

## MÓDULO TERMOELÉTRICO ACOPLADO EM DUTOS DE EXAUSTÃO: MODELAGEM E APLICAÇÃO

R.N. Santos<sup>1</sup> (IC), D. Thomazini<sup>1</sup> (PQ) e M. V. Gelfuso<sup>1</sup> (PQ)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

**Palavras-chave:** Módulo termoelétrico cerâmico. Análise CFD. Eficiência energética.

### Introdução

O cenário energético global enfrenta uma crescente demanda associada à necessidade de reduzir impactos ambientais (IRENA, 2022). Nesse contexto, geradores termoeletricos (TEGs) cerâmicos, baseados no efeito Seebeck, são promissores para sistemas térmicos de baixa temperatura, na faixa de 400 a 600 °C (Yuan *et al.*, 2023). Relacionado a isso, estudos estão sendo desenvolvidos, onde o foco é aprimorar as propriedades termoeletricas das cerâmicas utilizadas nos TEGs (Torres *et al.*, 2022). Aplicações práticas destes dispositivos incluem veículos a combustão, como as motocicletas de competição, pois o escapamento (ou escape) deste tipo de veículo pode alcançar altas temperaturas (Rocha, 2011), garantindo o gradiente de temperatura necessário para se obter a máxima eficiência termoeletrica do TEG. Para identificar as regiões mais quentes do escapamento, são necessárias medições de temperatura, que podem ser realizadas experimentalmente, utilizando termopares. No entanto, as simulações computacionais, partindo de dados teóricos (eficiência do motor, velocidade, tempo de funcionamento), utilizando a análise por CFD (*Computer fluid dynamics*) (Tan *et al.*, 2022), permitem prever as temperaturas e a distribuição térmica na superfície do escapamento. Nesse sentido, o desenvolvimento deste trabalho foi direcionado para caracterizar o comportamento térmico do sistema de escape de uma das motocicletas da equipe Coyotes Motoracing-UNIFEI para determinar as áreas candidatas a serem receptoras da aplicação de módulos termoeletricos. Os módulos termoeletricos foram construídos a partir da junção tipo n-p, compostos por cerâmicas a base de CMO-La e CCO-Bi produzidas no Grupo de Desenvolvimento de Materiais Compósito (GDMaF). Por meio de medições práticas e simulações, buscou-se identificar as melhores regiões de acoplamento e dessa maneira atingir a máxima eficiência de conversão termoeletrica dos TEGs.

### Metodologia

O sistema de escapamento estudado da moto Coyotes

Motoracing foi o escape-16. Esse sistema foi submetido a medições experimentais, utilizando trenas, paquímetro e calibrador de raio. A partir destes dados criou-se um modelo virtual no *SolidWorks V.21*. Em seguida, foi impressa uma versão física do coletor do escape, no material conhecido como PLA, utilizando a impressora 3D *MakerBot Replicator 2X*.

A análise em CFD, feita no *Ansys Fluent V18.1*, foi realizada com o objetivo de identificar as regiões mais quentes do escape, utilizando uma malha fina. Além disso, as condições de controle do fluido (gases da combustão do iso-octano) foram definidas baseando-se em dados técnicos do motor HONDA CBR 250cc de 4 tempos e nos resultados do trabalho de Rocha *et al.* (Rocha, 2011), o qual aborda um motor semelhante.

A medição térmica do escape-16 em funcionamento foi realizada com o termômetro infravermelho de precisão *Fluke 574 IR* (possui um termopar de contato do tipo K acoplado) para obter a distribuição de temperatura ao longo de seu perfil. Sequencialmente, os dados coletados nos testes práticos foram comparados com as simulações por meio de gráficos plotados utilizando o aplicativo *OriginPro 9.0*. Paralelamente, foi construído um TEG tipo n-p a partir da junção de semicondutores de cerâmica: CMO-La (tipo n) e CCO-Bi (tipo p). Os substratos do TEG foram feitos de cerâmica de alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), conformados por meio da técnica de colagem de barbotina, utilizando-se de moldes de gesso com consistência 70. Esses moldes foram produzidos a partir de contramoldes impressos em resina na impressora *Elegoo Mars 2 Pro*, modelados no *SolidWorks V.21*.

Medidas de condutividade térmica ( $\kappa$ ), elétrica ( $\sigma$ ) e coeficiente de Seebeck ( $S$ ) foram conduzidos nas amostras CMO-La e CCO-Bi para que fossem, posteriormente, calculados os respectivos valores de figura de mérito ( $zT$ ), em função da temperatura ( $T$ ), a partir da Eq. (1) (Zulkepli *et al.*, 2021).

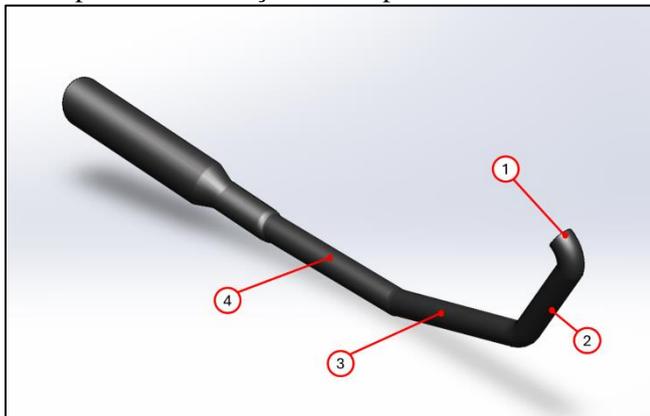
$$zT = \frac{S^2 \sigma}{k} T \quad (1)$$

Os valores de  $zT$  permitiram determinar a qualidade da conversão termoelétrica das cerâmicas. Elas foram cortadas em formato de pilares e foram conectadas eletricamente aos substratos de alumina utilizando tinta condutora de prata (cura a 600°C).

### Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta o modelo do escape-16 utilizado na análise CFD e apresenta os pontos de medição de temperatura que foram considerados no trabalho.

Figura 1 - Modelo 3D do escape-16 apresentando os 4 pontos de medição de temperatura considerados



Fonte: Autores (2024)

De maneira geral, a partir das medições realizadas e abordando o desenvolvimento do pré-projeto, considerando-se estudos desenvolvidos no trabalho de Li *et al.* (Li *et al.*, 2020), modelar as peças em 3D para o sistema de escape, neste trabalho, não apresentou grandes dificuldades.

A modelagem do módulo em tamanho real apresentou uma perspectiva e direcionamento aos trabalhos seguintes, como observado por exemplo no trabalho de Mostafavi *et al.* (Mostafavi; Mahmoudi, 2018) onde a modelagem do TEG considerou a aplicação e a geometria, permitindo análises sobre a eficácia do módulo e melhorias na estrutura. Além disso, o modelo do TEG mostrou características construtivas importantes e indicou que, para melhorar a fixação da base superior nos pilares, seria necessário aumentar a folga nos slots superiores, conforme apresentado pela função de detecção de interferências no aplicativo. A Figura 2 mostra como o modelo do TEG acoplado ao escapamento.

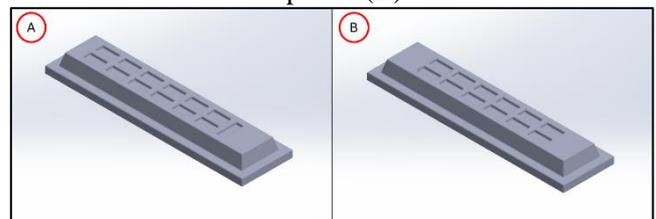
Para a modelagem dos contramoldes, foram gerados dois modelos distintos, um para a base ou substrato inferior (A) e um para a base superior (B) do TEG. A Figura 3 apresenta os dois contramoldes.

Figura 2 - Modelo de referência para TEG n-p impresso em resina e acoplado ao escape-16



Fonte: Autores (2024)

Figura 3 - Modelos 3D dos contramoldes, inferior (A) superior (B)



Fonte: Autores (2024)

Os contramoldes da base inferior (A) e superior (B), contemplam bordas externas e angulações para facilitar sua remoção dos moldes de gesso, tornando a fabricação dos moldes simples, evitando quebras. Essas melhorias construtivas também são observadas em outros projetos de modelagem 3D (Gómez *et al.*, 2023).

No tocante à análise em CFD do escape-16, os resultados podem ser observados na Tabela 1. Nota-se que são valores inferiores aos dados típicos de temperatura medidos em escapamentos de motocicletas de alta performance, visualizado no trabalho de Rocha *et al.* (Rocha, 2011). Neste trabalho é analisado um motor de 4 tempos e 250cc, apresentando valores de temperatura na entrada do escapamento na faixa de 400 °C a 600 °C, para rotações do motor de 4000 RPM a 6000 RPM. Os presentes resultados apresentam desvios, os quais podem ser relacionados as condições de contorno da simulação e as características funcionais do motor a combustão da motocicleta consideradas neste trabalho. Nota-se também que o ponto de medição 2 apresenta o segundo maior valor de temperatura e refere-se ao coletor (Figura 1) sendo essa uma região que facilmente poderia receber o acoplamento de um ou mais TEGs.

Tabela 1 - Análise térmica realizada em CFD para quatro pontos do escape-16.

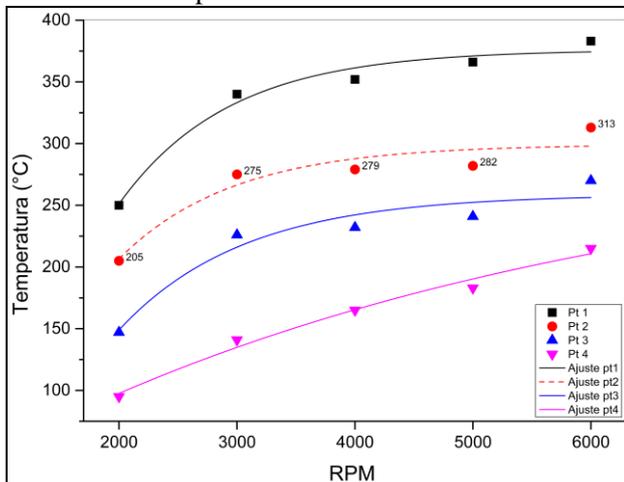
Ponto de Medição	2000 RPM	3000 RPM	4000 RPM	5000 RPM	6000 RPM
1	219 °C	307 °C	328 °C	367 °C	377 °C
2	211 °C	291 °C	306 °C	364 °C	365 °C
3	174 °C	276 °C	301 °C	356 °C	361 °C
4	144 °C	250 °C	289 °C	346 °C	354 °C
Rocha <i>et al</i>	-	-	400 °C	500 °C	600 °C

Fonte: Autores (2024)

Apesar dos problemas observados, levando em consideração a abordagem apresentada no estudo de Zoui *et al.* (Zoui *et al.*, 2020) e no trabalho desenvolvido por Hamid Elsheikh *et al.* (Hamid Elsheikh *et al.*, 2014), o qual salienta por diversas vezes os avanços relacionados a acoplagem de TEGs em exaustores, pode-se afirmar que a aplicação do TEG, desenvolvido nesse trabalho, na região do coletor é relevante e apresenta uma perspectiva positiva.

Passando para a etapa de medição experimental no escape-16, referentes a estes pontos, obteve-se o gráfico de medição de temperatura com a moto em funcionamento. A Figura 4 apresenta os dados medidos.

Figura 4 - Gráfico de medição de temperatura do escape-16 em funcionamento



Fonte: Autores (2024)

Os resultados apresentados são divergentes aos valores usuais de temperatura para motocicletas com motor de 250cc e 4 tempos, como é expresso no trabalho de Rocha *et al.* (Rocha, 2011), onde são definidos valores de entrada no escapamento acima de 400 °C para rotações maiores ou iguais a 4000 RPM, confirmando a presença de uma falha na performance do motor utilizado. O erro de performance do motor pode estar associado a um mau uso, a uma mistura ar combustível desbalanceada, a uma má configuração do ECU da motocicleta e a vida útil do

motor, problemas típicos encontrados em motocicletas com modificações.

Os substratos do TEG feitos de cerâmica de alumina ( $\alpha$ - $Al_2O_3$ ) por colagem de barbotina, ao serem retirados dos moldes, apresentaram bom acabamento nos slots de posicionamento dos pilares, mas com espessura maior do que a desejada. As peças também apresentaram considerável fragilidade, resultando em trincas e quebras durante o manuseio. Adotou-se como solução realizar uma pré-sinterização das peças, garantindo alguma resistência mecânica que facilitou o procedimento de lixamento e ajuste das dimensões adequadas aos tamanhos dos pilares cerâmicos termoelétricos.

Outro ponto de atenção ocorreu durante o corte dos pilares cerâmicos, sendo observados defeitos de laminação em algumas amostras. Para corrigir o problema, diminuiu-se a pressão de compactação das amostras (de 185MPa para 130MPa). Além disso, reduziu-se a velocidade de corte para cada amostra, resultando em pilares com bordas mais definidas, sem evidências de lascamento.

O processo de montagem do TEG também apresentou dificuldades, especialmente no posicionamento dos pilares e na distribuição da cola/tinta prata, usada como condutor elétrico. Apesar da construção trabalhosa, com diversas etapas de retrabalho para posicionamento dos pilares cerâmicos, ao final, foi produzido o protótipo de um TEG, mostrado na Figura 5. Ainda observa-se a possibilidade de melhorias voltadas aos erros encontrados, tomando como referência as considerações levantadas no de Jaziri *et al.* (Jaziri *et al.*, 2021).

Figura 5 - TEG tipo n-p produzido



Fonte: Autores (2024)

Os resultados dos testes de bancada do TEG, em função da temperatura, apresentaram os valores de figura de mérito (ZT) e eficiência termoelétrica ( $\eta$ ) que estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados de ZT e  $\eta$  do TEG em função da temperatura

T [°C]	ZT	$\eta$
250	8,47E-05	6,61E-06
350	6,80E-12	5,74E-13
450	2,08E-04	1,79E-05
550	3,99E-04	3,38E-05

Fonte: Autores (2024)

Os valores apresentados indicam baixos de  $\eta$  para o TEG n-p produzido ( $\eta$  de 6,61E-06 para a temperatura de 250 °C), quando comparado ao TEG Komatsu baseado em Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, considerado o mais eficiente do mundo, com  $\eta = 7,2\%$  em 250 °C, o qual é descrito no trabalho de Hamid Elsheikh *et al.* (Hamid Elsheikh *et al.*, 2014), indicando que seriam necessários diversos dispositivos, construídos, segundo este trabalho, para se atingir a mesma eficiência de um único TEG Komatsu.

### Conclusões

A modelagem 3D foi crucial ao longo do trabalho, permitindo antecipar aspectos de construção e melhorias para o TEG e outras peças, como os contramoldes. O estudo mostra que o uso da modelagem 3D será ainda mais necessário no desenvolvimento futuro de TEGs. Quanto aos modelos 3D impressos, foi possível identificar potenciais falhas e erros decorrentes a calibração das impressoras utilizadas, possibilitando obter peças mais precisas e de fácil fabricação em trabalhos futuros.

O processo de construção do TEG sugerido neste trabalho, apresentou dificuldades, especialmente na aplicação da tinta prata, causando falhas elétricas. Todavia, o estudo apresenta soluções para otimizar esse processo. Infelizmente, a eficiência termoelétrica teórica do TEG foi baixa ( $\eta$  de 6,61E-06). Apesar disso, nota-se que os problemas gerados são exclusivamente referentes à construção do módulo, que se bem otimizada, pode produzir dispositivos eficientes.

A análise CFD apresentou diferenças referentes a outros estudos, baseados em motores semelhantes. Além disso, a medição prática de temperatura no escape-16 apontou a necessidade de maior controle durante o processo e revelou temperaturas abaixo do esperado, devido a problemas de desempenho do motor. Apesar disso, o estudo identificou que a região denominada coletor é a mais adequada para a aplicação do TEG.

### Agradecimentos

Ao CNPq (Proc.316730/2023-8), PIBIC/CNPQ e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

### Referências

DE CARVALHO, G. A.; CHINELATTO, A. S. A. Production of alumina ceramics with graded porosity processed by slip casting and freeze casting. *Ceramica*, v. 67, n. 381, p. 111–122, 2021.

GÓMEZ, F. N. R. *et al.* Análise do processo de modelagem 3D e impressão de uma treliça. **XIX Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído**, v. 19, p. 1–13, 2023.

HAMID ELSHEIKH, M. *et al.* A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 337–355, 2014.

IRENA. Panorama das Transições Energéticas Mundiais 2022: Voia do 1,5°C. **International Renewable Energy Agency (IRENA)**, p. 1–20, 2022. Disponível em: [www.irena.org](http://www.irena.org).

JAZIRI, N. *et al.* Low-temperature co-fired ceramic-based thermoelectric generator with cylindrical grooves for harvesting waste heat from power circuits. **Applied Thermal Engineering**, v. 184, n. November 2020, 2021.

KRISTIAPAN, R. B. *et al.* A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. **Open Engineering**, v. 11, n. 1, p. 639–649, 2021.

LI, L. *et al.* A survey of feature modeling methods: Historical evolution and new development. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 61, n. August 2019, p. 101851, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101851>.

MOSTAFAVI, S. A.; MAHMOUDI, M. Modeling and fabricating a prototype of a thermoelectric generator system of heat energy recovery from hot exhaust gases and evaluating the effects of important system parameters. **Applied Thermal Engineering**, v. 132, p. 624–636, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.018>.

MUSGROVE, H. B.; CATTERTON, M. A.; POMPANO, R. R. Applied tutorial for the design and fabrication of biomicrofluidic devices by resin 3D printing. **Analytica Chimica Acta**, v. 1209, n. November 2021, p. 339842, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.339842>.

ROCHA, R. G. da. Estudo De Um Método Para Projectar Sistemas De Escape De Um Motor De Combustão Interna a 4 Tempos., p. 79, 2011.

TAN, L. *et al.* Numerical simulation on fluid flow and temperature prediction of motorcycles based on CFD. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 12, p. 12943–12963, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.001>.

TORRES, S. O. A. *et al.* Thermoelectric properties of CaMnO<sub>3</sub> ceramics produced by using powder synthesized by modified Pechini method. **Processing and Application of Ceramics**, v. 16, n. 2, p. 115–127, 2022.

YUAN, D. *et al.* Technology method and functional characteristics of road thermoelectric generator system based on Seebeck effect. **Applied Energy**, v. 331, n. December 2022, p. 120459, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120459>.

ZOUI, M. A. *et al.* A Review on Thermoelectric Generators: Progress and Applications. **Energies**, v. 13, n. 14, 2020.