

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

APLICAÇÃO DE MÓDULO TERMOELÉTRICO EM DUTOS DE EXAUSTÃO: PROTÓTIPO APLICADO NO ESCAPAMENTO DE UMA MOTOCICLETA

R.N. Santos¹ (IC) e M. V. Gelfuso¹ (PQ)
¹Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

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

Introdução

O crescimento da demanda energética global, aliado à necessidade de reduzir impactos ambientais, tem impulsionado a busca por novas soluções (IRENA, 2022). Nesse contexto, os geradores termoelétricos (TEGs) cerâmicos, baseados no efeito Seebeck, surgem como alternativas promissoras para conversão de calor em eletricidade em faixas moderadas de 400 e 600 °C (Yuan *et al.*, 2023). Entre as aplicações práticas dos TEGs, destaca-se sua integração em veículos com motores a combustão, como motocicletas de competição, cujos sistemas de escape atingem altas temperaturas, fornecendo o gradiente térmico necessário para maior eficiência de conversão (Rocha, 2011), fornecendo o gradiente térmico necessário para alcançar maior eficiência na conversão termoelétrica. Para prever os perfis térmicos e a distribuição de temperatura ao longo da superfície do escape podem ser feitas medições com termopares ou realizar simulações numéricas via CFD (*Computational Fluid Dynamics*) (Tan *et al.*, 2022).

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento térmico do sistema de escapamento de uma motocicleta da equipe Coyotes Motoracing-UNIFEI, com o intuito de identificar as regiões mais adequadas para a instalação de módulos termoelétricos. Os módulos em questão foram fabricados com junções do tipo n-p, utilizando cerâmicas à base de CMO-La e CCO-Bi, desenvolvidas no Grupo de Desenvolvimento de Materiais Compósitos (GDMaF). Os substratos cerâmicos dos TEGs foram obtidos por dois métodos distintos de conformação, o de colagem de barbotina (Carvalho; Chinelatto, 2021) e *tape casting* (Esenli *et al.*, 2025), com a finalidade de avaliar a influência do tipo de base na potência gerada. Através de medições experimentais e simulações computacionais, buscou-se apontar as regiões mais favoráveis à integração dos módulos e, assim, maximizar a eficiência na conversão de calor em eletricidade. Adicionalmente, os TEGs foram submetidos a ensaios em bancada e testes práticos para quantificação da potência elétrica gerada.

Metodologia

O sistema de escapamento analisado neste trabalho corresponde ao modelo escape-16 da motocicleta da equipe Coyotes Motoracing. Inicialmente, realizaram-se medições físicas com trena, paquímetro e calibradores de raio, a partir das quais foi desenvolvido um modelo 3D no aplicativo *SolidWorks V21*. Uma réplica do coletor também foi produzida em PLA por impressão 3D na impressora *MakerBot Replicator 2X*.

A simulação computacional foi conduzida no *Ansys Fluent V.18.1*, empregando malha refinada para maior precisão, a fim de identificar as regiões de maior concentração térmica. As condições de escoamento dos gases de combustão (iso-octano) foram definidas com base nas especificações do motor HONDA CBR 250cc (quatro tempos) e em dados complementares de Rocha (Rocha, 2011), que analisou um motor com características similares.

Para a obtenção da distribuição térmica real do escape-16 em operação, foi utilizado o termômetro infravermelho de alta precisão *Fluke 574 IR*, acoplado a um termopar tipo K. As temperaturas medidas experimentalmente foram comparadas aos resultados das simulações por meio de gráficos no *OriginPro 9.0*.

Paralelamente, foi construído um gerador termoelétrico (TEG) tipo n-p, composto por semicondutores cerâmicos: CMO-La para a junção tipo n e CCO-Bi para a junção tipo p. Os substratos do TEG foram confeccionados em cerâmica de alumina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), por meio dos métodos de colagem de barbotina e *tape casting*. No método de colagem, utilizaram-se moldes de gesso com consistência 70, obtidos a partir de contramoldes em resina impressos na impressora *Elegoo Mars 2 Pro*, desenvolvidos no *SolidWorks V.21*. Sequencialmente, para o método de *tape casting* preparou-se uma barbotina específica, com aditivos adicionados em sequência e múltiplas homogeneizações em moinho de bolas a 54 rpm. Os filmes cerâmicos (~0,5 mm) foram depositados em lâmina de vidro com desmoldante, secos em ambiente controlado e cortados conforme o projeto tridimensional.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

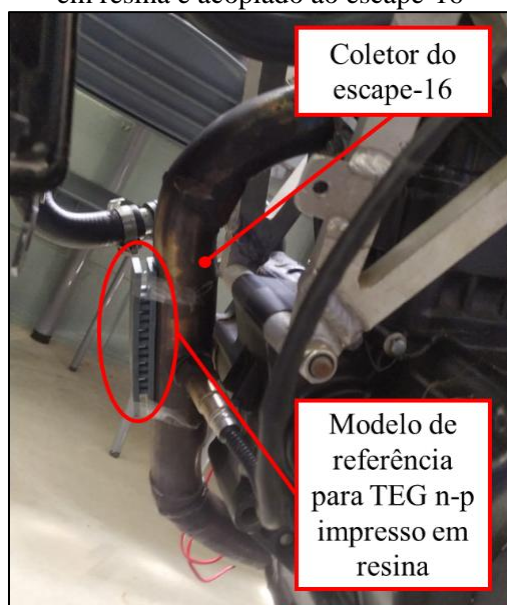
Posteriormente, os substratos foram cortados conforme as dimensões de 90 x 23 mm, sendo então, submetidos à sinterização em forno *Carbolite*, com controle de taxa de aquecimento lenta (1°C/min) durante 3 h a 1600°C, garantindo a densificação final.

Em trabalho paralelo no GDMAF, foram construídos TEGs a partir dos substratos produzidos. Inicialmente, avaliou-se os valores de potência em ensaios de bancada e posteriormente, realizaram-se medições de temperatura no sistema de escape em operação, nos pontos previamente definidos.

Resultados e discussão

De forma geral, com base nas medições realizadas e no desenvolvimento do pré-projeto, a modelagem tridimensional das peças do sistema de escapamento não apresentou obstáculos significativos, sobretudo ao se considerar os estudos de referência, como os apresentados por Li et al. (Li *et al.*, 2020). A Figura 1 ilustra o modelo final do TEG acoplado ao sistema de escapamento.

Figura 1 - Modelo de referência para TEG n-p impresso em resina e acoplado ao escape-16



Fonte: Autores (2025)

A criação do modelo em escala real do módulo termoeletrico, impresso em resina, forneceu uma visão mais clara e contribuiu para o direcionamento das etapas subsequentes do trabalho. Essa abordagem se alinha ao que foi proposto por Mostafavi e Mahmoudi (Mostafavi; Mahmoudi, 2018), em que a modelagem do TEG foi

orientada de acordo com a aplicação e a geometria, possibilitando a avaliação do desempenho do dispositivo e a identificação de oportunidades de aperfeiçoamento estrutural.

Além disso, a representação virtual do TEG evidenciou aspectos construtivos relevantes. Dentre eles, observou-se a necessidade de ajustes nos encaixes superiores: a análise por meio da ferramenta de detecção de interferências do software indicou que o aumento das folgas nos slots superiores seria essencial para garantir uma fixação mais eficiente da base sobre os pilares. A Figura 1 ilustra o modelo final do TEG acoplado ao sistema de escapamento.

Na análise CFD do escape-16, cujos resultados estão na Tabela 1, observam-se temperaturas inferiores às típicas de escapamentos de motocicletas de alta performance, como as reportadas por Rocha (Rocha, 2011) para motores de 250 cc e quatro tempos, com temperaturas entre 400 °C e 600 °C em rotações de 4000 a 6000 RPM. Os desvios podem ser atribuídos às condições de contorno adotadas na simulação e às particularidades do motor considerado neste estudo. Percebe-se que a região do coletor, foi a que apresentou a segunda maior temperatura, evidenciando ser uma região promissora para o acoplamento de módulos termoeletricos.

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

Região de Medição	2000 RPM	3000 RPM	4000 RPM	5000 RPM	6000 RPM
Entrada	219 °C	307 °C	328 °C	367 °C	377 °C
Coletor	211 °C	291 °C	306 °C	364 °C	365 °C
Médio	174 °C	276 °C	301 °C	356 °C	361 °C
Saída	144 °C	250 °C	289 °C	346 °C	354 °C
Rocha	-	-	400 °C	500 °C	600 °C

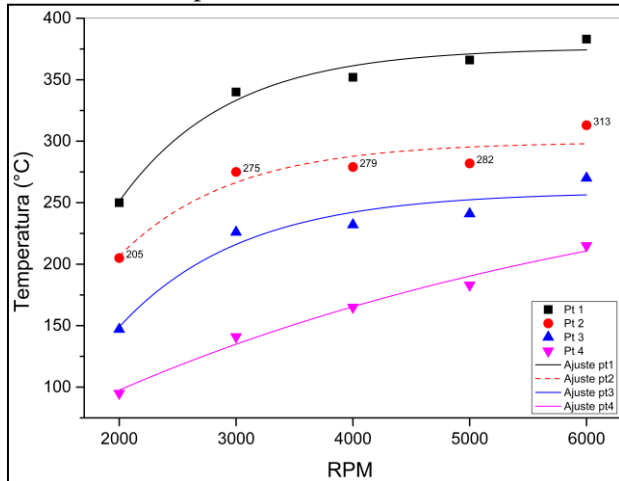
Fonte: Autores (2025)

Apesar das limitações observadas ao longo do trabalho, é possível considerar, com base nas abordagens apresentadas por Zoui *et al.* (Zoui *et al.*, 2020) e Hamid Elsheikh *et al.* (Hamid Elsheikh *et al.*, 2014), que a aplicação de módulos termoeletricos em sistemas de exaustão tem avançado significativamente. Esses estudos reforçam, de forma consistente, o potencial da integração dos TEGs em componentes como coletores de escapamento. Nesse contexto, a utilização do módulo termoeletrico desenvolvido neste trabalho para ser aplicado na região do coletor do escape revela-se relevante e com boas perspectivas de aplicação prática.

. Os dados obtidos permitiram a construção do gráfico de distribuição térmica no escape da moto, apresentado na Figura 2.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Figura 2 - Gráfico de medição de temperatura do escape-16 em funcionamento



Fonte: Autores (2025)

Os resultados indicaram temperaturas inferiores àquelas normalmente observadas em motores de 250 cm³ -quatro tempos. Segundo Rocha (Rocha, 2011), valores acima de 400 °C são esperados na entrada do escapamento em rotações superiores a 4000 RPM. Essa discrepância sugere uma possível falha no desempenho do motor, possivelmente relacionada ao uso inadequado, mistura ar-combustível desbalanceada, má configuração da ECU (*Engine Control Unit*) ou desgaste do motor, fatores comuns em motocicletas modificadas.

Quanto aos substratos cerâmicos utilizados nos módulos termoeletrônicos, fabricados em alumina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), observou-se que os substratos produzidos por colagem apresentaram boa definição nos *slots* destinados à fixação dos pilares, embora com espessura superior à especificada. Além disso, demonstraram fragilidade significativa, ocasionando trincas e quebras durante o manuseio. Como solução, adotou-se uma etapa de pré-sinterização, conferindo resistência mecânica suficiente para viabilizar o lixamento e a adequação dimensional às medidas dos pilares cerâmicos.

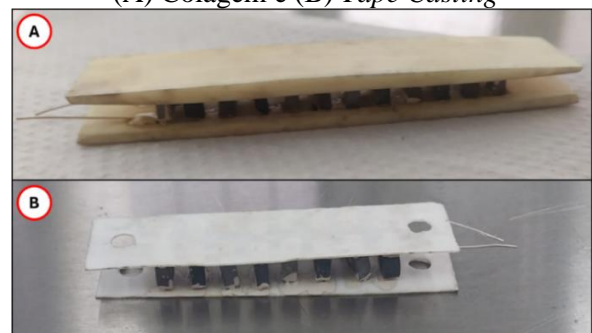
No que diz respeito ao método de *tape casting*, observou-se a obtenção de filmes com espessuras bastante reduzidas, compatíveis com as descritas por *Esenli et al.* (*Esenli et al.*, 2025), variando entre 0,2 e 0,3 mm, valor considerado adequado para favorecer a eficiência da conversão termoeletrônica dos TEGs. Contudo, ressalta-se que esse processo, embora promissor, é mais demorado e gera substratos mais frágeis quando comparado ao método de colagem.

Outro aspecto relevante foi identificado durante o corte

dos pilares cerâmicos, onde se observaram defeitos de laminação em algumas amostras. Para mitigar esse problema, foi necessário reduzir a pressão de compactação das peças, passando de 185 MPa para 130 MPa. Além disso, a velocidade de corte foi diminuída, o que resultou em pilares com melhor definição nas bordas e sem sinais de lascamento.

A etapa de montagem do TEG utilizando os substratos obtidos pelo método de colagem apresentou diversas dificuldades, principalmente relacionadas ao alinhamento dos pilares e à aplicação da tinta prata condutora, utilizada como meio de conexão elétrica. Por outro lado, a montagem com os substratos fabricados por *tape casting* mostrou-se mais simples e eficiente não havendo problemas durante a aplicação da tinta condutora. A Figura 3 apresenta os dois protótipos construídos, em que A represente o TEG construído com os substratos confeccionados por colagem e B, o TEG construído com os substratos confeccionados por *tape casting*. Ainda assim, observa-se que há oportunidades de aprimoramento no processo de fabricação e montagem, considerando os pontos discutidos por *Jaziri et al.* (*Jaziri et al.*, 2021), como a integração de elementos adicionais, a exemplo da adição de ranhuras cilíndricas nos substratos para aumentar a diferença de temperatura entre junções quente e fria.

Figura 3 - TEG tipo n-p: substratos produzidos por (A) Colagem e (B) *Tape Casting*



Fonte: Autores (2025)

Os resultados obtidos quanto à geração de potência elétrica pelos TEGs demonstraram-se promissores. Os valores medidos foram extrapolados para gradientes térmicos mais elevados, evidenciando um bom potencial de desempenho para $\Delta T = 300\text{ °C}$, com tensões na faixa de aproximadamente 75 mV. Para fins comparativos, *Jaziri et al.* (*Jaziri et al.*, 2021) reportaram valores de 95 mV sob um gradiente de 114 °C. Mesmo tratando-se de um dispositivo com uma construção distinta de *Jaziri*, os dados fornecem uma base relevante para avaliar o

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

desempenho relativo dos módulos desenvolvidos neste trabalho, os quais evidenciam a necessidade de otimização e melhoria de eficiência.

Conclusões

A modelagem tridimensional, realizada previamente à construção dos componentes, foi essencial para antecipar falhas, ajustar geometrias e orientar decisões construtivas. Essa etapa permitiu identificar interferências e aprimorar o design do TEG, especialmente no que se refere à fixação dos pilares cerâmicos e à geometria dos *slots* de encaixe.

A análise térmica por CFD, comparada às medições experimentais, evidenciou discrepâncias atribuídas ao desempenho abaixo do ideal do motor utilizado. Contudo, identificou-se o coletor como a região mais adequada para instalação dos módulos termoelétricos, graças ao gradiente térmico mais favorável, atingindo temperaturas na faixa de 313 °C. As medições práticas confirmaram temperaturas inferiores ao esperado, indicando a necessidade de aprimorar o controle do motor para otimizar o aproveitamento energético.

Na etapa de fabricação, os substratos cerâmicos obtidos por colagem e tape casting apresentaram comportamentos distintos. A colagem resultou em peças mais espessas e frágeis mecanicamente, exigindo a pré-sinterização para permitir o acabamento. Já o método de tape casting produziu substratos mais finos, com espessuras adequadas à aplicação, porém igualmente frágeis e de processamento mais lento. A montagem do TEG com substratos colados foi mais complexa, significativamente no quesito a aplicação da tinta prata, o qual se mostrou mais fácil nos substratos por tape casting. Os testes de geração elétrica de bancada apresentaram resultados promissores, indicando bom desempenho em gradientes térmicos elevados, na faixa de 300 °C. Os resultados destacam o potencial do módulo desenvolvido e evidenciam a necessidade de otimizações no design e processos de fabricação para melhorar a eficiência termoelétrica.

Agradecimentos

A UNIFEI, ao CNPq (Proc.316730/2023-8), PIBIC/CNPQ e à FAPEMIG (APQ-01856-22) pelo apoio financeiro.

Referências

CARVALHO, G. A. de; CHINELATTO, A. S. A. Obtenção

de cerâmicas de alumina com porosidade graduada processadas pelas técnicas de colagem de barbotina e freeze casting. **Cerâmica**, [s. l.], v. 67, n. 381, p. 111–122, 2021. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132021000100111&tlng=pt.

ESENLI, B. *et al.* Tape casting technique in the fabrication of ceramic membranes: A review of influential factors and applications in water and wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 362, p. 131871, 2025. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S138358662500468X>.

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

IRENA. Panorama das Transições Energéticas Mundiais 2022: Voia do 1,5°C. **International Renewable Energy Agency (IRENA)**, [s. l.], p. 1–20, 2022. Disponível em: 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**, [s. l.], v. 184, n. November 2020, 2021.

LI, L. *et al.* A survey of feature modeling methods: Historical evolution and new development. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, [s. l.], 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**, [s. l.], v. 132, p. 624–636, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.018>.

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

TAN, L. *et al.* Numerical simulation on fluid flow and temperature prediction of motorcycles based on CFD. **Alexandria Engineering Journal**, [s. l.], 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 CaMnO₃ ceramics produced by using powder synthesized by modified Pechini method. **Processing and Application of Ceramics**, [s. l.], 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**, [s. l.], v. 331, n. November 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**, [s. l.], v. 13, n. 14, 2020.