

ROGÉRIO MIRANDA MORAIS

**Grafeno Induzido por Laser em Papel e suas Aplicações em Aquecedores
Resistivos Flexíveis**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Departamento de Física, Presidente
Prudente/SP.

Supervisor(a): Prof. Dr. Neri Alves

Presidente Prudente

2025

Relatório Final Resumido – ID 4689

Título: Grafeno Induzido por Laser em Papel e suas Aplicações em Aquecedores Resistivos Flexíveis.

Pesquisador: Dr. Rogério Miranda Morais

Supervisor: Prof. Dr. Neri Alves

Resumo

Desenvolvemos trilhas de grafeno induzido por laser (LIG) diretamente sobre papel kraft, aplicadas em aquecedores resistivos flexíveis (FRHs). O estudo demonstrou temperaturas superiores a 145 °C e eficiência eletrotérmica de 17,05 mW/(cm²·°C). A fabricação utiliza uma técnica sustentável (laser de diodo 450 nm), sem etapas químicas agressivas e com impacto ambiental cerca de 100 vezes menor que dispositivos em FR-4 tradicional. Os resultados foram validados por análise de ciclo de vida (LCA) e publicados no periódico **Advanced Sustainable Systems** (vol. 8, n.º 10, mai/2024), Q1 nas áreas de **Environmental Science** e **Renewable Energy**, com fator de impacto de aproximadamente 6,7.

1. Introdução

A eletrônica impressa busca substituir tecnologias convencionais com materiais sustentáveis e baixo impacto ambiental. O grafeno induzido por laser (LIG), obtido por pirólise fototérmica sobre substratos como papel kraft, oferece estrutura porosa, boa aderência e alta condutividade. Essa abordagem elimina etapas químicas, reduz custos e torna possível aplicações como microaquecimento, degelo e embalagens inteligentes. O objetivo central deste projeto foi validar o uso de LIG como condutor em aquecedores flexíveis com desempenho térmico robusto e perfil ambiental otimizado.

2. Objetivos

- Produzir trilhas de LIG sobre papel kraft utilizando sistema homemade.
- Avaliar o efeito dos parâmetros do laser (potência, velocidade e foco).
- Caracterizar os filmes de LIG morfologicamente, estruturalmente e eletricamente.
- Projetar e fabricar aquecedores resistivos flexíveis (FRHs).

- Avaliar o desempenho térmico e funcional dos FRHs.
- Comparar o impacto ambiental via LCA frente ao FR-4 convencionais.

3. Metodologia

3.1 Formação do LIG

A formação de LIG foi feita com laser a 450 nm (62–160 mW; 206–297 mm/min; 900 DPI) em equipamento homemade (plataforma Neje). Primeiramente, avaliou-se o efeito da distância focal por meio de mapeamento com papel térmico. As informações obtidas foram aplicadas para avaliar a produção de LIG sobre diferentes tipos de substrato.

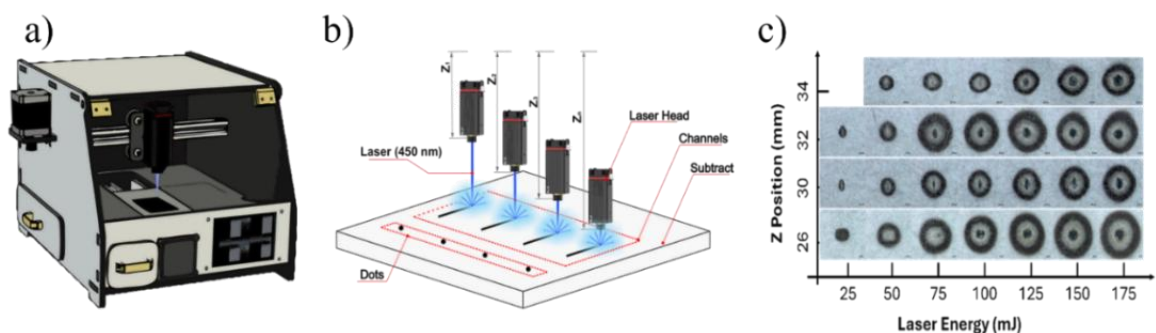


Figura 1: a) Sistema homemade de gravação a laser; b) formação de pontos em diferentes distâncias Z e energias; c) imagens de microscopia óptica mostrando variações nos círculos irradiados.

3.2 Caracterizações

- Elétrica: Resistência de folha (R_s) foram feitas usando um *Four-Point Probe* da Ossila[®]
- Estrutural: Foram adquiridos espectros Raman usando um micro-Raman Renishaw com laser de excitação em 633 nm.
- MEV: Imagens de microscopia eletrônica foram adquiridas usando um Carl Zeiss EVO LS 15.
- Termografia: análise térmica foram realizadas via câmera IR UNIT-T UTI-120S.

3.3 Fabricação dos FRHs

Desenvolvimento de aquecedores com área de contacto de 30 mm², trilhas de 0,1–0,3 mm e grade ativa de 10 mm. Foram avaliados parâmetros como resistência absoluta (R_a), área de efetiva (A_e), tempo de aquecimento (t_h), temperatura final (t_f) e eficiência eletrotérmica (E_f). Por fim, foram realizadas provas de conceito — aquecimento de líquidos e derretimento de gelo.

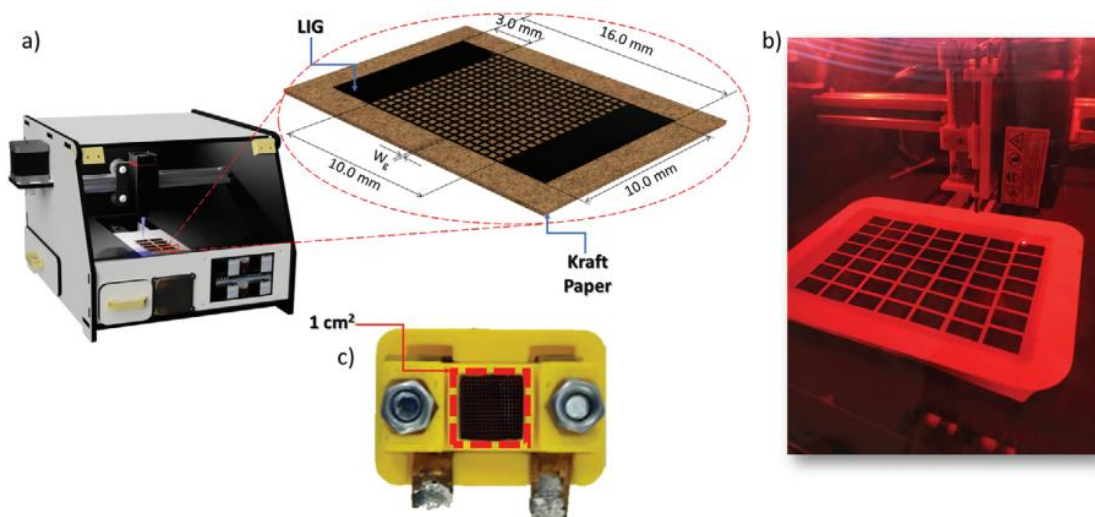


Figura 2: a) Esquema ilustrando o sistema de gravação a laser homemade e um zoom com o padrão do FRH; b) Fotografia de um lote de FRHs baseados em LIG sendo fabricados com o sistema de gravação homemade; c) Fotografia do conector utilizado para aplicar tensão/corrente ao FRH.

4. Resultados e Discussão

4.1 Formação e Características do LIG

O LIG só se forma de forma eficaz acima de 90 mW, com R_s mínima de 0,25 k Ω /quad e cobertura superior a 91%. A análise Raman evidenciou características de grafeno multilayer, com relação $I_{2D}/I_G = 0,915$ e $I_G/I_D = 0,62$, indicando um bom equilíbrio entre estrutura ordenada e defeitos.

A morfologia mostrou estruturas coralinas e porosas, com boa adesão ao papel e condutividade suficiente para aquecimento resistivo.

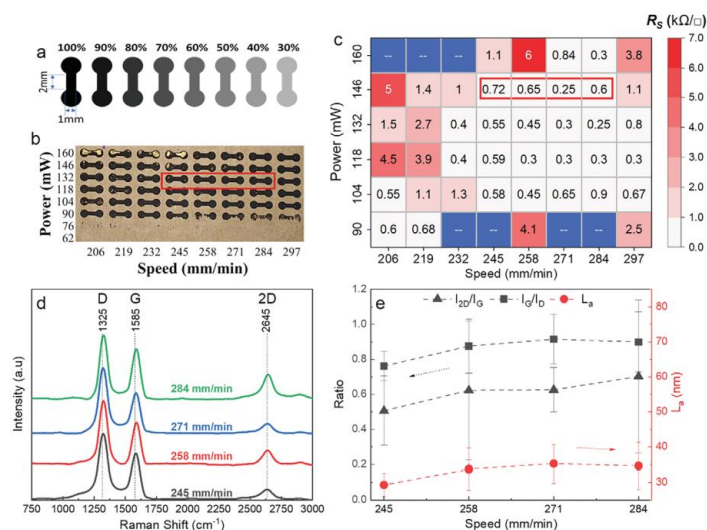


Figura 3: a) Esboço criado para rastrear os padrões no papel, em vários tons de cinza, variando de 30% a 100%; b) Fotografia do LIG; c) Mapa visual de potência versus velocidade juntamente com os valores de resistência de folha; d) Espectros Raman do LIG variando a velocidade de varredura; e) Razões I_{2D}/I_G e I_G/I_D , e dimensão cristalina L_a em função da velocidade de varredura.

4.2 Avaliação dos FRHs

Os aquecedores exibiram rápido aquecimento até 145 °C e eficiência de 17,05 mW/(cm²·°C). Dispositivos com $R_a A_e \leq 1,75$ alcançaram $\Delta T > 18$ °C com apenas 0,16 W. A distribuição térmica foi homogênea e isotrópica.

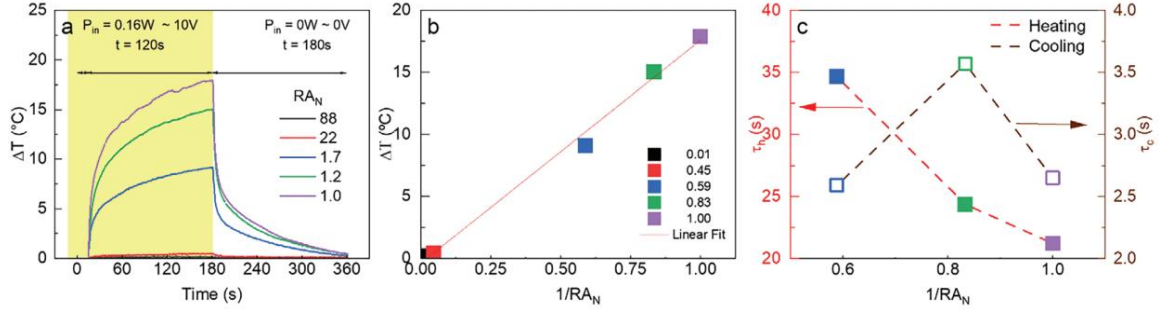


Figura 4: a) Temperatura do aquecedor (ΔT) em função do tempo para diferentes valores normalizados do produto $R_a A_e$ (RA_N); b) Temperatura do aquecedor em função de $1/RA_N$; c) Tempos de aquecimento e resfriamento em função de $1/RA_N$.

4.3 Avaliação Ambiental

A LCA via software GaBi indicou impacto ambiental ~100 vezes menor que dispositivos FR-4 convencionais. Destaques para reduções em GWP, ADP, HTP e eutrofização.

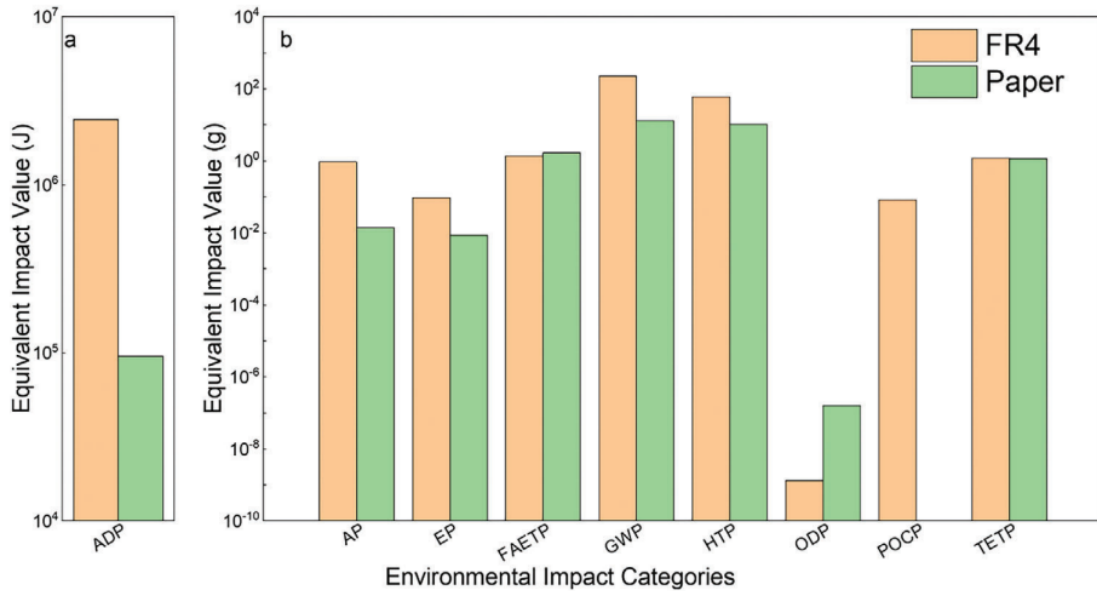


Figura 5: Resultados comparativos da análise de ciclo de vida (LCA) para todas as categorias de impacto do método CML, comparando um aquecedor resistivo baseado em FR-4 com a abordagem baseada em papel kraft (KP). As barras estão dimensionadas como uma proporção do valor máximo em cada gráfico. Fica evidente que a adoção do KP reduz substancialmente o impacto ambiental

4.4 Aplicações práticas

A versatilidade dos aquecedores resistivos flexíveis (FRHs) recicláveis à base de LIG em papel kraft pode ser demonstrada por meio de provas de conceito que destacam o potencial

para aplicações reais. A Figura 6a ilustra uma prova de conceito em que uma solução armazenada em um frasco é mantida a uma temperatura constante de 36 °C. A curva de temperatura em função do tempo mostra que a solução atinge a temperatura desejada e que o calor continua sendo transferido para o líquido, assegurando a estabilização no nível desejado. Essa aplicação pode ser utilizada em aquecedores inteligentes e portáteis para alimentos ou bebidas, assim como em condições de armazenamento controladas para produtos médicos. Além disso, Figura 6c,d demonstram uma aplicação do aquecedor para o derretimento eficiente de gelo. Para ilustrar essa capacidade, foi mantida uma densidade de potência de $P_{in} = 0,54 \text{ W}$ aplicada ao aquecedor, o que levou ao derretimento completo de um cubo de gelo com 23 g de massa em 600 s. Isso representa uma alternativa valiosa para remoção eficaz de gelo em janelas, pisos ou para-brisas de veículos — algo particularmente importante em países com condições severas de inverno e altamente relevante para a indústria automotiva.

As aplicações, no entanto, não se limitam a esses cenários: FRHs à base de LIG também podem ser utilizados em eletrônicos vestíveis ou médicos, entre várias outras aplicações potenciais.

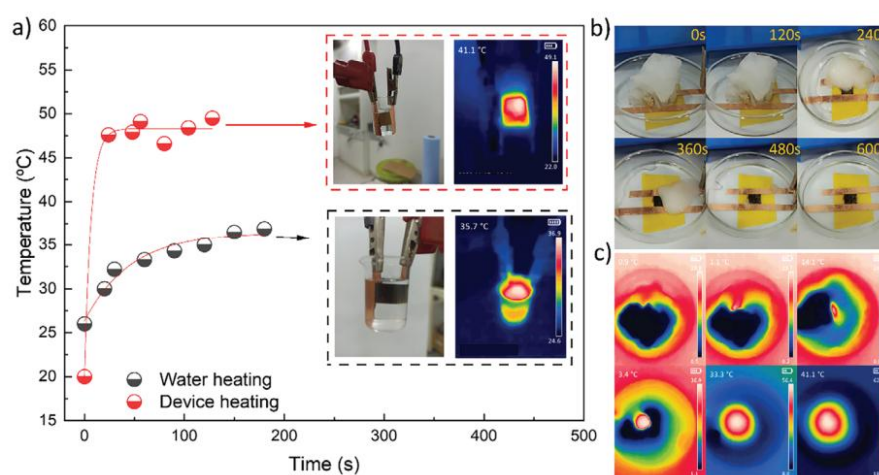


Figura 6: a) Curvas de temperatura em função do tempo. Inserção: fotografia da prova de conceito com imagens térmicas infravermelhas; b) Fotografia do processo de derretimento do gelo ao longo do tempo; c) Imagens térmicas infravermelhas correspondentes à fotografia de degelo.

5. Discussão geral:

O sucesso técnico (desempenho térmico e condutividade) aliado ao perfil ambiental favorável destaca o potencial da tecnologia em aplicações industriais, embalagens inteligentes e eletrônicos vestíveis. A publicação na revista **Advanced Sustainable Systems** (IF ~6,1–6,7; Q1) reforça a aceitação e visibilidade internacional da pesquisa.

6. Conclusão

Foi comprovada a viabilidade de produzir aquecedores flexíveis e biodegradáveis com excelente desempenho térmico, utilizando LIG em papel kraft. O projeto superou expectativas em eficácia, sustentabilidade e escalabilidade. Futuras etapas devem explorar integração com sensores, substratos diversos (madeira, polímeros naturais) e aplicações em vestíveis e microaquecimento localizado.

7. Outras atividades realizadas no período

- XXI B-MRS Meeting (Maceió, Al – set/2023): pôster "Production of Flexible Graphene Electrodes on Untreated Kraft Paper for Resistant Flexible Heaters via Laser-Induced Graphene".

8. Comentário do Supervisor

O relatório apresentado pelo pesquisador Dr. Rogério Miranda Moraes demonstra excelência na condução e desenvolvimento de um projeto alinhado com os princípios de sustentabilidade, inovação e aplicabilidade prática. O uso de grafeno induzido por laser (LIG) diretamente sobre papel kraft para a fabricação de aquecedores resistivos flexíveis (FRHs) revela não apenas domínio técnico sobre a técnica de pirólise fototérmica, mas também sensibilidade às demandas atuais por soluções eletrônicas ecológicas e biodegradáveis.

Destaco como pontos fortes a abordagem sistemática na otimização dos parâmetros de gravação a laser, a diversidade e profundidade das caracterizações realizadas (elétrica, estrutural, térmica e morfológica), e a clareza com que os resultados foram organizados e discutidos. O uso de provas de conceito práticas, como o aquecimento controlado de líquidos e o derretimento de gelo, ilustra bem o potencial de aplicação real dos dispositivos produzidos.

Adicionalmente, a inclusão da Análise de Ciclo de Vida (LCA) acrescenta uma dimensão ambiental essencial à avaliação do projeto, evidenciando que o impacto ambiental dos dispositivos em papel kraft é substancialmente inferior aos equivalentes em FR-4.

Como recomendação para as próximas etapas, sugiro a exploração de novos substratos sustentáveis (como filmes de celulose bacteriana ou polímeros naturais), bem como a integração dos FRHs com sensores para compor sistemas térmicos inteligentes. O trabalho também abre espaço para colaborações internacionais em linhas de pesquisa voltadas à eletrônica biodegradável e à internet das coisas (IoT).

Prof. Dr. Neri Alves
Supervisor do Projeto
Departamento de Física – UNESP/FCT