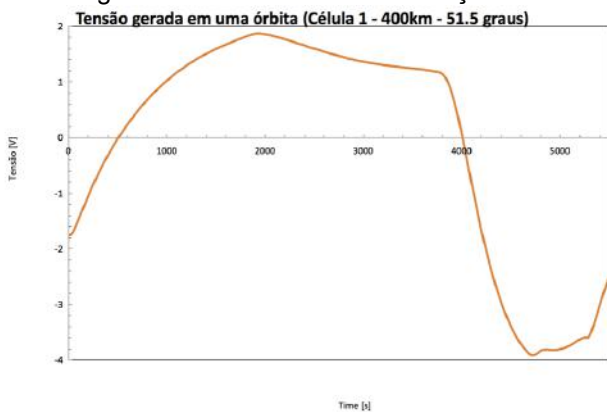


Fig. 04-b: Potência Gerada - Posição Célula 1



Fonte: Autor

Finalmente, integrando a curva de potência sobre todo o período da órbita, é possível estimar o valor da energia total gerada, que neste caso, foi representado na unidade Watt-Hora.

Esse sistema será futuramente testado no espaço como uma das cargas úteis do FloripaSat, com o intuito de validar os resultados em condições reais. Além do TEG, o circuito de energy harvesting também fará parte da carga útil, portanto, foram analisados dois tipos de circuitos de energy harvesting com os resultados obtidos nos experimentos. O primeiro tipo permite que a energia seja armazenada independentemente do sentido da tensão de entrada, conseguindo armazenar completamente a energia durante toda a órbita. Já o segundo, permite o armazenamento apenas quando a tensão apresenta um sentido único, o que limita o domínio de órbita em que a energia é armazenada, uma vez que para alguns casos o sentido dos gradientes se invertem, consequentemente invertendo o sentido da tensão gerada.

Portanto, a Tabela 01 mostra os valores de energia gerada, considerando as duas configurações de energy harvesting e incluindo uma análise de erro experimental [8] previamente realizada.

Tabela 01: Energia gerada em uma órbita para cada configuração de posicionamento do TEG

Configuração de Posicionamento do TEG	Energia Total Gerada [Watt-Hour]	Energia Parcial Gerada (Tensão +) [Watt-Hour]	Energia Parcial Gerada (Tensão -) [Watt-Hour]
Célula 1	1.057 ± 0.003	0.3310 ± 0.0005	0.726 ± 0.003
Célula 2	0.6380 ± 0.0004	0.6380 ± 0.0004	–
Célula 3	0.835 ± 0.002	0.2529 ± 0.0005	0.582 ± 0.002
Célula 4	0.6952 ± 0.0006	0.0703 ± 0.0003	0.6249 ± 0.0005
Célula 5	0.08319 ± 0.00009	0.03811 ± 0.00005	0.04508 ± 0.00007
Célula 6	0.001890 ± 0.000009	0.001807 ± 0.000009	0.0000830 ± 0.0000003

Fonte: Autor

Como podemos ver, para o caso do circuito de energy harvesting que permite o armazenamento independentemente do sentido da tensão, a Célula 1 apresentou o melhor desempenho, gerando $1.057 \pm 0.003 Wh$ durante a órbita. Já para o caso do circuito de energy harvesting que permite o armazenamento apenas em períodos que a tensão gerada apresenta um sentido específico, a Célula 1 novamente apresentou melhor desempenho, podendo gerar $0.726 \pm 0.003 Wh$ durante a órbita.

Para avaliar a relevância do uso de TEGs como uma alternativa paralela para a geração de energia no espaço, foi realizada uma comparação entre a capacidade de geração dos dois sistemas. De acordo com [4], cada painel solar possui uma área efetiva de $60.36 cm^2$. Além disso, a capacidade total de geração de todos os 6 painéis juntos é de $3.242 Wh$ por órbita. Uma vez que a área do TEG usado nos experimentos é de $16 cm^2$, uma extrapolação linear de área foi feita para estimar a quantidade proporcional de energia gerada por um TEG de área equivalente. Considerando 6 TEGs nessas configurações, chegou-se a um valor total de energia gerada de $12.489 Wh$, porém, sabendo que os circuitos de energy harvesting possuem uma baixa eficiência, apenas uma pequena parcela pode ser armazenada. Utilizando uma abordagem conservadora, foi assumido que 10% da energia gerada pelos TEGs podem ser armazenadas, o que resulta em um valor final de $1.249 Wh$ em uma órbita, o que representa 38.5% da energia gerada apenas pelo conjunto de painéis solares. Além disso, se ambas as tecnologias fossem usadas em conjunto, seria possível gerar até $4.491 Wh$ em uma órbita.

Conclusões:

O aparato experimental desenvolvido foi capaz de gerar os gradientes de temperatura desejados na maioria dos casos analisados, sendo que quando o gradiente de temperatura excede $35^\circ C$, observa-se uma divergência que ocorre devido a condução térmica do TEG, comprovada através de testes utilizando uma borracha no lugar do TEG.

Para os dois tipos de circuitos de energy harvesting analisados, a configuração de posicionamento da Célula 1 apresentou o melhor desempenho, gerando $1.057 \pm 0.003 Wh$ para o circuito que armazena a energia independentemente do sentido da tensão, e $0.726 \pm 0.003 Wh$ para o circuito que armazena apenas em um sentido único de tensão.

Além da análise de geração de energia devido ao posicionamento, também foi feita uma análise comparativa de geração entre os sistemas de TEGs e dos painéis solares. Assumindo que ambos os sistemas possuem quantidades e dimensões equivalentes, observou-se que o sistema TEG pode gerar até 38.5% da energia gerada pelo conjunto de painéis solares.

Referências bibliográficas

- [1] S. Waydo, et al., **CubeSat Design for LEO-Based Earth Science Missions**, IEEE Aerospace Conference Journal, Washington D.C., set. 2002.
- [2] H. A. Zahl, H. K. Ziegler, **Power sources for satellites and space vehicles**, Solar Energy. 4 (1960) 32-38.
- [3] P. Huen, W. A. Daoud, **Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators**, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 72 (2017) 1295-1302.
- [4] UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. **The FloripaSat Project**. 2017. Disponível em: <<https://www.gitbook.com/book/tuliojgomesp/floripasat-technical-manual/details>> Acesso em: 13 maio 2017.
- [5] NI, National Instruments. **What is LabVIEW?** 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/newsletter/51141/en/>>. Acesso em: 24 maio 2017.
- [6] D. B. S. Becker, **Automação de um sistema caracterizador de dispositivos termoeletrônicos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2016.
- [7] D. M. P. Audiffred, **Utilização de dispositivos termoeletrônicos para geração de energia elétrica em nanosatélites**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2015.
- [8] FCTUC, Departamento de Física. **Introdução ao cálculo de erros nas medidas de grandezas físicas**. 2004. Disponível em: <http://fisica.uc.pt/data/20072008/apontamentos/apnt_221_1.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2017.