

ENERGIA NA ENGENHARIA QUÍMICA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

N.C. Gomes¹, L.L.C. do Vale², A.G.A.P. Neto³, M.V.B. Valente⁴, E.S. de Sá⁵, G.L. de OLiveira⁶, D.A.R. de Castro⁷

¹Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil (naila.castro.g3@gmail.com)

²Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil

O crescimento da demanda mundial por energia e os impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis têm incentivado a busca por fontes renováveis e sustentáveis. Nesse contexto, a biomassa destaca-se como uma alternativa promissora, especialmente pelo aproveitamento de resíduos agroindustriais. A casca do café, um dos principais resíduos gerados pela cadeia produtiva de uma das commodities mais consumidas no mundo, apresenta elevado potencial energético devido ao seu alto poder calorífico e teor de materiais voláteis, podendo ser utilizada na geração de energia térmica e elétrica. Além disso, as cinzas resultantes da combustão podem ser reaproveitadas como fertilizante agrícola, em razão da presença de potássio. Outra alternativa sustentável é o uso de células fotocatalíticas de câmara única com fotoeletrodos de $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ e $\text{g-C}_3\text{N}_4$, capazes de gerar energia elétrica e contribuir para o tratamento de águas contaminadas. A incorporação de carvão ativado melhora a transferência de carga, aumentando a eficiência do sistema. As biorrefinarias também desempenham papel estratégico ao converter biomassa em biocombustíveis, energia e produtos de maior valor agregado, promovendo o aproveitamento integral dos recursos naturais e reduzindo desperdícios e impactos ambientais. Dessa forma, o uso da biomassa e de tecnologias associadas representa uma alternativa sustentável para diversificar a matriz energética, diminuir a dependência de combustíveis fósseis e contribuir para a preservação ambiental.

Palavras-chave: Energia; Café; Biomassa; Biorrefinarias; Biocombustíveis.

INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda energética mundial, aliado aos impactos ambientais decorrentes do uso intensivo de combustíveis fósseis, tem impulsionado a busca por fontes renováveis e tecnologias capazes de promover uma matriz energética mais sustentável. Nesse contexto, diferentes alternativas vêm sendo estudadas com o objetivo de reduzir a dependência de recursos não renováveis e minimizar os danos ao meio ambiente, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas energéticos mais eficientes e sustentáveis (Sangeeth et al., 2025).

Entre as soluções promissoras destacam-se o aproveitamento de resíduos agroindustriais para a geração de energia, o desenvolvimento de sistemas fotoeletroquímicos capazes de produzir eletricidade de forma sustentável e a implementação de biorrefinarias para a conversão de biomassa em produtos de valor agregado. Essas abordagens apresentam potencial para promover o uso racional dos recursos naturais, reduzir desperdícios e fortalecer a diversificação da matriz energética, favorecendo a transição para modelos mais

sustentáveis de produção e consumo de energia (Soares et al., 2024).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo identificar e analisar os resultados apresentados em estudos relacionados ao aproveitamento energético da biomassa proveniente de resíduos do café, à aplicação de células fotocatalíticas para geração de energia elétrica e ao uso de biorrefinarias como estratégia para a produção sustentável de energia. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica baseada na análise de artigos científicos sobre os três temas, buscando reunir e comparar os principais resultados e contribuições encontrados na literatura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aproveitamento energético da casca de café

Conforme os dados do artigo de Resende et al. (2025), a casca de café, resíduo abundante no

beneficiamento dos grãos, apresenta propriedades físico-químicas favoráveis à geração de energia. O poder calorífico superior da casca de café é de 18.420 J/g (ou ~18,4 MJ/kg), valor comparável ao de algumas biomassas lenhosas e próximo ao do carvão vegetal (cerca de 20–25 MJ/kg). Além disso, o teor de voláteis é de 74,35%, o que facilita a ignição e a combustão eficiente. O teor de cinzas é relativamente baixo, e a análise elementar revela presença significativa de potássio (K), permitindo que as cinzas sejam reutilizadas como fertilizante na agricultura, fechando o ciclo de nutrientes. Em termos práticos, a queima direta da casca de café pode ser realizada em caldeiras ou fornos para produção de vapor e geração de eletricidade por meio de turbinas a vapor. Alternativamente, processos termoquímicos como pirólise e gaseificação podem produzir bio-óleo e gás de síntese. Estudos indicam que a utilização desse resíduo para cogeração em fazendas de café pode suprir parte da demanda energética das próprias unidades de processamento, reduzindo custos e emissões (França et al., 2020).

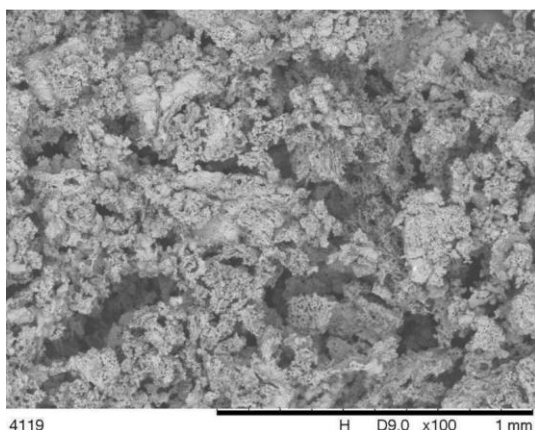


Figura 1. Microscopia eletrônica de Varredura da casca do café. **Fonte:** Resende et al. (2025).

Tabela 1. Composição química das cinzas de casca de café.

Elemento	(%)
Oxigênio (O)	49,9
Potássio (K)	40,6
Cálcio (Ca)	5,83
Magnésio (Mg)	1,4
Outros	2,27

Fonte: Resende et al. (2025)

Células fotocatalíticas de câmara única com fotoeletrodos de $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ e $\text{g-C}_3\text{N}_4$

A célula fotocatalítica proposta no trabalho de John et al. (2025) utiliza um fotocátodo de $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ (um material tipo perovskita, rico em ferro, abundante e de baixo custo) e um fotoânodo de $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (nitreto de carbono grafítico, um semiconductor polimérico). Esses materiais são fotoativos sob luz visível, dispensando a necessidade de fonte UV. O sistema opera em câmara única, sem membrana, e incorpora carvão ativado, que atua como adsorvente e reduz a resistência à transferência de carga, melhorando o desempenho eletroquímico. Os resultados experimentais mostraram, sob simulador solar, uma tensão de circuito aberto de 0,11 V e um fator de preenchimento de 60%. O fator de preenchimento é uma medida da qualidade elétrica da célula, valores acima de 50% indicam baixa resistência interna. Embora a tensão seja modesta, o sistema foi projetado primariamente para tratamento de águas contaminadas (degradação de corantes ou fármacos via radicais hidroxila), com a geração elétrica como co-benefício. A eficiência de conversão de energia (η) não foi explicitada, mas os autores destacam que o uso de carvão ativado aumentou a corrente gerada em aproximadamente 30% em relação ao sistema sem carvão. Comparado a células fotocatalíticas tradicionais que usam TiO_2 (ativo apenas sob UV), a combinação $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5/\text{g-C}_3\text{N}_4$ apresenta vantagens de operação com luz solar e baixo custo. Ainda, a ausência de membrana reduz custos de manutenção. Esses dispositivos são promissores para aplicações descentralizadas, como estações de tratamento de efluentes que integram produção de energia.

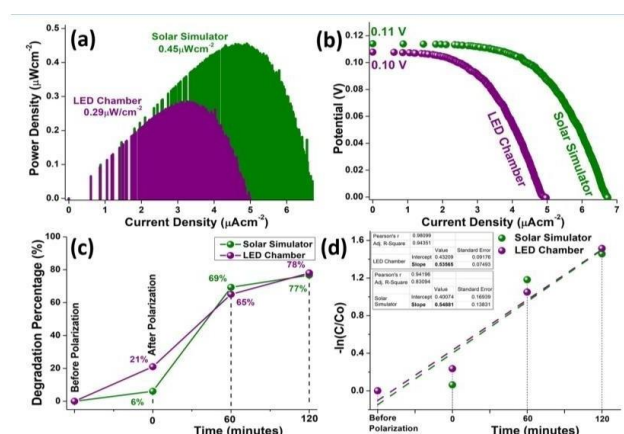


Figura 2. (a) Curvas de densidade de potência e (b) curvas de polarização para o sistema PFC sob simulador solar e câmara com LED. (c) Percentual de degradação e (d) taxa de degradação de TET no sistema PFC com $R_{ext} = 1 \text{ k}\Omega$. **Fonte:** Sangeeth et al. (2025)

Biorrefinarias como estratégia integrada para energia sustentável

O conceito de biorrefinaria assemelha-se ao de uma refinaria de petróleo, mas utilizando biomassa como matéria-prima renovável. Soares et al. (2025) classificou as biorrefinarias em gerações: primeira geração (açúcares, amidos, óleos vegetais), segunda geração (resíduos lignocelulósicos, como cascas e palhas) e terceira geração (algas). No caso do café, a casca é um resíduo lignocelulósico adequado para biorrefinarias de segunda geração. Em uma biorrefinaria de casca de café, podem ser integrados processos físicos (secagem, moagem), químicos (hidrólise ácida ou enzimática para liberar açúcares), bioquímicos (fermentação para etanol ou butanol) e termoquímicos (combustão, gaseificação). Os produtos incluem: bioetanol, biogás (via digestão anaeróbica), bio-óleo, carvão ativado (a partir da torta) e fertilizantes (a partir das cinzas). Essa integração maximiza o valor econômico e reduz resíduos a quase zero, alinhando-se à economia circular. Dados de desempenho energético: a digestão anaeróbica da casca de café pode gerar cerca de 0,25–0,35 m³ de biogás (60-70% CH₄) por kg de sólidos totais, o que corresponde a aproximadamente 5–7 MJ/kg. A gaseificação pode produzir gás de síntese (H₂ + CO) com poder calorífico de 4–6 MJ/Nm³. Portanto, a implementação de biorrefinarias em regiões cafeeiras (como o estado do Amazonas, Brasil) pode fomentar o desenvolvimento local sustentável (Soares et al., 2025).

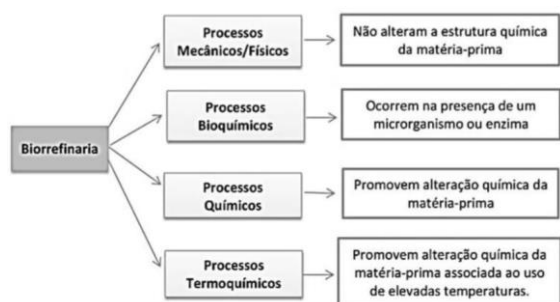


Figura 3. Representação dos processos que ocorrem em biorrefinarias. Fonte: Cherubini et al. (2009)

CONCLUSÃO

O aproveitamento energético da casca de café é técnica e ambientalmente viável, graças ao seu alto poder calorífico (18.420 J/g) e teor volátil (74,35%), permitindo sua combustão direta para geração de calor/eletricidade, com subproduto (cinzas) aproveitável como fertilizante, a célula fotocatalítica

de câmara única empregando Ca₂Fe₂O₅/g-C₃N₄ e carvão ativado mostrou potencial para geração de eletricidade (Voc = 0,11 V, FF = 60%) simultaneamente ao tratamento de águas contaminadas, embora ainda necessite de otimização para aumentar a tensão e a corrente; e as biorrefinarias representam o modelo mais integrado e sustentável para conversão de biomassas residuais, como a casca de café, permitindo a produção diversificada de biocombustíveis, energia e produtos químicos, com mínimo desperdício.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao professor Dr. Douglas Alberto Rocha de Castro da disciplina de Ciência da Informação pelo suporte estrutural e orientação na realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- JOHN, Sangeeth; B, Ezhilarasi S.; MEENA, Ramcharan; SINGH, Shubra. Membrane-Free Visible Light Driven Ca₂Fe₂O₅-gC₃N₄ Based Single Chamber Dual Photoelectrode Photocatalytic Fuel Cells for Energy Production and Simultaneous Water Treatment. *ACS Applied Energy Materials*, v. 8, p. 10804-10812, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03060>.
- RESENDE, Rafaela da Silva; SILVA, Raphael Henrique da; YAMAJI, Fábio Minoru. Aproveitamento da casca de café como fonte de energia: incentivando a consciência ambiental com o ensino de Química. *Química Nova na Escola*, São Paulo, v. XX, n. YY, p. 1-7, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160435>.
- SOARES, Victoria Victor; MOURA, Luiz Eduardo Freitas de; MELO, Katia Moreira de. Biorrefinarias: resumo com definições, classificações e processos industriais. *Brazilian Journal of Production Engineering*, v. 11, n. 1, p. 24-32, 2025. DOI: <https://doi.org/10.47456/bjpe.v11i1.46866>.