



VOLUME 5 | Nº 1
EDIÇÃO ESPECIAL
SETEMBRO | 2025

CONFERÊNCIA SMART ENERGY SE CONSOLIDA NO ESTADO MAIS SUSTENTÁVEL DO PAÍS

Paraná 2.0

Estado trabalha em um plano energético
para os próximos 25 anos

Ciência

A Revista Smart Energy passa a contar
com artigos de divulgação científica



ORGANIZAÇÃO E REALIZAÇÃO



PROMOÇÃO



PATROCÍNIO





INSTITUTO DE
ENGENHARIA
DO PARANÁ



NAPI
HIDROCARBONETOS
RENOVÁVEIS



PotencializEE

Economize até 40% na conta de energia da sua empresa!

Com o PotencializEE, pequenas e médias indústrias têm acesso a soluções práticas e apoio técnico do SENAI-SP para cortar desperdícios e investir no que realmente importa: o crescimento do seu negócio.

Transforme energia em lucro

Inscriva-se agora e descubra como sua indústria pode gastar menos com energia e combustíveis e produzir mais.

Aponte o celular para o QR Code e participe.



6

ENTREVISTA:
CLEICIO MARTINS
Novos caminhos
para a Eletrobras

12

SUSTENTABILIDADE
Paraná 2.0 – Com 98% de sua
energia limpa, o estado trabalha
na construção de Plano Energético
para os próximos 25 anos

20

OPINIÃO

- **Baterias Sustentáveis:** do minério ao reuso
- **Mobilidade elétrica:** aprendizados de bogotá para o brasil
- **Descarbonizar o saneamento:** o exemplo que o brasil precisa seguir

34

PEQU:
Aneel anuncia resultados do
primeiro ciclo do Plano de
Inovação até o fim de setembro

40

CAPA
Conferência Smart Energy
reforça o protagonismo
do estado e se consolida
como evento

45

**DIVULGAÇÃO
CIENTÍFICA**

EXPEDIENTE



REVISTA SMART ENERGY

Publicação com apoio do Governo do Estado do Paraná por meio da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, Tecpar e Fundação Araucária.

CONSELHO EDITORIAL

FIEP

João Arthur Mohr
Carlos Fiuza
Rui Londero Benetti

TECPAR

Eduardo Marafon
Celso Romero Kloss
Bill Costa
Lanes R. Prates Marques

Rede Paraná Tecnologia e Metrologia

Iramar Lopes Severiano
Richardson Péricles Barreto
Bruno Kaesemodel
Edna Martins

COORDENAÇÃO DE JORNALISMO

Expressa Comunicação
Jornalista Responsável

Kristiane Rothstein
DRT 3.378/13/09

Produção

Thiago Rothstein

Design gráfico e diagramação

Pedro Vieira - Id comunicação

Agradecimento aos jornalistas

João Pedro Schonarth - Tecpar
Patrícia Constanski - Fiep
Giovana Chiquim - Lumière Comunicação
Maria Mazzei - Eletrobras
Daniel Dourado - Aneel
Monica Venson - Sanepar
Alice Bettencourt - SP4

Rede Paraná Tecnologia e Metrologia

Avenida Comendador Franco, 1.341
Jardim Botânico - Curitiba - Paraná

 www.instagram.com/smartenergybrasil

 www.linkedin.com/company/smartenergybrasil

UM CAMINHO DISCUTIDO POR TODOS PARA TODOS



O Balanço Energético Nacional (BEN) 2025, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e divulgado em agosto com dados referentes a 2024, trouxe uma notícia animadora: tanto a indústria (64,4%) quanto os lares brasileiros (71,8%) ampliaram o uso de energia proveniente de fontes renováveis — com destaque para a hidrelétrica e a solar. O levantamento mostra ainda que, de toda a energia solar térmica gerada no país, 79,6% é consumida pelas residências, 17,4% pelo comércio e 3,1% pela indústria.

Esses números reforçam uma tendência que já está no centro das discussões globais: a transição energética. Mais do que preparar o futuro, trata-se de garantir condições de vida hoje, em um planeta que precisa continuar a pulsar saúde e vitalidade.

O avanço revelado pelo BEN 2025 comprova que o Brasil está no caminho da construção de uma matriz mais limpa e sustentável. Mostra também que a preocupação ambiental está cada vez mais presente — seja na dona de casa, no pequeno comerciante ou no grande industrial. E não poderia ser diferen-

te: os desafios da energia e da sustentabilidade não são exclusivos de ambientalistas, pesquisadores ou gestores públicos. São de todos nós.

Fomentar o debate e mobilizar diferentes atores é justamente a proposta da Smart Energy – Conferência Internacional de Energias Inteligentes, que neste ano chega à sua nona edição. Durante dois dias, especialistas de trajetórias diversas se reunirão para discutir o tema central: “Caminhos para um setor energético integrado e resiliente”. A riqueza do encontro estará justamente na convergência de olhares que, embora distintos, buscam um horizonte comum e viável.

Celebramos também a retomada da revista Smart Energy, que volta ao público com a missão de aprofundar discussões estratégicas para o setor. Além de reportagens e artigos de opinião, a publicação terá como diferencial a inclusão de artigos científicos revisados por renomados pesquisadores, unindo rigor acadêmico e compromisso editorial.

Boa leitura.

Eduardo Marafon

Diretor-presidente do Tecpar



“A Eletrobras tem papel fundamental no desenvolvimento sustentável do Brasil, promovendo uma matriz energética cada vez mais limpa.”

Cleicio Martins Poletto
diretor-presidente da Eletrobras
– CGT Eletrosul

NOVOS CAMINHOS PARA A ELETROBRAS

Antes de ser privatizada, em 2022, a Eletrobras já era a maior companhia do setor elétrico da América Latina. Mesmo com esse porte, nos últimos três anos a companhia passou por mudanças significativas, a começar pela cultura estratégica marcada pela transparência na comunicação, capacidade de investimento e modernização com planejamento de longo prazo.

Com uma governança mais robusta, a companhia fortaleceu sua reputação em um ambiente regulatório e competitivo. Eficiência nos negócios, na gestão e na segurança operacional faz parte da identidade da empresa, que planeja cada novo passo optando por um modelo de gestão integrado.

Presente em todas as regiões do país, a Eletrobras produz mais de 143 GWh, o que representa 22% da capacidade instalada nacional – deste total, 98,5% são de fontes renováveis. Focada em clientes e negócios, a companhia estabeleceu metas ousadas na geração de energias limpas e renováveis: pretende ser net zero até 2030, ou seja, *equilibrar a quantidade de gases de efeito estufa que emite com a quantidade que remove da atmosfera*.

“Estamos realizando movimentos importantes de descarbonização, como a eletrificação da nossa frota, além de engajar fornecedores na redução das emissões ao longo da cadeia de valor”, afirma Cleicio Poletto Martins, diretor-presidente da Eletrobras – CGT Eletrosul.

Investimentos, modernização das subestações, novas obras e o Plano Estratégico da Eletrobras são destaques desta entrevista exclusiva com Cleicio Martins Poletto nesta nova edição da **Revista Smart Energy**. Confira:



Foto: Berranos

A Usina Termelétrica Candiota, localizada no Rio Grande do Sul, que ainda utiliza carvão como combustível, foi vendida pela companhia

Revista Smart Energy: Em maio de 2025, a Eletrobras anunciou a intenção de vender parte de sua participação no setor de usinas nucleares, estratégia voltada para direcionar esforços às energias renováveis. Qual é o volume de investimentos da empresa em fontes renováveis e qual a relevância desse direcionamento para o negócio?

Cleicio Poletto Martins: Somos a maior companhia do setor elétrico da América Latina e líderes em geração e transmissão no Brasil. Contribuímos para que a matriz energética nacional esteja entre as mais limpas e renováveis do mundo. Nosso portfólio de geração ultrapassa 44GW, respondendo

por 17% da capacidade instalada do país. Aproximadamente 99% dessa capacidade provém de fontes com baixa emissão de gases de efeito estufa, como energia hídrica, eólica e solar, contribuindo para que a matriz energética nacional seja uma das mais limpas do mundo.

Na região Nordeste, conduzimos o maior investimento da nossa história na modernização do Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso e das usinas de Sobradinho, Xingó e Luiz Gonzaga – um total de R\$ 2,5 bilhões até 2031. No Norte, destinamos R\$ 1,25 bilhão à modernização da Hidrelétrica Tucuruí, o maior investimento em seus 40 anos. No Sul, entregamos o Complexo Eólico Coxilha Negra (RS), com investimentos de R\$ 2,4 bilhões.

RSE: A Eletrobras concluiu obras na Subestação Curitiba, com investimento em torno de R\$ 150 milhões, além de ter realizado modernizações em Foz do Iguaçu. Há previsão de novas modernizações no Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul ainda neste ano?

CPM: Ainda em 2025, estão previstas ampliações, reforços e melhorias em diversas subestações, como por exemplo, Curitiba, Ivaiporã, Salto Osório, Salto Santiago e Campo Mourão, no Paraná; Joinville, Blumenau, Itajaí, Jorge Lacerda A e B, Palhoça e Campos Novos, em Santa Catarina; e Gravataí, Farroupilha e Tapera 2, no Rio Grande do Sul.

ENTREVISTA: **CLEICIO MARTINS**

RSE: Quais são os principais projetos em energias renováveis atualmente em andamento pela Eletrobras?

CPM: A Eletrobras tem papel fundamental no desenvolvimento sustentável do Brasil, promovendo uma matriz energética cada vez mais limpa. As usinas de Tucuruí e Paulo Afonso recebem os maiores investimentos em modernização, garantindo maior confiabilidade operacional, segurança do sistema e melhor desempenho dos ativos.

No contexto das soluções sustentáveis, firmamos parcerias com grandes players para o desenvolvimento de projetos voltados, por exemplo, a produção de hidrogênio verde, utilizando a energia gerada pelas nossas hidrelétricas. Evoluímos no projeto piloto e o objetivo é consolidar a Eletrobras nessa tecnologia. A empresa está se preparando para fornecer energia limpa de forma competitiva e estruturar parcerias que viabilizem a descarbonização de diversos segmentos.

RSE: A empresa anunciou investimentos de R\$ 6,7 bilhões para a construção de sete novas subestações e 19 novas linhas de transmissão até 2027, no Nordeste e em Minas Gerais. Qual será o impacto dessas obras na expansão da rede de transmissão e na segurança energética do Brasil?

CPM: Somos responsáveis por mais de 74 mil quilômetros de linhas de transmissão, o equivalente a quase duas voltas ao redor do planeta – 39% da malha do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nossa estratégia de expansão inclui novos investimentos em transmissão. Entre 2022 e 2024, arrematamos seis lotes



Segundo a Eletrobras, a subestação de Salto Osório (PR) receberá ampliações e melhorias neste ano.

em leilões da Aneel, com projetos em diversas regiões do país. Os empreendimentos somam 2.300 km de linhas e 6.080 MVA de capacidade de transformação, com investimentos estimados em R\$ 6,4 bilhões e previsão de receita adicional de R\$ 672 milhões após a energização.

Em agosto, entregamos a subestação Caladinho II, que integrará Humaitá (AM) ao SIN e aumentará a capacidade de atendimento a Porto Velho (RO). Destaco também o Linhão Manaus - Boa Vista, com 724 km e 1.390 torres – o maior projeto do setor elétrico brasileiro e fundamental para integrar Roraima ao SIN, substituindo combustíveis fósseis por fontes limpas. Neste momento, esse projeto está na fase final de implantação.

RSE: Qual é o papel das subestações na melhoria da qualidade e estabilidade da energia entregue ao consumidor? E de que forma a modernização das estruturas existentes pode evitar falhas ou apagões no sistema elétrico brasileiro?

CPM: As subestações desempenham um papel fundamental na segurança do sistema elétrico, proporcionando qualidade e estabilidade da energia fornecida aos consumidores. Modernizar essas estruturas significa preparar o Brasil para um consumo energético ainda mais dinâmico, sustentável e confiável, reduzindo riscos de interrupções e melhorando o atendimento à população e ao setor produtivo. Os investimentos em reforços e melhorias contínuas estão alinhados ao planejamento do sistema elétrico nacional e às diretrizes dos órgãos reguladores. Incluem, ainda, a expansão da rede de transmissão com novas linhas e subestações, além de estudos que avaliam a necessidade de modernizar instalações existentes, com base em projeções de demanda e capacidade do sistema.

RSE: No Plano Estratégico da Eletrobras para o período de 2023 a 2027, constam diretrizes de descarbonização e valorização da Agenda ESG. Quais são os principais projetos e ações previstos para alcançar essas metas?



Foto: CGT Eletrosul

Subestação de Campos Novos, em Santa Catarina, passará por modernização.

CPM: A Eletrobras reduziu, em 2024, 17% de suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) na comparação com o ano anterior. Isso equivale a menos 359 mil carros circulando por um ano no país. As operações da companhia, incluindo subsidiárias e Sociedades de Propósito Específico (SPEs) integrais, emitiram no ano passado 4,712 milhões de toneladas de carbono equivalente (tCO₂), o menor nível dos últimos cinco anos.

O fator que mais contribuiu para esse resultado foi a venda da Usina Termelétrica Candiota (RS), que utiliza carvão como combustível. A decisão demonstra o acerto da estratégia de descarbonização adotada pela empresa, que segue em 2025, o processo de alienação de seu portfólio de usinas termelétrica a gás natural que soma 2GW de capacidade instalada.

Nossas ações seguem os nove Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) priorizados pela Eletrobras e os dez Princípios do Pacto Global, do qual somos signatários desde 2006. Desenvolvemos ainda a Jornada de Sustentabilidade da Eletrobras para mapear os temas mais relevantes da nossa atu-

ação ESG e avaliar nosso nível de maturidade. Esse processo resultou em um roadmap ESG incorporado à estratégia da companhia, orientando ações e decisões estratégicas, além de promover um olhar construtivo sobre riscos e fragilidades.

Estamos comprometidos com a meta de sermos net zero até 2030 e estamos realizando movimentos importantes de descarbonização, por exemplo, iniciamos a eletrificação da nossa frota, além de engajar fornecedores na redução das emissões ao longo da cadeia de valor.

RSE: No mesmo documento, a empresa se compromete a ajudar o país a buscar independência energética e apoiar a transição para fontes renováveis. Como está o andamento desse processo?

CPM: Reconhecemos nosso papel na transição para uma economia de baixo carbono e estamos evoluindo nosso modelo de negócio para reduzir as emissões de GEE em nossas operações. Desde 2023, intensificamos nos-

sa atuação climática. Estabelecemos a meta de reduzir em 90% nossas emissões totais até 2030, compensando até 10% das emissões residuais que não forem passíveis de eliminação. Essa estratégia reforça nosso compromisso com o crescimento sustentável, com foco na qualidade, eficiência e infraestrutura elétrica nacional.

RSE: A Eletrobras tem a meta de se tornar uma Green Major até 2030, ou seja, ser uma companhia com base majoritariamente de energia limpa ou emissões neutras. No entanto, ainda mantém termelétricas a gás natural, que geram emissões relevantes. Como está a transição para alcançar essa meta?

CPM: Em 2024, a Eletrobras realizou as alienações do Complexo Termoelétrico de Candiota, único ativo a carvão da companhia, e do seu portfólio termoelétrico a gás natural. Nesse contexto, demos mais um passo significativo em nossa jornada de descarbonização, com o processo de alienação do portfólio termelétrico a gás da companhia. A decisão demonstra o acerto da estratégia de descarbonização adotada pela empresa, que segue o processo de alienação de seu portfólio de usinas termelétrica a gás natural que soma 2 GW de capacidade instalada. Essas vendas têm ainda como objetivo mitigar riscos financeiros, operacionais e regulatórios e otimizar nosso portfólio baseado em energia limpa e renovável.

Como parte da nossa jornada de descarbonização, além do desinvestimento em termelétricas e do abatimento de emissões com certificados de energia renovável, investiremos na

ENTREVISTA: CLEICIO MARTINS

compensação de emissões residuais com créditos de carbono provenientes de ações de reflorestamento. Investimos também no desenvolvimento de uma base robusta de engenharia voltada ao projeto e à implantação de plantas de produção de hidrogênio, além de estruturar um amplo portfólio de projetos. Essas iniciativas visam atender às demandas por energia limpa de setores essenciais como siderurgia, mineração, papel e celulose, petróleo e gás, transporte e agronegócio.

RSE: Em maio, a companhia divulgou um balanço trimestral com prejuízo de R\$ 81 milhões. Embora o resultado tenha sido impactado pela revisão da base regulatória de ativos da Chesf feita pela Aneel, quais estratégias estão sendo adotadas para evitar novos prejuízos e quais os maiores desafios para manter a saúde financeira?

CPM: A Eletrobras tem apresentado resultados financeiros robustos, sendo o principal exemplo o lucro líquido de R\$ 10,4 bilhões no ano de 2024, com crescimento de 136% em relação ao ano anterior, tendo sido o terceiro maior lucro da companhia em toda a sua história. Como dito na própria pergunta, o resultado [divulgado em maio] teve forte impacto de revisão regulatória. É natural que, em uma empresa do porte da Eletrobras, alguns fatores regulatórios pontuais impactem os resultados de um trimestre. No entanto, a companhia tem mantido o foco na eficiência operacional e na disciplina de capital, o que nos permite enfrentar esses desafios com solidez.



Até 2027, a Eletrobras anunciou investimentos de R\$ 6,7 bilhões para a construção de sete novas subestações e 19 novas linhas de transmissão.

RSE: Quais são os maiores desafios enfrentados pela Eletrobras para manter a saúde financeira e realizar a transição necessária para as energias limpas?

CPM: Temos consciência do nosso potencial para impulsionar a transição energética global. Por isso, investimos continuamente em projetos voltados à sustentabilidade do consumo de energia na sociedade. Nossas iniciativas abrangem desde o desenvolvimento de novas tecnologias para geração a partir de fontes renováveis até projetos de mobilidade elétrica. Entre os principais investimentos está o hidrogênio verde (H2V), obtido a partir de fontes renováveis. Instalamos a primeira planta de produção de H2V do país na Hidrelétrica Itumbiara (2.000 MW), na divisa entre Minas Gerais e Goiás. Em 2024, avançamos na prospecção de mercado e firmamos acordos estratégicos com potenciais clientes e fornecedores.

RSE: Qual é a capacidade total instalada da Eletrobras atualmente e quanto desse total provém de fontes renováveis? Qual é a meta de expansão da geração limpa em gigawatts (GW)? Quais são os principais desafios para atingir o net zero até 2030?

CPM: Do ponto de vista operacional, geramos 143.487,2GWh em 2024, sendo responsáveis por 22% do total da capacidade instalada do país. Desse total, 98,5% provém de fontes renováveis. No Centro de Referência de Energia Solar de Petrolina, em Pernambuco, desenvolvemos o maior projeto de hibridização de fontes renováveis do Brasil, com sistemas que combinam energia fotovoltaica onshore e flutuante, energia solar de alta concentração e energia eólica, além de armazenamento inteligente. Desenvolvemos, ao longo de 2024, um projeto de sinergia entre a geração solar e eólica, com o armazenamento de energias sazonais e inter-



FOTOS: ANILDO BORGES

mitentes em sistemas híbridos de armazenamento por baterias. No total, a Eletrobras investe mais de R\$200 milhões em projetos inovadores de flexibilização energética, combinando tecnologias e estratégias para maximizar o potencial das energias renováveis.

RSE: Qual é a relação entre a privatização da Eletrobras, em 2022, e a definição de metas mais ambiciosas de sustentabilidade?

CPM: A nova gestão da Eletrobras está focada na modernização e na recuperação da capacidade de investimento, com atenção ao cliente. A transformação cultural e a comunicação clara reforçam a confiança dos acionistas, com uma visão de longo prazo. Após a capitalização, a companhia consolidou-se como uma empresa privada com governança robusta, alinhada ao modelo de corporation, fortalecendo sua reputação em um ambiente regulatório e financeiro desafiador.

RSE: Para a Eletrobras, quais os caminhos para um setor integrado e resiliente de energia? O que a companhia tem feito para isso?

CPM: Como maior empresa de energia da América Latina, temos papel ativo na transformação digital e na resiliência operacional. Buscamos continuamente eficiência e segurança, com um modelo de gestão integrado em todo o Brasil. Nesse sentido, um exemplo de integração e de obra estratégica para a Eletrobras, para o setor elétrico e para o Brasil é o Linhão Manaus - Boa Vista, em estágio final de implantação. Não é apenas o maior projeto do setor elétrico nacional, trata-se da ligação do último estado brasileiro ao Sistema Interligado Nacional. Conta com um investimento de R\$ 3,3 bilhões, com tecnologia de ponta, que resultará na troca do combustível fóssil pela energia limpa e renovável, proporcionando segurança energética para Roraima. Essa integração de Norte a Sul também se reflete na área

de geração. Aproveitando o grande potencial eólico do Rio Grande do Sul, alcançamos a operação plena com o Parque Eólico Coxilha Negra, localizado em Santana do Livramento. Esse novo empreendimento contribui para a expansão das fontes renováveis e promove o desenvolvimento sustentável na região. Com investimento de R\$ 2,4 bilhões, o parque conta com 72 aerogeradores e capacidade instalada de 302,4 MW — energia suficiente para abastecer mais de 1,5 milhão de consumidores.

Tão importante quanto a implantação de ativos é o investimento em reforços e melhorias na transmissão e a modernização de nossas hidrelétricas. Em paralelo, o monitoramento em tempo real das condições climáticas e do desempenho de nossos ativos antecipa atuações operacionais visando a mitigação de riscos e trazendo ganho de confiabilidade. Um exemplo disso é o Centro de Monitoramento de Ativos e de Condições Meteorológicas da Eletrobras, que de maneira integrada oferece recursos e soluções voltadas ao acompanhamento de nossos empreendimentos, aplicando análises avançadas de dados e inteligência artificial. Esse investimento em inovação garante cada vez mais segurança aos nossos profissionais e operações pelo Brasil.

Todos esses avanços, aliados à capacitação contínua, à cultura de segurança em primeiro lugar e à sinergia entre as equipes, fortalecem nossa capacidade de operar um sistema cada vez mais resiliente e integrado. Com ativos estruturantes para o Brasil, estamos preparados para enfrentar os desafios da flexibilidade operacional e para seguir impulsionando o desenvolvimento do setor elétrico nacional.

PARANÁ 2.0

COM 98% DE SUA ENERGIA LIMPA, O ESTADO TRABALHA NA CONSTRUÇÃO DE UM PLANO ENERGÉTICO PARA OS PRÓXIMOS 25 ANOS

Pelo menos dois rankings nacionais reconhecem o Paraná como o estado mais sustentável do país. Um deles é a classificação da consultoria Brigh Cities, especializada em diagnósticos e projetos para cidades inteligentes e sustentáveis, que utiliza padrões indicados pela Organização das Nações Unidas (ONU) e considera indicadores ambientais. O outro é o Ranking de Competitividade dos Estados, elaborado pelo Centro de Liderança Pública (CLP), organização não governamental e suprapartidária, que avalia, entre outros critérios, o combate ao desmatamento.

Embora sustentabilidade seja um termo amplo – que envolve aspectos financeiros e qualidade de vida –, sua essência está em mitigar os impactos humanos sobre o meio ambiente. E o Paraná tem buscado avançar especialmente nas áreas ambiental e energética, temas desafiadores para gestores públicos em todo o mundo.

O superintendente da Supen (Superintendência-Geral de Gestão Energética), o engenheiro eletricista e professor Sandro Nelson Vieira, formado pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), afirma que 98% da sua matriz energética paranaense já é limpa.

“O Paraná já é o estado mais sustentável do ponto de vista energético por conta da matriz renovável que nós temos, principalmente potencializada pela hídrica. Há também a fonte eólica,



Foto: Leonardo Siqueira/SEPL

Sandro Vieira está à frente da Supen desde junho e lidera o desenvolvimento do plano energético do Paraná.

embora muito pequena, mas que somada à hidráulica e à fotovoltaica garante grande participação às energias renováveis”, explica.

Ele destaca ainda o papel da biomassa, originada de resíduos e dejetos da produção da proteína animal (segmento em que o Paraná é líder nacional), além de sobras agroflorestais e do setor sucroenergético. Esses materiais alimentam a produção de biogás, que, após o processo de purificação, pode se transformar em biometano. “Esse recurso pode ser usado como combustível, em processos de acumulação de energia — como na amônia, que serve tanto como insumo energético quan-

to fertilizante. Estimular a produção de biomassa para energia significa deixar de desperdiçar riquezas. Se não aproveitarmos esses dejetos, estaremos literalmente jogando dinheiro fora”, reforça Vieira.

Segundo levantamento do Cibio-gás (Centro Internacional de Energias Renováveis), o estado possui 426 plantas instaladas, sendo que 348 são da agropecuária. Só em 2024, o Paraná foi o responsável por 53% do volume de geração de biogás na região Sul, com 461 milhões de metros cúbicos normais. “Hoje, o estado não é o maior produtor em termos de energia, mas é o que possui mais plantas instaladas de bio-

gás. Precisamos aproveitar esse potencial”, salienta o superintendente.

Para consolidar todo o seu potencial, o governador Carlos Massa Ratinho Júnior assinou em maio, o Decreto 9.817, que isenta de ICMS operações ligadas à fabricação de biogás, biometano e metanol. A medida abrange máquinas, equipamentos, aparelhos e componentes usados na geração de energia, como bombas, compressores e ventiladores.

Na ocasião, o secretário estadual da Fazenda, Norberto Ortigara, afirmou que a política fiscal busca ampliar a competitividade do Paraná na atração de investimentos em energia renovável. “Queremos consolidar o estado como referência e polo na produção de novas energias. Incentivos fiscais como a isenção do ICMS são formas de pavimentar esse caminho”, disse.

Ortigara acrescentou que é necessário tornar o biometano economicamente viável, condição essencial para que o Paraná avance na sustentabilidade. “Temos potencial para sermos uma Arábia Saudita do combustível renovável”, destacou.

Além da política fiscal, o estado também atua em outras frentes. Uma delas é o programa Paraná Energia Rural Renovável (RenovaPR), executado pelo IDR-Paraná, que incentiva os produtores rurais a gerar sua própria energia ou combustível. Outro estímulo oferecido são os juros subsidiados para projetos de energia renovável, por meio do **Banco do Agricultor Paranaense**.

Matriz 100% limpa

Tornar a matriz energética do estado totalmente limpa não é uma tarefa simples. “Infelizmente, há uma necessidade no setor elétrico, não apenas no Brasil, mas no mundo, que é a estabilidade das fontes energéticas – a entrega precisa ser firme. Fontes como solar e eólica são intermitentes, já que não



Paraná isentou operações para aquisição de bens destinados à fabricação de biometano.

Foto: Gerardo Buitoni/ABN

temos controle sobre o fluxo do sol ou do vento. Por isso, ainda dependemos da energia térmica. É preferível quando essa energia térmica vem do gás natural em vez do carvão, por conta das emissões de carbono, mas essa necessidade é real”, explica.

Nesse sentido, a Supen tem direcionado esforços para soluções de armazenamento. “Não falamos apenas do ponto de vista químico, através de baterias, mas também de alternativas como usinas hidroelétricas reversíveis que pudesse rebombear água que já passou pelas turbinas ou está no leito do rio novamente para o reservatório, ou seja, que pudesse usar o excedente energético quando se tem uma grande disponibilidade solar, por exemplo”, sugere.

Criada em novembro de 2024, a Supen lidera o desenvolvimento do Plano Energético do Estado para os próximos 25 anos. “O plano busca, por um lado, dimensionar a necessidade de expansão energética e criar estímulos para que o setor privado invista em geração de energia; por outro lado, estar próximo à Copel. Embora o Paraná não seja mais o controlador, é acionista e precisa zelar pela segurança energética do Estado, para termos um sistema cada vez mais robusto e menos vulnerável.”

No início deste ano, a Superintendência, em conjunto com a Paraná Projetos, entregou o Plano de Hidrogê-

nio Renovável e o Plano de Biogás e de Biometano. “É uma série de ações que agora precisam ser empreendidas. Um exemplo foi o decreto do governador que isentando o ICMS para a cadeia produtiva paranaense de bio-refinarias. Outro ponto é a articulação de um comitê de governança, com as sete secretarias do estado, para tratar do tema do biogás e biometano”, detalha.

Outra frente é a elaboração de um plano estratégico de descarbonização do Paraná, fundamental para a transição energética. Vieira esclarece que o Paraná já conta com uma limpa, graças às fontes renováveis, especialmente a hídrica. Contudo, o problema são as usinas térmicas, em particular as que ainda utilizam carvão. “É preferível recorrer ao gás natural, ainda que seja uma fonte fóssil, por emitir menos gases de efeito estufa do que o carvão, altamente poluente”, compara.

Fazem parte do escopo da Supen a Coordenação de Energia Elétrica; a Coordenação de Gás, Biocombustível e Hidrogênio; e a Coordenação de Inovação, Infraestrutura, Mobilidade Elétrica, Baterias e Data Center. “A Supen tem um papel de articulação e de promoção, de aceleração, fazendo uma interface com as demais secretarias para o que essas ações se consolidem no nosso estado.”

ITAIPU SE PREPARA PARA ENTRAR NO MERCADO DE CERTIFICAÇÃO VERDE

**I-RECs DEVERÃO SER COMERCIALIZADOS A
PARTIR DO PRIMEIRO SEMESTRE DE 2026**



A Usina Hidrelétrica de Itaipu está prestes a concluir o processo que permitirá a comercialização dos Certificados Internacionais de Energia Renovável (I-RECs, na sigla em inglês). Esses documentos funcionam como um selo internacional que comprova a origem limpa da energia consumida por empresas, reforçando seu compromisso com práticas de sustentabilidade.

“Hoje há uma exigência crescente, tanto da sociedade quanto do mercado financeiro, para que as empresas utilizem energia renovável em seus processos. Mesmo aquelas que ainda emitem gases poluentes podem compensar suas emissões adquirindo créditos de energia limpa, em resposta à demanda por maior responsabilidade ambiental”, explica o diretor financeiro da Itaipu, André Pepitone.

A Itaipu atuará como provedora desses certificados, que agregam credibilidade às companhias que adotam metas ESG (Environmental, Social and Governance). Essas empresas também ganham em reputação e valor de mercado ao adotarem práticas responsáveis do ponto de vista ambiental, social e de governança. Segundo Pepitone, empresas que cumprem metas de sustentabilidade têm acesso a financiamentos mais atrativos, como green bonds, especialmente destinados a projetos sustentáveis.

A previsão é que a comercialização dos I-RECs comece no primeiro semestre de 2026. Pepitone afirma que o processo está em fase de apro-

vação interna, com submissão à diretoria binacional (Brasil e Paraguai), e que, do ponto de vista brasileiro, já está equacionado.

De acordo com Pepitone, qualquer empresa conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) poderá adquirir os I-RECs de Itaipu para comprovar o uso de energia renovável e avançar em suas metas ESG.

Destaque global

Além de representar uma nova fonte de receita para Itaipu, a oferta dos I-RECs consolida a inserção da usina no mercado global da economia verde. Pepitone declara que: “nosso compromisso é consolidar a posição de destaque do Brasil para a descarbonização da matriz energética do planeta. Temos uma matriz energética limpa e renovável. Impulsionando o mercado de certificações de energia renovável, firmamos o Brasil como provedor de soluções de baixo carbono para outras nações”.

Os estudos para viabilizar a emissão desses certificados começaram em 2024, em uma parceria entre Itaipu, Cibiogás e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). A iniciativa busca fomentar o mercado de RECs, créditos de carbono e green bonds no país. O processo de qualificação deve ser conduzido pelo Instituto Totum, que habilitará a Itaipu a oferecer os certificados ao mercado. O instituto é o único autorizado e reconhecido no Brasil para avaliar e qualificar empresas a emitirem os certificados I-REC.



Foto: Fabio Rodrigues/Agência Brasil

“Hoje há uma exigência crescente, tanto da sociedade quanto do mercado financeiro, para que as empresas utilizem energia renovável em seus processos. Mesmo aquelas que ainda emitem gases poluentes podem compensar suas emissões adquirindo créditos de energia limpa, em resposta à demanda por maior responsabilidade ambiental”

André Pepitone
- diretor financeiro da Itaipu

PLANO DE DESCARBONIZAÇÃO RECEBE CONTRIBUIÇÕES ATÉ 20 DE SETEMBRO

CONSULTA É ABERTA AO PÚBLICO EM GERAL



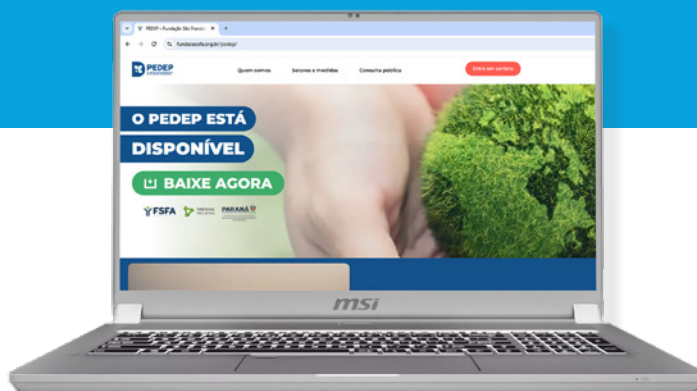
Foto: AEN

Agricultura é um setor crítico para a emissão de gases de efeito estufa

Está aberta até o dia 20 de setembro, a consulta pública promovida pelo governo do Paraná para receber contribuições ao Plano de Descarbonização da Economia Paranaense (Pedep). Todos os interessados podem participar, basta acessar o formulário disponível na página <https://fundacaosfa.org.br/pedep/>, baixar o documento pelo

QR Code, ler o material e enviar suas sugestões conforme orientações do site.

Voltado à transição para uma economia de baixo carbono, o plano busca promover o desenvolvimento sustentável aliado às inovações tecnológicas. “A consulta pública é um importante instrumento para a comunidade participar efe-



Visite: fundacaosfa.org.br/pedep

tivamente na construção do Plano de Descarbonização”, afirma o secretário estadual do Planejamento, Ulisses Maia.

O Pedep tem origem em 2012, com a Política Estadual sobre Mudanças do Clima, e avançou em 2021, quando o estado aderiu às campanhas internacionais Race to Zero e Race to Resilience, lideradas pela Organização das Nações Unidas (ONU). Em 2023, com o lançamento do Plano de Ação Climática do Paraná, o Pedep foi integrado e ganhou condições de ser desenvolvido.

A primeira versão do documento foi entregue em julho de 2025. A versão final com as contribuições pertinentes está prevista para 30 de setembro. Após a finalização, o Pedep será entregue à Secretaria Estadual do Desenvolvimento Sustentável (Sedest), que vai coordenar e

executar a sua implantação. “A neutralidade de carbono não é apenas uma meta ambiental, mas um destino comum da humanidade. A consulta pública é o espaço onde cada voz pode ecoar, para que juntos deixemos às próximas gerações um legado de ar limpo, águas puras e futuro sustentável”, salienta o secretário estadual do Desenvolvimento Sustentável, Rafael Greca.

Mais de 60 medidas prioritárias

O documento conta com 161 páginas e foi estruturado com base em análises setoriais, cenários prospectivos e aplicação de avaliações multicritério. Ele consolida uma estratégia técnica, política e institucional em direção à neutralidade de carbono no estado até 2050.

A abordagem do plano identificou 61 medidas prioritárias de mi-

tigação, distribuídas entre os principais setores responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa no Paraná: AFOLU (sigla em inglês para Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra), Energia, Transportes, IPPU (sigla em inglês para Processos Industriais e Uso de Produtos) e Resíduos.

Cada medida de descarbonização foi avaliada quanto ao potencial de abatimento, custo marginal, maturidade tecnológica, impactos socioambientais e alinhamento com as políticas públicas vigentes. O plano projeta a redução das emissões até 2050, com destaque para o setor AFOLU que, embora concentre parte significativa das emissões líquidas do estado, apresenta elevado potencial de compensação e reforça a viabilidade de alcançar a neutralidade de carbono no Paraná.

Equipe Pedep

O grupo de trabalho na elaboração do Pedep é composto por representantes das secretarias estaduais do Desenvolvimento Sustentável (Sedest), do Planejamento (SEPL); Agricultura e Abastecimento (Seab); Fazenda (Sefa); Administração e da Previdência (Seap); da Indústria, Comércio e Serviços (Seic); Instituto Água e Terra (IAT); Instituto de Tecnologia do Paraná (Tecpar); e Invest Paraná. O contrato é gerido pelo Serviço Social Autônomo Paraná Projetos (Paraná Projetos).

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA GERA ECONOMIA DE R\$ 650 MIL AO ANO EM INDÚSTRIA DE PAPEL DE SC

PROJETO QUE INTEGRA O PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ANEEL/CELESC FOI EXECUTADO NA EMPRESA IPEL E COORDENADO PELA ELETRON ENERGIA



Foto: Giovana Chaurim

A fábrica da Ipele está localizada em Indaial, Santa Catarina

A indústria de papel Ipele implementou na sua unidade de Indaial (SC) um projeto de modernização do sistema de preparo de massa de celulose, conduzido pela Eletron Energia S.A. A iniciativa substituiu partidas fixas por inversores de frequência com automação dedicada para o processo, permitindo o ajuste dinâmico da velocidade dos motores conforme a necessidade do processo.

O resultado foi uma redução de 42% no consumo de energia elétrica dos equipamentos otimizados. Isso equivale a uma economia mensal de R\$ 54.750,00 ou R\$ 650 mil ao ano.

A Eletron Energia S.A. é uma empresa especializada em soluções de eficiência energética para o setor industrial. Com sede no Paraná e atuação no Sul do Brasil, a empresa oferece projetos completos com engenharia, automação e financiamento via programas públicos, além de operar sob modelo BOT (Build, Operate and Transfer).

Segundo o diretor-geral da Ipele, Luciano Barboza, o consumo expressivo de energia sempre foi um dos grandes desafios da operação. Por isso, a empresa vem desenvolvendo há anos projetos voltados à eficiência energética, com foco nos benefícios ambientais e operacionais. “Este projeto desenvolvido pela Eletron Energia trouxe uma melhoria significativa para os nossos processos, gerando resultados concretos para nós. Mais do que isso, reforça o compromisso da Ipele com a sustentabilidade e com a perenidade do nosso negócio”, afirma.

A Ipel é uma das maiores fabricantes nacionais de papéis sanitários e descartáveis. Fundada em 1984, possui sede em Indaial (SC), com produção mensal superior a cinco mil toneladas. Atua nos segmentos institucional e doméstico, com foco em inovação, responsabilidade socioambiental e sustentabilidade.

Engenharia e automação integradas

Antes da modernização, os motores do setor “preparo de massa” da Ipel operavam 24 horas por dia, mesmo sem carga efetiva, o que gerava elevado consumo energético e desgaste precoce. “Era como manter um carro acelerado no ponto morto o tempo todo”, compara Alisson D’Agostin, especialista de Automação na Eletron Energia.

Na época, o sistema utilizava soft starters, dispositivos que suavizam o momento da partida dos motores, mas não permitem o ajuste da velocidade durante o funcionamento. Com a adoção dos inversores, passou-se a operar com rotação variável, adaptando-se à real necessidade do processo.

A atualização também contemplou o sistema de bombeamento da massa de celulose, antes regulado manualmente por válvulas. “O motor trabalhava em velocidade máxima e controlava-se a pressão com o fechamento das válvulas — uma abordagem menos eficiente”, explica D’Agostin. A automação permitiu o controle preciso da pressão via variação de frequência, aumentando a eficiência e reduzindo o desgaste mecânico.

A Eletron Energia desenvolveu integralmente os centros de controle de motores e a lógica automatizada. Agora, o operador seleciona os parâmetros conforme o tipo de papel a ser produzido, e o sistema ajusta automaticamente o tempo, volume e rotação ideais, garantindo eficiência e padronização do processo.

“Em resumo, esse projeto implementou inversores de frequência e um sistema de automação dedicado, garantindo maior confiabilidade aos processos, além de ganhos significativos em eficiência energética e performance operacional”, esclarece Victor Moraes, engenheiro na Eletron Energia.

Modelo de financiamento e retorno do investimento

O projeto de código PE-05697-0115/2024 e intitulado “Indústria + Eficiente - IPEL Papel” foi financiado integralmente pelo Programa de Eficiência Energética (PEE) da Celesc, sob regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). A Eletron Energia realizou os estudos, o projeto executivo e comissionamento, além de captar os recursos. “O Programa de Eficiência da Celesc pode ser 100% subsidiado pelas concessionárias, e o retorno do investimento é devolvido por meio da economia gerada após a implementação. É um modelo que viabiliza melhorias sem onerar diretamente a empresa, tornando a eficiência energética ainda mais acessível”, afirma o especialista de Automação na Eletron Energia.



Iniciativa automatizou motores na linha de produção e obteve economia de 42% na conta de luz relacionada aos equipamentos otimizados.

Segundo D’Agostin, a expectativa é de retorno do investimento em 18 me-

ses. Os primeiros resultados medidos já confirmam a eficácia das melhorias implantadas, que seguem sob acompanhamento técnico.

Eficiência que alia sustentabilidade e visão de futuro

O diretor-geral da Ipel destaca que a busca por eficiência é estratégica em um setor de alta concorrência: “Atuamos no setor tissue, de papéis para fins sanitários, que é altamente competitivo”, diz Luciano Barboza. Portanto, segundo ele, iniciativas que contribuem para a redução dos custos operacionais, especialmente de energia, são fundamentais. “Esse projeto, além de fortalecer nosso DNA sustentável, aumentou nossa competitividade. São dois fatores que caminham juntos e foram decisivos para o sucesso do projeto, que hoje já opera e entrega resultados muito positivos.”

Mais do que uma estratégia de negócio, ações como a da Ipel dialogam com uma agenda mais ampla: a transição energética brasileira. Em um momento em que o país avança em políticas públicas para descarbonização e ganha destaque global por sua matriz elétrica majoritariamente renovável, iniciativas de eficiência energética no setor industrial tornam-se peças-chave para cumprir metas de redução de emissões e uso racional de recursos.

Para o engenheiro Victor Moraes, da Eletron Energia, o caso da Ipel exemplifica como a eficiência energética pode ganhar protagonismo nesse processo. “Projetos como esse da Ipel precisam ganhar cada vez mais força. Essa empresa, com uma postura pioneira e extremamente assertiva, é um excelente exemplo de como aliar sustentabilidade e competitividade de forma inteligente”, destaca Moraes.



**Heverson Renan
de Freitas***

DO MINÉRIO AO REUSO, UM CAMINHO POSSÍVEL PARA O BRASIL E REGIÃO

As baterias são peças-chave da transição energética. Estão em carros elétricos, sistemas de armazenamento para energias renováveis e no nosso cotidiano. Mas falar em sustentabilidade vai além da eficiência durante o uso. É preciso olhar para todo o ciclo: de onde vêm os materiais, como são processados, de que forma são usados e o que acontece depois que deixam de ser úteis. Nesse ponto, o Brasil e a América do Sul têm uma oportunidade histórica: temos minérios, centros de pesquisa e um mercado em crescimento. O desafio é deixar de ser apenas exportador de matérias-primas e construir cadeias completas, com mineração responsável, produção competitiva e reciclagem eficiente.

Na mineração, o lítio já aparece em Minas Gerais e no triângulo do lítio entre Argentina, Bolívia e Chile. A experiência internacional mostra que o problema não é só extrair, mas garantir governança da água, redução de impactos locais e transparência. No caso do chumbo, a exploração já é consolidada, mas isso não dispensa monitoramento cons-

tante. Em ambos, a questão é a mesma: não repetir um modelo predatório e agregar valor aqui na região.

Entre as químicas de baterias de íons de lítio, cada uma ocupa um espaço. O LFP é seguro, barato e durável, ótimo para ônibus e sistemas estacionários. O NMC entrega mais densidade energética, mas depende de níquel e cobalto, que são caros e estratégicos. O LMFP tenta unir o melhor dos dois mundos, ganhando densidade em relação ao LFP sem a dependência crítica do NMC. Essa diferença importa também na reciclagem: NMC tem metais valiosos e já desperta interesse econômico, LFP é reciclável, mas menos atrativo financeiramente, e LMFP fica no meio. Em todos, recuperar o lítio é essencial — mas a viabilidade varia e pode exigir incentivo público para que aconteça em escala. Um resumo das principais químicas e seus desafios está na Tabela 1.

Outro ponto pouco discutido é o carbono do eletrodo negativo. Hoje, a maioria das baterias de íons de lítio usa grafite natural ou sintético. O natu-

ral vem da mineração; o sintético é feito a partir de coque de petróleo e consome muita energia. Nas baterias de íons de sódio já desponta o hard carbon, que pode vir de biomassa como lignina, tornando o processo mais limpo. O problema é que, na prática, esse carbono quase nunca é recuperado na reciclagem: acaba queimado no pré-tratamento das células. Ou seja, toda a pegada de carbono do grafite ou do hard carbon precisa ser absorvida em cada ciclo produtivo. Isso abre espaço para inovação no reaproveitamento de eletrodos negativos e para o desenvolvimento de rotas renováveis em larga escala. Um comparativo dos principais materiais de eletrodo negativo está na Tabela 2.

Na reciclagem de baterias de íons de lítio, a rota mais madura é a hidrometalurgia, que já começa a aparecer em pilotos no Brasil e no exterior. A bio-lixiviação é uma rota alternativa promissora, mas ainda em fase de pesquisa, sem escala industrial. Algumas indústrias nacionais já se movimentam, mas a escala é pequena — sim-

* Heverson Renan de Freitas é coordenador Smart Energy do Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica. É especialista em Baterias e doutor em Eletroquímica.

plesmente porque ainda não há grande volume de baterias em fim de vida que justifique investimentos pesados. O momento é de preparar o terreno: testar tecnologias, formar especialistas e ganhar experiência para quando a onda de descarte chegar.

Já nas baterias de chumbo-ácido, o cenário é diferente. Aqui o ciclo já é consolidado, com mais de 95% de taxa de reciclagem e legislação rígida sobre contaminação. O grande desafio é a pirometalurgia, que consome muita energia e emite gases. Hoje, os fornos funcionam principalmente com coque de petróleo, e em alguns casos com gás natural. Há alternativas realistas para reduzir a pegada: uso de biogás em substituição parcial ao gás natural, ganhos de eficiência térmica e aproveitamento de calor, além de eletrificação de etapas auxiliares com ener-

gia renovável. Falar em etanol não faz muito sentido, pelo custo e pelo baixo poder calorífico, e substituir totalmente a pirometalurgia por fornos elétricos ainda é inviável. O caminho é reduzir impactos sem perder viabilidade econômica.

Quanto às baterias de íons de sódio, vale o olhar pragmático. O sódio é de fato mais abundante e menos sujeito a riscos geopolíticos do que o lítio, e os eletrodos positivos usam materiais mais baratos e comuns. Mas ainda é cedo para falar em grande diferença de preço no produto final: falta escala industrial e maturidade. Em termos de desempenho, ficam abaixo das baterias de íons de lítio em densidade energética, mas podem ser bastante competitivas em aplicações estacionárias e de menor custo. É um campo em que o Brasil pode se destacar, aprovei-

tando recursos naturais abundantes e know-how em materiais.

O que se desenha é um quadro de escolhas técnicas e políticas. Para as baterias de íons de lítio, investir em hidrometalurgia, criar modelos para reciclar também LFP e LMFP e buscar soluções para os eletrodos negativos. Para o chumbo-ácido, reduzir a intensidade de carbono da pirometalurgia com biogás e eficiência energética, mantendo a cadeia circular já bem estabelecida. Para as baterias de íons de sódio, apostar em pesquisa e rotas renováveis de carbono. Se Brasil e América do Sul conseguirem articular essas frentes, teremos a chance de ser protagonistas de um setor que não só cresce no mundo todo, mas que será determinante para uma economia de energia mais limpa e sustentável.

Tabela 1 – Químicas de baterias

Química	Principais componentes	Vantagens principais	Reciclabilidade / desafios
Baterias de íons de lítio (LFP)	Lítio, ferro, fósforo	Segurança, baixo custo, longa vida útil	Menor valor de recuperação (sem Co/Ni); atratividade econômica baixa
Baterias de íons de lítio (NMC)	Lítio, níquel, manganês, cobalto	Alta densidade energética, uso em EV premium	Alta atratividade por conter Ni/Co; hidrometalurgia avançada
Baterias de íons de lítio (LMFP)	Lítio, manganês, ferro, fósforo	Combina baixo custo do ferro com maior densidade que LFP	Recuperação de lítio viável; valor moderado reduz incentivo
Baterias chumbo-ácido	Chumbo, ácido sulfúrico	Cadeia consolidada, reciclagem >95%	Pirometalurgia poluente; desafio é reduzir emissões
Baterias de íons de sódio	Sódio, ferro, alumínio, carbono	Abundância e menor risco geopolítico; bom para estacionário	Reciclagem incipiente; materiais de menor valor dificultam modelo

Tabela 2 – Materiais de eletrodo negativo

Material	Origem / fonte principal	Vantagens principais	Reciclabilidade / desafios
Grafite natural	Mineração de grafite	Boa performance eletroquímica, custo menor	Mineração intensiva; impactos locais; geralmente queimado, sem reaproveitamento
Grafite sintético	Coque de petróleo (alto consumo energético)	Maior pureza e estabilidade	Alta pegada de carbono; não é recuperado na reciclagem; emissões significativas
Hard carbon	Biomassa (lignina, resíduos agrícolas) ou fósseis	Alternativa renovável, promissora em íons de sódio	Estágio inicial; custos altos; reaproveitamento pouco explorado

APRENDIZADOS DE BOGOTÁ PARA O BRASIL

Luciano Carstens*

No passado, Bogotá se inspirou em Curitiba para estruturar seu sistema de transporte público, adotando o conceito dos corredores exclusivos e a lógica do transporte de massa baseado em ônibus. Décadas depois, o cenário se inverte: hoje, são os brasileiros que têm muito a aprender com a capital colombiana, especialmente no que se refere à eletrificação das frotas de transporte coletivo.

No dia 19 de agosto de 2025, ao lado do meu colega Dr. Henry Salamanca, tive a oportunidade de visitar a empresa E-Somos Fontibón, em Bogotá. A experiência mostrou como planejamento, integração entre atores e foco em sustentabilidade transformaram a mobilidade da cidade em um exemplo para toda a América Latina.

Um dos maiores diferenciais do projeto colombiano é a forma como os papéis foram distribuídos:

- A TransMilenio continua cuidando da operação do transporte e da relação direta com os passageiros.
- A empresa de energia local (Enel X) foi responsável pelo planejamento e implantação da infraestrutura elétrica, garantindo confiabilidade e capacidade de expansão.
- A E-Somos Fontibón assumiu a gestão da frota elétrica, com foco em recarga, manutenção, disponibilidade operacional e sustentabilidade.

Esse modelo permite que cada instituição atue em sua especialidade, sem sobreposição de funções ou disputas de competência. O resultado é eficiência, clareza na gestão e, sobretudo, a aceleração da transição energética no transporte urbano.

A garagem de Fontibón impressiona pelo nível de planejamento e investimento:

- 126 ônibus elétricos padronizados, o que simplifica manutenção e logística;
- 39 carregadores de 145 kW, cada um com duas saídas, capazes de recarregar simultaneamente dois veículos ou fornecer carga plena a

um único ônibus em menos tempo;

- 4 subestações, somando 9 MW de potência instalada, conectadas diretamente à rede;
- Tempo médio de recarga de 1h30 a 2h30, concentrado no período noturno;
- Políticas de equalização de quilometragem entre veículos, equilibrando desgaste da frota.

Cada ônibus possui baterias de 360 kWh (LFP), com consumo médio de 1,1-1,2 kWh/km e autonomia de até 260 km. Esse desempenho é favorecido pelo traçado urbano de Bogotá, em que aproximadamente 80% das rotas são planas, garantindo maior vida útil das baterias (estimada em mais de oito anos).

Outro ponto que se destaca é a atenção dada às práticas sustentáveis:

- Lavagem automatizada com reaproveitamento de até 80% da água consumida, complementada por sistemas de captação de chuva;



O caso de Fontibón mostra que eletrificação de frotas não é apenas uma questão tecnológica, mas também de governança, cooperação institucional e visão estratégica

- Gestão de resíduos em economia circular, com reaproveitamento de uniformes e EPIs descartados para a confecção de bolsas e acessórios;
- Estudos de segunda vida das baterias, que poderão ser reutilizadas como sistemas de armazenamento estacionário (Bess) dentro da própria garagem, reduzindo custos e aumentando a resiliência energética.

A segurança também foi amplamente considerada. Os ônibus contam com sistemas automáticos de combate a incêndio direcionados às baterias, podem atravessar áreas alagadas de até 30 cm com segurança e dispõem de redundância com dois geradores a diesel, capazes de recarregar até 30 veículos simultaneamente em caso de falhas na rede elétrica.

O resultado é concreto: segundo a operadora, os custos operacionais são até 40% menores em relação a uma frota movida a diesel. Além da

economia, a cidade ganha em qualidade do ar, redução de ruídos e confiabilidade do sistema.

Para os motoristas e passageiros, os benefícios também são claros: veículos com ar-condicionado, conectividade via USB, câmeras de segurança e monitoramento de fadiga garantem mais conforto e segurança. Além disso, os motoristas recebem incentivos para dirigir de forma mais eficiente, reduzindo o consumo energético e aumentando a vida útil das baterias.

O que o Brasil pode aprender

A experiência de Bogotá deixa lições valiosas:

Planejamento sistêmico – a transição energética precisa de coordenação entre energia, transporte e gestão pública.

Especialização de papéis – cada ator deve atuar onde tem maior expertise.

Infraestrutura dedicada – garagens planejadas para recarga e manutenção são fundamentais.

Padronização da frota – simplifica manutenção e logística.

Visão de longo prazo – considerar desde a primeira vida útil das baterias até aplicações futuras em BESS.

Se no passado o Brasil serviu de inspiração para Bogotá, agora temos a oportunidade de retribuir aprendendo com a Colômbia. O caso de Fontibón mostra que eletrificação de frotas não é apenas uma questão tecnológica, mas também de governança, cooperação institucional e visão estratégica.

O Future Grid do Lactec está preparado para apoiar esse movimento no Brasil, conectando inovação em redes inteligentes, eletromobilidade e sustentabilidade.

A transição da mobilidade elétrica já não é futuro: é presente, palpável e possível. Cabe a nós transformar essa inspiração em ação.

DESCARBONIZAR O SANEAMENTO: O EXEMPLO QUE O BRASIL PRECISA SEGUIR

Julio Gonchorosky*



Em tempos de emergência climática, em que os efeitos do aquecimento global se tornam cada vez mais evidentes, é necessário que todos os setores assumam um protagonismo para o enfrentamento às mudanças climáticas. O lançamento do Plano de Descarbonização da Sanepar é um exemplo e um marco não apenas para o Paraná, mas para todo o setor de saneamento básico no Brasil.

Historicamente, os holofotes da descarbonização estiveram voltados para áreas como energia, transporte e agropecuária — e com razão, dado o volume expressivo de emissões que esses setores produzem. No entanto, o saneamento básico, embora menos evidente, também é um vetor relevante de emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano e o óxido nitroso, ambos com poder de aquecimento global muito superior ao dióxido de carbono.

O metano (CH_4), pode ser emitido em processos de tratamento anaeróbico, e o óxido nitroso (N_2O), emitidos por processo aeróbios tem alto potencial de emissão dos GEE. Sendo que inclusive o N_2O tem um potencial de aquecimento global 265 vezes maior que o CO_2 , enquanto o CH_4 tem impacto 28 vezes superior.

A coragem da Sanepar em enfrentar esse desafio técnico e institucional deve ser reconhecida. Em um país onde ainda lutamos para universalizar o acesso ao saneamento, propor a modernização de processos com foco na sustentabilidade

de climática é, sim, um ato de inovação e responsabilidade. Isso demonstra que não há mais espaço para crescimento econômico dissociado de compromisso ambiental — e que é possível (e urgente) aliar os dois.

Isto está refletido no projeto inovador e piloto da Sanepar que é o de transformar sua sede administrativa em carbono neutra. Isto é mais do que simbólico: é uma mensagem clara de que a mudança começa de dentro. A empresa também investiu na compra de créditos de carbono, com incentivo a projetos sustentáveis que promovam a inclusão social e ambiental.

Além disso, incentivo a mudanças de hábitos dos empregados são ecos deste propósito da empresa. Os empregados são incentivados a utilizar como combustível dos veículos o etanol. Outra ação são as campanhas para redução do uso do papel em várias atividades, inclusive no estímulo aos clientes em aderirem à fatura digital.

A adesão ao GHG Protocol desde 2008 e as nove certificações com o Selo Ouro reforçam que não se trata de greenwashing, mas de um trabalho consistente ao longo do tempo. É importante também destacar o valor estratégico dessa iniciativa. O plano da Sanepar não se limita a compensações pontuais. Ele aposta em um diagnóstico técnico-operacional robusto, seguido de ações de mitigação estruturadas, uso de tecnologia e integração com práticas internacionais. Ou seja, não é discurso: é engenharia, é dado, é política pública aplicada.

Se o Brasil deseja, de fato, honrar seus compromissos no Acordo de Paris e avançar nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), precisamos multiplicar esse tipo de iniciativa. A Sanepar mostra que é possível caminhar rumo a uma economia de baixo carbono mesmo em setores complexos e com desafios operacionais como o saneamento.

Por isso, mais do que uma boa prática corporativa, o Plano de Descarbonização da Sanepar deve ser entendido como referência nacional. É hora de transformar a exceção em regra. O clima não espera. E o futuro precisa de empresas que, como a Sanepar, compreendam que desenvolvimento sustentável não é um luxo — é uma obrigação.

* Diretor de Meio Ambiente e Ação Social da Companhia de Saneamento do Paraná

BMZ BRAZIL CHEGA AO PAÍS E APOSTA EM MOBILIDADE ELÉTRICA COM PRODUÇÃO LOCAL DE BATERIAS

TEMPO DE GARANTIA E LOGÍSTICA REVERSA SÃO DIFERENCIAIS DA MARCA

A BMZ, grupo alemão especializado em baterias de íons de lítio, inaugurou sua unidade brasileira há pouco mais de um ano, em São José dos Pinhais, reforçando a presença da companhia na América Latina. A subsidiária, parte da BMZ Holding, chega em um momento estratégico, quando o mercado nacional de baterias ainda depende majoritariamente de importações e cresce com a expansão da mobilidade elétrica e dos sistemas de armazenamento de energia.

Com uma capacidade a ser instalada até o primeiro semestre de 2026, de produzir de 500 MW/ano, a BMZ Brasil direciona seus esforços para a fabricação de baterias de tração para ônibus, em um contrato de longo prazo com uma das maiores fabricantes globais do setor.

“Hoje, a BMZ tem um plano claro para produzir no Brasil uma bateria de tração para ônibus de maior capacidade e com o menor peso por quilowatt, comparada com as atuais do mercado”, afirma o CEO da BMZ Brazil, Francis Monteiro.

A unidade brasileira integra a rede global do BMZ Group, com equipamentos de montagem de ponta, incluindo solda a laser e controle de qualidade por inteligência artificial. “Nosso processo de montagem e End of Line Control é um diferencial tecnológico importante, garantindo precisão, segurança e eficiência na produção”, destaca.



“Hoje, a BMZ tem um plano claro para produzir no Brasil uma bateria de tração para ônibus de maior capacidade e com o menor peso por quilowatt, comparada com as atuais do mercado.”

Francis Monteiro, CEO da BMZ Brazil

Com operação também na Alemanha, Polônia, Macedônia do Norte, USA, China e no Japão, a unidade do Brasil usa células importadas de uma das maiores produtoras globais de baterias para veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia, adaptando o portfólio ao mercado local.

Além das soluções padrão, a BMZ oferece customização de baterias sob medida, atendendo a demandas específicas de clientes, desde ônibus e bicicletas até sistemas industriais e residenciais. No segmento de bicicletas elétricas, a empresa atende a uma das maiores produtoras de bicicletas do Brasil por meio de sua coligada da Polônia. “Oferecemos as baterias com maior capacidade do mercado”, assegura.

Entre os diferenciais da BMZ estão a garantia de dez anos para baterias, 20

para peças de reposição e a logística reversa. “Recolhemos e reciclamos as baterias em fim de vida, o que muitos fornecedores estrangeiros não fazem”.

Para Monteiro, o mercado brasileiro ainda apresenta obstáculos, especialmente regulatórios e de financiamento, mas a BMZ vê oportunidades para transformar o país em um polo de exportação de baterias na América Latina: “Se conseguirmos trazer um fabricante de células de excelente qualidade, poderemos alcançar um nível de produção imbatível”, avalia.

Após morar no exterior por mais de duas décadas, o empresário vê com otimismo o mercado brasileiro. “Passei mais de 25 anos fora e, hoje, vejo com muito orgulho o Brasil. Apesar dos desafios, acredito que temos tudo para nos tornar referência na produção de baterias na América Latina”, diz.

NAPI HIDROCARBONETOS RENOVÁVEIS FOMENTA A CRIAÇÃO DE UM PARQUE TECNOLÓGICO LIGADO À TRANSIÇÃO ENERGÉTICA



Professor Luiz Pereira Ramos é o articulador do Napi-HCR.

Conexão entre universidades e investimentos fortalece o projeto

Criado em 2021 e mantido pela Fundação Araucária, com apoio da Secretaria Estadual de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (Seti), o Novo Arranjo de Pesquisa e Inovação do Paraná em Hidrocarbonetos Renováveis (Napi-HCR) coordena ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação em tecnologias emergentes e sustentáveis para a produção de hidrocarbonetos a partir de matérias-primas renováveis.

A proposta é oferecer alternativas de combustíveis mais limpos por

meio do fortalecimento da cadeia de hidrocarbonetos renováveis, promover a substituição parcial ou integral do uso de derivados fósseis (como querosene de aviação, óleo diesel e gasolina) e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, além do reaproveitamento de resíduos orgânicos cujo acúmulo seria prejudicial ao meio ambiente.

“A redução estimada de emissões de carbono com o uso de hidrocarbonetos renováveis varia significativamente de acordo com o mode-

lo e a sua cadeia de produção, mas exemplos, como o biometano, demonstram um potencial de redução de até 99% nas emissões de CO₂ em comparação com combustíveis fósseis”, destaca o professor sênior da Universidade Federal do Paraná (UFPR) Luiz Pereira Ramos, pesquisador e articulador do Napi-HCR.

Idealizado por pesquisadores da UFPR, o arranjo conta com a participação de seis universidades do estado – Universidade Estadual de Londrina (UEL), Universidade Estadual

de Maringá (UEM), Universidade Estadual do Centro-Oeste (Unicentro), Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e Universidade Federal de Integração Latino-Americana (Unila).

Com base nos resultados já obtidos, o Napi-HCR entra em uma nova fase: a formação de um parque tecnológico conectado a outros grupos de pesquisa e inovação do estado, com o propósito de expandir o projeto e estruturar as cadeias produtivas já existentes. “Queremos que o parque tecnológico seja capaz de oferecer soluções a demandas estratégicas do estado e do país em linhas de pesquisa associadas ao desenvolvimento de tecnologias para a produção de hidrocarbonetos a partir de matérias-primas renováveis”, afirma o professor Ramos. Essa iniciativa conta com a participação estratégica do Instituto de Tecnologia do Paraná (Tecpar), que vem trabalhando na concepção do projeto conceitual do parque.

Essa nova etapa também prevê o fomento às economias locais. “Ao promover o uso sustentável dos recursos biológicos, será possível criar ou adensar cadeias produtivas locais em áreas como agricultura, biomateriais e bioenergia, dentre outras, gerando empregos de base tecnológica, diversificando as economias locais, possibilitando oportunidades para o desenvolvimento de negócios inovadores, garantindo renda e condições de trabalho dignas para as comunidades, além de valorizar o conhecimento tradicional”, considera.

O projeto ainda contempla o incentivo à formação, qualificação pro-

“Queremos que o parque tecnológico seja capaz de oferecer soluções a demandas estratégicas do estado e do país em linhas de pesquisa associadas ao desenvolvimento de tecnologias para a produção de hidrocarbonetos a partir de matérias-primas renováveis.”

Luiz Pereira Ramos,
articulador do Napi-HCR

fissional e retenção de talentos. Entre os objetivos está a capacitação de recursos humanos para atuar na pesquisa, desenvolvimento e inovação atreladas à cadeia de produção de hidrocarbonetos renováveis. O prof. Ramos reconhece que os programas de pós-graduação do estado, como os das áreas de engenharias e biotecnologia, estão capacitados a atender essa demanda, contudo, identifica que é preciso intensificar a qualificação de profissionais para atuar no setor.

“Há, indiscutivelmente, uma grande carência de inteligência e mão de obra para atuar nesta área do conhecimento, mas isso deverá ser corrigido na medida em que esses temas estejam em maior evidência na política de ciência e tecnologia nacional. No entanto, é preciso que ha-

ja uma ampliação das políticas de fomento dos órgãos oficiais de financiamento do governo, quer estadual ou federal.”

Também faz parte da agenda a implantação de uma unidade piloto de produção de bio-óleo sintético (bio-syn crude) a partir da reforma do biogás associada à reação de Fischer-Tropsch – processo que converte o biogás em um produto sintético análogo ao petróleo, porém, renovável e muito menos poluente.

Rotas tecnológicas

As pesquisas do Napi-HCR abrangem diferentes rotas tecnológicas para a produção de hidrocarbonetos renováveis, como o hidrotratamento de óleos e gorduras (HEFA e HVO), a conversão catalítica de gás de síntese via reações de Fischer-Tropsch, processos fermentativos com micro-organismos e o aproveitamento de CO industrial, dentre outros. Todas essas rotas dependem do acesso a hidrogênio de baixa emissão de carbono, que pode ser obtido por eletrólise da água, reforma de metano, etanol ou glicerol, processos fermentativos como o cultivo de microalgas e processos térmicos como pirólise e gaseificação da biomassa.

O Napi-HCR mantém parcerias internacionais com universidades e centros de pesquisa dos Estados Unidos, Canadá, Alemanha e Dinamarca, e também com o PtX-Hub e o Fraunhofer Institute. No país, a iniciativa recebe apoio de empresas do setor agroenergético, como 3Di Engenharia, ClBiogás, Sanepar, Copel, ERBR Energias Renováveis, Nuseed Brasil, BioFlex/Granbio, Buschle & Lepper, Next Chemical e ExxonMobil.

IA GENERATIVA DESAFIA REDES ELÉTRICAS E EXIGE NOVA INFRAESTRUTURA CRÍTICA

**A REVOLUÇÃO DE ARQUITETURA
COMPUTACIONAL E ENERGÉTICA
DA IA BATE À PORTA**

O avanço da inteligência artificial generativa (IA) está impondo uma pressão sem precedentes sobre a infraestrutura elétrica e computacional global. Segundo o Dr. Claudio Lima, referência em design de data centers hyperscale para IA, o crescimento acelerado dessas instalações exige entre 100 e 300 megawatts (MW) por site, podendo chegar a 1 gigawatt (GW), em prazos de apenas 24 a 36 meses. Esses cronogramas contrastam com o planejamento tradicional das concessionárias, que costumam operar em ciclos de cinco a dez anos para a construção de subestações e linhas de transmissão de alta tensão.

Além do descompasso entre demanda e capacidade instalada, há uma corrida mundial por transformadores, turbinas e sistemas de armazenamento, o que pressiona ainda mais a cadeia de suprimentos de energia. “Esse ritmo simplesmente não se encaixa nos modelos tradicionais de planejamento elétrico. O resultado direto é a perda progressiva da capacidade de resposta das concessionárias e dos planejadores centrais”, alerta Lima.

Ele explica que os data centers de IA generativa diferem profundamente dos modelos tradicionais, projetados para armazenar dados, hospedar sites, suportar streaming de vídeo ou aplicações corporativas. Enquanto esses centros consomem entre 5 e 15 quilowatts (kW) por rack, as novas instalações voltadas para IA generativa operam entre 60 e 130 kW por rack, impulsionadas pela alta concentração de servidores equipados com unidades de processamento gráfico (GPU, do inglês Graphics Processing

Unit) de última geração da NVIDIA, projetadas para treinamento e inferência de modelos.

“A escala e a densidade desses sistemas expuseram a defasagem das construtoras de data centers convencionais e dos fornecedores de energia, que não acompanham o ritmo da transformação. A explosão da IA generativa há pouco mais de um ano criou um paradigma de design e construção que pouquíssimas empresas dominam. É um mercado de especialização que ainda está nascendo”, afirma.

Gargalos e atrasos

Diversos projetos de IA já enfrentam atrasos por falta de energia disponível ou de conexão à rede, em grande parte devido à escassez de equipamentos elétricos. “Isso tende a se intensificar à medida que avançam as iniciativas de IA descentralizada e aplicações em larga escala”, diz.

Lima revela: há projeções que indicam que até 2030 os data centers hyperscale poderão ultrapassar mil terawatts-hora (TWh) de consumo anual de energia, colocando sob enorme pressão a infraestrutura de transmissão. “Esse consumo será impulsionado principalmente pelo treinamento e pela implantação de modelos de linguagem de larga escala (LLM, do inglês Large Language Models), desde sistemas no estilo GPT até arquiteturas agentivas, que exigem densidade computacional extrema. Racks de 130 kW já se tornaram realidade, e com o crescimento anual da IA entre 30% e 50%, a demanda elétrica avança mais rápido do que a capacidade de expansão da rede.”

“Estamos diante da revolução de arquitetura computacional e energética da IA. Não é apenas um desafio de energia, é o motor econômico do século XXI. E, como todo motor, precisa de combustível. Estamos preparados para abastecê-lo e construir a base tecnológica da próxima economia apoiada em IA?”

Dr. Claudio Lima

DATA CENTERS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Para contornar a limitação das concessionárias, muitos projetos adotam o modelo Bring-Your-Own-Power (BYOP), em que os data centers passam a gerar, armazenar e gerenciar sua própria energia localmente por meio de turbinas, painéis solares, baterias e microrredes inteligentes. “Nessa configuração, a instalação deixa de ser apenas consumidora e passa a atuar como nó ativo da rede elétrica”, esclarece.

Ele avalia que a grande oportunidade está na combinação de diferentes matrizes. A energia de base, proveniente de fontes firmes e estáveis como hidrelétricas, nucleares ou termoeletricas de ciclo combinado, garante o suprimento contínuo e previsível. Já as fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, entram como complemento estratégico, “reduzindo custos marginais e aumentando a participação de energia limpa.”

“Esse arranjo híbrido, que une geração firme e renováveis variáveis, cria a resiliência necessária para sustentar a alta densidade computacional exigida pelos data centers de IA generativa”, ressalta.

Dependência tecnológica X Autonomia digital

Além dos desafios tecnológicos, a infraestrutura de IA é uma questão geopolítica e estratégica. Países e empresas que não controlarem energia, cadeia de suprimento de GPUs, dados e centros de processamentos ficarão dependentes de provedores externos. “Essa será uma nova forma de dependência tecnológica. O domínio dos data centers de IA não diz respeito apenas à eficiência, mas também à privacidade, à segurança e à autonomia digital. A próxima década será marcada por uma corrida entre nações e corporações em busca dessa autonomia computacional para rodar modelos de IA de alto desem-

penho, o que envolve energia, dados, logística e governança.”

Claudio Lima observa que a transformação exigirá mudanças regulatórias e urbanísticas, implantação de subestações inteligentes, microrredes híbridas, sistemas de resposta rápida e integração digital orquestrada por IA – “mas nada disso será barato”, pondera.

Ele exemplifica que um projeto típico de hyperscale para IA generativa, nos Estados Unidos, parte de no mínimo de 100 MW de capacidade e requer investimentos de 5,5 bilhões de dólares em construção e equipamentos, equivalente a cerca de 80 mil GPUs NVIDIA H100. “O Colossus, data center de Elon Musk em Memphis (Tennessee), é exemplo desse novo padrão. Em países emergentes, estima-se que versões reduzidas, em torno de 20% desse valor, possam ser adequadas, ainda assim, altamente dependentes do custo elevado das GPUs, que representam 80% a 90% do investimento total.”

Considerando esse cenário, o Dr. Claudio Lima avalia que estamos diante do que chama de “revolução de arquitetura computacional e energética da IA”: “A IA não é apenas um desafio de energia, é o motor econômico do século XXI. E, como todo motor, precisa de combustível”, pontua. E lança a pergunta: “Estamos preparados para abastecê-lo e construir a base tecnológica da próxima economia baseada em IA?”





DATA CENTERS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

OS DESAFIOS DO BRASIL E O POTENCIAL SUSTENTÁVEL DO PARANÁ

CURITIBA CONTA COM DATA CENTERS SEGUROS

Foto: Daniel Castilho/SHUTS

A escalada do consumo por data centers levanta questões sobre a capacidade de suprimento e os riscos para os sistemas elétricos no Paraná e no país como um todo. O coordenador de Inovação e Infraestrutura da Supen, Zeno Luiz lensen Nadal, explica que a pressão sobre a rede deverá ser intensa, exigindo rápida expansão de geração e transmissão.

“Gargalos como leilões de energia, fornecimento de equipamentos e limitações regulatórias podem dificultar atender à demanda crescente”, afirma, Nadal, que é engenheiro industrial eletricitista, especialista em Eficiência Energética e mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

O aumento da carga de IA também pode elevar os custos de energia, além de gerar riscos de sobrecarga em redes de distribuição e transmissão. “Pode ocorrer ainda maior emissão de CO₂, caso o aumento de geração seja suprido por fontes fósseis”, observa. Apesar disso, o engenheiro avalia que com planejamento adequado, apenas poderá ocorrer instabilidade em regiões com infraestrutura mais frágil.

Para suprir a demanda, ele aponta algumas soluções: expansão acelerada de fontes renováveis (solar, eólica, hidrelétrica e biomassa) com armazenamento, instalação de plantas geradoras dedicadas aos empreendimentos de data centers de IA e gestão inteligente da rede elétrica por algoritmos, além da integração com baterias, usinas hidráulicas reversíveis e hidrogênio para reduzir picos de demanda.

Segundo o especialista, os principais desafios para viabilizar a expansão desses tipos de data centers de IA no Brasil são o alto custo da energia elétrica em comparação ao mercado internacional; as limitações de infraestrutura de transmissão em algumas regiões, requisitos de conectividade e segurança de dados, e a disponibilidade de sistemas de refrigeração eficientes frente a temperaturas elevadas. Outro ponto crítico é a escassez de mão de obra especializada para operar centros de alta eficiência.

Uma solução pensada é o uso de energias alternativas para abastecer data centers de IA, no entanto, Nadal esclarece que a adoção de fontes solares, eólicas ou de biomassa precisa ser complementada por fontes de armazenamento para garantir uma energia firme e estável. “Também há possibilidade de cogeração com biogás e biometano, especialmente em regiões próximas a polos agroindustriais”, acrescenta.

Na análise do coordenador da Supen, o Paraná apresenta condições favoráveis para se consolidar como referência no setor: Curitiba já abriga data centers com sistemas redundantes e seguros, e o estado possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, infraestrutura robusta de telecomunicações e backbones de fibra óptica.

“Com energia limpa e conectividade sólida, o Paraná tem potencial para se tornar um hub de data centers sustentáveis no Brasil”, destaca.



ESTUDO ESTIMA MAIS DE R\$ 60 BILHÕES EM INVESTIMENTOS EM DATA CENTERS NO BRASIL ATÉ 2030

PAÍS TEM HOJE POUCO MAIS DE 130 DATA CENTERS

A consultoria de negócios especializada no setor de energia, Thymos Energia, estima que os investimentos totais em infraestrutura de data centers no país devam chegar a R\$ 60 bilhões até 2030. O dado faz parte do estudo “Data Centers no Brasil – Perspectivas, Oportunidades e Desafios” desenvolvido pela empresa sobre o potencial de desenvolvimento desse mercado.

Entre as razões apontadas no estudo, está o fato de o Brasil ter um ambiente de negócios dinâmico, com uma matriz elétrica composta predominantemente por fontes renováveis, com destaque para a hidráulica, eólica e solar fotovoltaica. “O fornecimento de energia elétrica confiável, constante e com baixa emissão de carbono é um

fator decisivo na escolha do local para instalação de um data center”, avalia Luiz Vianna, COO da Thymos Energia.

De acordo com a consultoria, outros fatores contribuem para o crescimento do mercado de data centers no país, entre eles a proximidade da rede elétrica, infraestrutura de TI e comunicação, capacidade de expansão, ambiente amigável de negócios, relações com a comunidade, segurança geopolítica e temperatura externa. “A evolução desse segmento no país representa uma oportunidade estratégica para empresas de geração e comercialização de energia”, observa o executivo.

Para aproveitar todo esse potencial, o estudo indica que os agentes precisarão tomar decisões baseadas

em análises antecipadas, considerando cenários de estratégia na gestão de processamento e armazenamento de dados, novas políticas de incentivo, estratégias de atuação dos principais players do segmento e eficiência energética dos componentes utilizados. “O Brasil reúne condições bastante favoráveis para se tornar um polo estratégico de data centers na América Latina. Entretanto, os desafios ainda são significativos”, pondera Vianna.

Entre os principais obstáculos, ele cita a complexidade da conexão dos data centers à rede elétrica, a necessidade de ampliação da malha de transmissão e a ausência de uma regulamentação adequada, que já vem sendo discutida. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME), há pedido de conexão à rede básica de 9 gigawatts (GW) de cargas de data centers nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul, Ceará, Rio Grande do Norte e Bahia.

De forma geral, essas infraestruturas desempenham um papel crucial no mundo digital, possibilitando o processamento, armazenamento e transmissão de dados que sustentam o dia a dia de bilhões de pessoas e impulsionam o crescimento econômico. Atualmente, o Brasil conta com mais de 130 data centers em operação.

A demanda total de eletricidade no mundo, considerando todos os setores da economia, pode crescer cerca de 6.760 TWh até 2030, sendo que 80% dessa expansão virá de nações em desenvolvimento e economias emergentes. O estudo da Thymos Energia indica que cerca de 10% dessa demanda será de data centers. “O Brasil possui um cenário promissor, mas será necessário planejamento estratégico e investimento contínuo para capturar todo o potencial desse mercado”, reforça o executivo.

TECPAR AMPLIARÁ PESQUISAS DE BIOGÁS E BIOMETANO

HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO FOI INCLUÍDO NAS ANÁLISES

Com estruturação iniciada em 2024, o Laboratório para Pesquisas de Biogás e Biometano do Tecpar será ampliado, receberá novos equipamentos e manterá apoio a pesquisadores. Já está em estudo a destinação de um espaço maior dentro do próprio instituto para a implantação da nova etapa de pesquisa, que terá como foco a geração de biogás e seu uso na produção de hidrogênio de baixo carbono.

“As pesquisas serão voltadas ao aproveitamento de resíduos de alimentos de restaurantes e cozinhas industriais, além de resíduos originados de processos de saneamento, para a geração de biogás e seu uso na produção de hidrogênio renovável e outros biocombustíveis”, diz o químico Bill Costa, coordenador do Centro Avançado de Transição Energética e Descarbonização do Tecpar, mestre e doutor em engenharia de materiais.

O hidrogênio de baixo carbono é uma grande aposta dos pesquisadores para a produção de combustíveis mais limpos no futuro. “O hidrogênio renovável é um vetor energético de importância estratégica, e seu papel vai muito além de ser apenas um novo tipo de combustível. Sua importância pode ser vista sob três aspectos: é um vetor para a descarbonização total, constitui ligação entre a eletricidade e outros setores (agrícola, industrial, etc.), e é uma grande oportunidade econômica para o Brasil”, afirma o coordenador.

A nova etapa também deverá contar com parceria da UFPR e a Sanepar. Para fortalecer a infraestrutura do laboratório, está prevista a aquisição de mais um analisador automático de potencial metanogênico, entre outros equipamentos. Além disso, o coordenador destaca que



Tecpar estrutura novo laboratório voltado à pesquisa de biogás e biometano e hidrogênio renovável, coordenado pelo químico Bill Costa.

Foto: Hedeson Alves/Tecpar

o capital humano seguirá como prioridade. “Continuaremos a apoiar a formação de pesquisadores na área de energias renováveis, transição energética e descarbonização”, reforça Costa.

Os jovens pesquisadores são a mestrandia em Química na UFPR, Kathleen Caroline do Amaral Andrión, a mestrandia em Engenharia Química, Débora Cristina Colla, e o mestre Leandro Andrade Pegoraro, que realiza trabalhos experimentais no laboratório, buscando ingressar no Programa de Doutorado em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Soluções tecnológicas e maior portfólio

Em agosto, foi finalizada a primeira fase de implantação do laboratório, que contou com recursos da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (Seti) e o Fundo Paraná. Nesse período, foram adquiridos equipamentos

para análises automáticas do potencial de cada insumo na geração de energia renovável. O objetivo foi validar metodologias a partir de testes em aparelho que realiza a análise do potencial de geração de metano de diferentes biomassas destinadas à produção de biogás pelo processo de digestão anaeróbica.

O Tecpar projeta, futuramente, oferecer novas soluções tecnológicas para a indústria e ampliar seu portfólio de serviços e ensaios laboratoriais. “Como instituto de ciência e tecnologia, o Tecpar busca resolver problemas dos mais variados segmentos da sociedade. “Como instituto de ciência e tecnologia, o Tecpar busca resolver problemas de diversos segmentos da sociedade. Com o novo laboratório, poderemos apoiar indústrias interessadas em gerar sua própria energia, oferecendo soluções laboratoriais e o suporte de nossa equipe especializada”, observa Celso Kloss, diretor de Novos Negócios e Relações Institucionais do Tecpar.

ANEEL ANUNCIA RESULTADOS DO PRIMEIRO CICLO DO PLANO DE INOVAÇÃO ATÉ O FIM DE SETEMBRO

PEQul2 COMEÇA EM JANEIRO DE 2029



Unidade de hidrotreatamento de geração de hidrogênio da Refinaria Abreu e Lima, da Petrobras, em Ipojuca (PE). Hidrogênio de baixa emissão de carbono está entre as sete áreas do plano estratégico da Aneel.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) está na fase final de consolidação dos dados referentes ao primeiro ciclo do Plano Estratégico Quinquenal de Inovação (PEQul), que abrange o período de outubro de 2023 a dezembro de 2024 e integra o Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI). Segundo a agência, os números, que englobam informações gerenciais, financeiras e de resultados de empresas reguladas, serão apresentados em

setembro deste ano. Esses dados servirão de base para a apuração de indicadores de uso de recursos, resultados e impactos previstos no Módulo 4 do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PROPDI). A implementação de todas as etapas do plano vai até 31 de dezembro de 2028, e não está prevista prorrogação, pois em 1º de janeiro de 2029 terá início o PEQul2.

O Plano Estratégico Quinquenal de Inovação define as diretrizes e metas

para pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor elétrico brasileiro e serve de orientação para as empresas reguladas pela agência investirem em projetos inovadores e que apresentem avanço tecnológico em sete áreas estratégicas: modernização e modicidade tarifária; eletrificação da economia e eficiência energética; inovações para transmissão e distribuição e novas tecnologias de suporte (inteligência artificial, realidade virtual e aumentada e blockchain); digitalização, padrões, interoperabilidade e cibersegurança; eletrificação de baixo carbono; armazenamento de energia; e hidrogênio.

A criação do PEQul envolveu representantes da academia, do setor produtivo, de órgãos do governo e de consumidores, em articulação com Instituições de Ciência, Tecnologia e Inovação (ICTs), com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). O acompanhamento da execução é feito pelas Redes de Inovação no Setor Elétrico (RISEs).

“A implementação mantém articulação permanente com esses entes, estruturada por meio das RISEs e integrada a outros planos e políticas setoriais, de forma a promover sinergia e evitar duplicidades. Embora ainda existam desafios, os mecanismos de governança estabelecidos no PROPDI e no PEQul têm permitido avanços concretos na coordenação

e na otimização dos esforços, conforme os ciclos de planejamento e monitoramento previstos”, garante o presidente da Aneel, Sandoval Feitosa Neto, em entrevista exclusiva para a *Revista Smart Energy*.



Foto: Joãoilson Alves

“Embora ainda existam desafios, os mecanismos de governança estabelecidos no PROPDi e no PEQuI têm permitido avanços concretos na coordenação e na otimização dos esforços, conforme os ciclos de planejamento e monitoramento previstos.”

Sandoval Feitosa Neto -
presidente da Aneel

Sem prorrogação e avaliação dos resultados

Previsto para o período 2024 a 2028, Feitosa alerta que o ciclo do plano não pode ser prorrogado. “A vigência é determinada, sendo esse o período em que os indicadores de resultados e de impacto serão apurados. Assim, as empresas reguladas devem estruturar seus portfólios de PDI e planejar suas entregas para garantir o registro e a validação dos resultados até 31 de dezembro de 2028, com envio do último relatório anual até 31 de março de 2029, conforme previsto no Módulo 4 do PROPDi. Os resultados obtidos após essa data não serão considerados para



Foto: José Cruz Agência Brasil

A criação do PEQuI contou com a participação de consumidores, que foram ouvidos em seminários.

fins de avaliação e reconhecimento de investimentos efetuados na vigência do PEQuI 2024–2028.”

Segundo ele, até o momento não houve solicitação formal para prorrogação, e tampouco está previsto adiantamento na regulação vigente: “O encerramento desse ciclo marcará a entrada em vigor do PEQuI2, a partir de 1º de janeiro de 2029.”

Ao fim do ciclo, a Aneel avaliará o cumprimento das metas mínimas estabelecidas no plano. “Caso não tenham sido atingidas, poderá ser determinada a reversão parcial dos valores investidos, os quais deverão ser obrigatoriamente reaplicados em novas ações de PDI, conforme previsto no PROPDi”, explica Feitosa.

Como forma de incentivar as participantes, foram instituídos prêmios de reconhecimento para empresas com os melhores desempenhos e ações corretivas para aquelas com resultados insuficientes.

Para mensurar o sucesso do plano estratégico, o presidente esclarece que o próprio PEQuI traz um conjunto detalhado de indicadores, que afere os efeitos dos portfólios de PDI das empresas reguladas, que abrange desde insumos até impactos de longo prazo. “Esses indicadores incluem número de patentes registradas, novos produtos e serviços lançados, impacto socioambiental, geração de startups e retorno financeiro dos investimentos, entre outros. Embora a redução tarifária não seja um indicador direto, a maior eficiência e inovação tendem a contribuir para esse resultado no médio e no longo prazo.”

A Aneel reforça ainda que uma das diretrizes do plano é a redução de desigualdades regionais e sociais. Pelo menos 30% dos investimentos em PDI devem ser direcionados a instituições de pesquisa das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Também são estimulados projetos de inclusão energética e eficiência em comunidades de baixa renda.

O PEQuI SERVE DE GUIA PARA AS EMPRESAS REGULADAS INVESTIREM EM SETE ÁREAS ESTRATÉGICAS:

- modernização e modicidade tarifária;
- eletrificação da economia e eficiência energética;
- inovações para transmissão e distribuição e novas tecnologias de suporte (inteligência artificial, realidade virtual e aumentada e blockchain);
- digitalização, padrões, interoperabilidade e cibersegurança;
- eletricidade de baixo carbono;
- armazenamento de energia;
- hidrogênio.

BRDE SE TORNA MAIS VERDE E AMPLIA OFERTA DE CRÉDITO

MUDANÇA ESTRATÉGICA PROPICIA CAPTAÇÃO DE INVESTIMENTOS DE INSTITUIÇÕES MULTILATERAIS

Nos últimos anos, o Banco Regional do Desenvolvimento do Extremo Sul (BRDE) passou por reformulações estratégicas para receber investimentos de instituições estrangeiras e ampliar financiamentos para os estados de atuação – Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul.

Para atender às novas exigências do mercado internacional, o banco aderiu a práticas sustentáveis e de ESG (sigla em inglês para Ambiental, Social e Governança) e criou o conceito Banco Verde. “Trata-se de um grande guarda-chuva que tor-

na visíveis as ações da instituição na promoção do impacto social, ambiental e climático positivo na nossa região de atuação, incluindo o desempenho interno da organização, auxiliando na captação de recursos internacionais e na multiplicação de ações positivas”, explica a economista Thais Paola Grandi, analista de projeto do BRDE e gerente adjunta de Planejamento de Novos Negócios do Paraná e Mato Grosso do Sul.

O BRDE passou a integrar o Pacto Global da ONU, busca contribuir com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e instituiu a Políti-

ca de Responsabilidade Social, Ambiental e Climática (PRSAC). Foi também o primeiro banco do país a aderir à Coalizão LIFE de Negócios e Biodiversidade, reconhecendo a biodiversidade como eixo estratégico da agenda ESG.

Graças ao aporte para novos financiamentos surgiu o Fundo Verde de Equidade, que destina 1,5% do lucro anual a projetos socioambientais e climáticos. Os recursos, não reembolsáveis, são distribuídos por meio de editais públicos.

“Historicamente, nossa carteira de crédito era 98% de fonte BNDES. Des-

de 2018, iniciamos captações com instituições internacionais e, a partir daí, começamos a financiar projetos de sustentabilidade com precificação e prazos diferenciados”, destaca Thais.

Os primeiros recursos financeiros obtidos no exterior vieram do Banco Europeu de Investimentos, Agência Francesa de Desenvolvimento e CAF/ Banco Andino de Desenvolvimento. “Hoje, são seis fontes de recursos internacionais, que incluem captações com o BID Banco Interamericano de desenvolvimento, o Banco Mundial e NDB - Banco dos Brics”, conta.

Linhas de crédito e setores apoiados

No campo energético, o banco opera o programa BRDE Mais Energia Sustentável, financiando fontes renováveis como solar, hídrica, bio-

massa e pequenas centrais hidrelétricas.

No agronegócio, o BRDE oferece crédito com condições diferenciadas pelo Plano Safra e pelo Renova Paraná, que subsidia projetos de energia limpa no campo — com até 5% de desconto em juros para investimentos em fotovoltaica e biomassa, em valores de até R\$ 500 mil.

As condições de financiamento variam conforme a fonte dos recursos. Pelo Fundo Clima do BNDES, as taxas começam em 10% ao ano, com prazos de até 16 anos, incluindo carência de cinco anos. Já pela Agência Francesa de Desenvolvimento, os encargos giram em torno de 5,6% ao ano mais Euribor (atualmente 2% ao ano) e variação cambial do euro.

O BRDE pode financiar até 100% dos projetos para autoconsumo e até

80% das usinas voltadas à comercialização de energia.

O banco também atua na estruturação de parcerias público-privadas (PPPs). Na região Sul, tem apoiado projetos de iluminação pública, integrando soluções de energia solar, controle de tráfego, segurança digital e zeladoria de prédios públicos.

Para garantir a efetividade dos financiamentos, o BRDE acompanha a implementação dos projetos. As liberações são feitas por etapas, e os contratos podem ser auditados pelos organismos financiadores internacionais enquanto estiverem ativos.

Os interessados podem conhecer mais sobre linhas de crédito e financiamentos, acessando: www.brde.com.br

Outra forma de obter mais informações, é procurar uma das unidades representadas do BRDE.

No Paraná, os endereços e contatos são:



CURITIBA

Av. João Gualberto, 570
(41) 3219-8000

CASCADEL

Rua Pernambuco, 1.800,
ACIC
(45) 3321-1444

FOZ DO IGUAÇU

Rua Padre Montoya, 490,
Centro - ACIFI
(45) 3521-3300

FRANCISCO BELTRÃO

Rua Florianópolis, nº 478 - CACISPAR
(46) 3523-6910

JACAREZINHO

Rua Cel. Cecílio Rocha, 395, Centro
Secretaria de Comércio, Indústria,
Turismo e Serviços
(43) 3911-3056

LONDRINA

Rua Minas Gerais, 297 - 1º andar -
ACIL - Edifício Palácio do Comércio
(43) 3374-3000

PALOTINA

Rua 1ª de Janeiro, 1163
Centro - ACIPA
(44) 3649-5855

TOLEDO

Largo São Vicente de Paulo, 1333
2º andar - ACIT
(45) 3055-4622

UMUARAMA

Praça Henio Romagnoli - Zona I
Casa do Empreendedor
(44) 3621-4141

NAPI DE HIDROGÊNIO SE DESTACA NA PESQUISA DE BAIXO CARBONO

UFPR, COPEL E GAS FUTURO SE UNEM EM ROTA TECNOLÓGICA



O Novo Arranjo de Pesquisa e Inovação em Hidrogênio Renovável (Napi Hidrogênio) reforça o compromisso do Paraná em se tornar um dos polos de referência nacional em soluções para a economia do hidrogênio. A iniciativa, organizada em uma parceria entre o governo do estado, por meio da Secretária de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (Seti), e da Fundação Araucária, reúne universidades, centros de pesquisa, empresas e governo para o desenvolvimento de tecnologias, capacitação de profissionais e criação de alternativas sustentáveis para a transição energética.

Atualmente, cerca de 100 milhões de toneladas de hidrogênio são consumidas por ano no mundo, sendo quase toda essa quantidade produzida a partir de fontes fósseis, principalmente o gás natural.

Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (Irena), até 2050 o hidrogênio representará cerca de 12% do consumo final de energia. Destes, 8% virão de hidrogênio de baixo carbono, produzido com eletricidade renovável e exigindo cerca de 5.000 GW em eletrólise. O restante é atribuído ao hidrogênio produzido a partir de gás natural com captura de carbono.

Focado no desenvolvimento de tecnologias que utilizam biomassa como fonte de hidrogênio, o Napi Hidrogênio busca essencialmente reduzir as emissões de carbono, substituindo combustível fóssil por alternativas renováveis e promovendo a descarbonização da economia.

“É importante esclarecer que o hidrogênio é um tema transversal, que permeia diversas áreas, impactando toda a sociedade. Não se li-

mita a um setor ou outro, mas tem interface com praticamente todos os setores da nossa economia de alguma forma. Isso abrange o sistema elétrico brasileiro, o setor de gás, indústria alimentar, agronegócios, metal mecânica, indústria química, indústria pesada, enfim, temos muitos setores envolvidos”, esclarece o professor Helton José Alves, articulador do Napi Hidrogênio e diretor técnico-científico da Associação Brasileira de Hidrogênio (ABH2).

Nova rota tecnológica

Diversas ações vêm sendo desenvolvidas para ampliar o uso do hidrogênio de baixo carbono. Uma delas é a criação de uma rota tecnológica pioneira, que será inaugurada em breve com a implantação de uma planta piloto na Universidade Federal do Paraná (UFPR) em con-

junto com a Copel e a empresa Gas do Futuro.

O projeto, fruto de um P&D da Copel-GD/Aneel, conta com a parceria de outras duas instituições, além da UFPR: APRENO-RO e SENAI-PE). A iniciativa prevê o aproveitamento dos resíduos de alimentos do Restaurante Universitário do Centro Politécnico da UFPR para a produção de biogás. A partir dele, será possível extrair o hidrogênio por um processo desenvolvido pelo Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (Labmater) da universidade, totalmente isento de água. Esse hidrogênio será purificado e destinado para três aplicações principais: geração de energia elétrica em células a combustível, abastecimento de bicicletas movidas a hidrogênio no campus do Centro Politécnico, em Curitiba, e produção de amônia em pequena escala e em caráter de demonstração. A amônia é o principal componente da ureia, fertilizante nitrogenado amplamente utilizado, que pode ser obtida a partir da combinação do hidrogênio com o nitrogênio presente no ar.

Apesar dos avanços, o pesquisador relata que o segmento de pro-



“A regulamentação é crucial para atrair investimentos, uma vez que é ela que define as regras que as empresas brasileiras e estrangeiras, interessadas em se instalar no país ou no estado, precisam seguir.”

Helton José Alves, articulador do Napi Hidrogênio e diretor técnico-científico da Associação Brasileira de Hidrogênio (ABH2)

dução de hidrogênio de baixo carbono ainda depende de regulamentação para ganhar competitividade. Tanto o Brasil quanto o Paraná já possuem leis específicas sobre o tema, mas elas precisam ser regulamentadas. “A regulamentação é crucial para atrair investimentos, uma vez que é ela que define as regras que as em-

presas brasileiras e estrangeiras, interessadas em se instalar no país ou no estado, precisam seguir. Isso pode envolver incentivos fiscais e até outros benefícios. São questões que só podem ser definidas com clareza por meio dessa regulamentação, e esse é um ponto essencial para o crescimento do mercado”, enfatiza.

Fomento
GIRO
FÁCIL



O CAPITAL DE GIRO QUE DÁ FÔLEGUE PARA A SUA EMPRESA CRESCER MAIS RÁPIDO.

**CRÉDITO DE ATÉ
R\$ 500 MIL* COM AS
MENORES TAXAS E AS
MELHORES CONDIÇÕES.**

Uma linha de capital de giro para MICRO E PEQUENAS EMPRESAS instaladas no Paraná, que tenham pelo menos 12 meses de faturamento fiscal declarado de até R\$ 16 milhões ao ano.

(*) Mediante análise de crédito.



**CONTRATE JÁ
O SEU GIRO FÁCIL**

Procure o Correspondente Fomento mais próximo acessando
<https://www.fomento.pr.gov.br/#mapa-form>
Ou cadastre sua proposta on-line acessando o QR code:



DÚVIDAS? Solicite um contato de nossos analistas:

WHATSAPP	(41) 9930-9215
CENTRAL DE ATENDIMENTO	(41) 3200-5900



CONFERÊNCIA SMART ENERGY DESTACA AS ENERGIAS SUSTENTÁVEIS, REFORÇA O PROTAGONISMO DO ESTADO E SE CONSOLIDA COMO EVENTO

A Conferência Internacional de Energias Inteligentes – Smart Energy 2025 chega a sua nova edição neste ano debatendo sobre os caminhos para um setor integrado e resiliente e trazendo um novo ativo para a mesa: o hidrogênio. “A novidade desta edição é a ênfase na utilização do hidrogênio e na sua importância para a geração de energia, associada às questões de sustentabilidade. Trata-se de um foco alinhado ao contexto de ESG [sigla em inglês para Environmental, Social and Governance, que faz referência às práticas no âmbito Ambiental, Social e Gover-

nança], cada vez mais valorizado por empresas e pela sociedade”, diz o idealizador da conferência, o engenheiro químico Celso Romero Kloss, diretor de Novos Negócios e Relações Institucionais do Tecpar.

A edição destacará também o conceito de transição energética, com ênfase na geração a partir de fontes renováveis e sustentáveis. “Nesse contexto, o hidrogênio ocupa um papel bem importante, assim como a discussão sobre eficiência energética, pois, ao melhorar o uso da energia, consome-se menos e, consequentemente, a operação se torna mais sustentável”, explica.

A primeira edição do evento ocorreu em 2012, quando Kloss era superintendente da Rede Paraná Metrologia, hoje Rede Paraná Tecnologia e Metrologia. A conferência nasceu a partir de um projeto do Tecpar chamado Programa Smart Energy, que inicialmente tinha o propósito de discutir smart grid e questões relacionadas à energia, mas que, ao longo do tempo, ampliou o escopo e passou a abranger todas as formas de geração e uso de energia.

“Desde o seu nascimento, o objetivo do evento sempre foi trazer o estado da arte em relação à ge-



Celso Romero Kloss, diretor de Novos Negócios e Relações Institucionais do Tecpar



Iramar Severiano, diretora-superintendente da Rede Paraná Tecnologia e Metrologia



Rui Londero Benetti, coordenador do Conselho Temático de Energia da Fiep

ração de energia, considerando um conceito mais amplo de transição energética. A proposta é tornar Curitiba um fórum de discussão sobre a aplicabilidade, evolução e utilização de todas as formas de geração de energia sem o uso de combustíveis fósseis, sempre adotando uma postura de ambientalmente amigável”, acrescenta Kloss.

Uma preocupação permanente do encontro é a integração entre governo, academia e a iniciativa privada. “Sempre quisemos reunir representantes de todos os segmentos, pois sem a participação do empresário para viabilizar, da universidade e centros de pesquisa para trazer a inovação, e do governo em diferentes instâncias para criar políticas públicas, não é possível materializar tudo que é pensado. Recursos, conhecimentos e expertises são fundamentais para que a sociedade possa se desenvolver”, afirma Iramar Severiano, diretora-superintendente da Rede Paraná Tecnologia e Metrologia.

Desde 2024, a conferência agregou fóruns específicos, destinados a dar visibilidade às empresas e seus projetos. Neste ano, o destaque é o Fórum Eficiência Energética. “A eficiência energética é um dos pilares da transição para um

futuro mais sustentável e competitivo. Promover o Fórum dentro do Smart Energy amplia o alcance das discussões e cria um ambiente qualificado para empresas encontrarem parceiros, clientes e soluções que geram impacto real nos negócios”, explica Gerson Ferraz, diretor da Jornada da Eficiência e coordenador do Fórum.

Além do Tecpar, a Conferência Smart Energy mantém uma parceria de longa data com a Fiep. Discutir energias renováveis está no escopo da Federação, especialmente no seu Conselho Temático de Energia. Para esta edição, a parceria se renova e se reforça. “O evento Smart Energy de 2025 traz uma atualização de todo o espectro de temas relacionados à energia, e discutir a variedade de possibilidades de aplicação e uso no dia a dia da sociedade são os componentes que norteiam o conselho temático de energia da Fiep. Temas como energias renováveis, eficiência energética, biomassa/biometano, transição energética, hidrogênio verde, crédito de carbono são assuntos de extrema relevância e, por isso nos somamos à iniciativa para a divulgação e aplicação. Como sempre, acreditamos no sucesso deste evento” diz Rui Londero

Benetti, coordenador do Conselho Temático de Energia da Fiep.

Todos os anos, o encontro tem conquistado mais apoios e atraído maior interesse para sua realização. “O debate em torno do tema de Energias renováveis é de fundamental importância não somente pelo aspecto energético em si, mas também pela necessidade da descarbonização da economia. E, neste aspecto, o evento trará insights importantes quanto à produção de energia de fontes como a biomassa e biogás, além das tradicionais eólica e solar”, destaca o engenheiro eletricista Sandro Vieira, titular da Superintendência-Geral de Gestão Energética do Paraná (Supen).

Ao longo das edições, o tema vem ganhando espaço e relevância social, o que reforça o impacto do evento e aumenta a atratividade para marcas parceiras. “Depois de lotarmos a edição passada, neste ano abriremos dois auditórios simultâneos na Fiep”, anuncia Ricardo Kenji Wojitani, diretor da Eletron Energia S.A, e reforça a expectativa: “Espero que as indústrias saiam sabendo como tirar seus projetos da gaveta, com números, parceiros e caminhos de financiamento claros.”

LINHA DO TEMPO SmartENERGY

Foi criado o Workshop Smart Energy – embrião da Conferência Internacional de Energias Inteligentes.

Foi o primeiro evento da região Sul a promover discussões sobre energias inteligentes.

2012

Teve como foco os sistemas inteligentes de energia.

Enfatizou o potencial do país para o desenvolvimento e implantação de smart grids.

Contou com uma visita técnica ao Tecpar, onde foi apresentada a plataforma experimental do Projeto Smart Energy Paraná.

2014

Foi a única edição realizada em Foz do Iguaçu.
Contou com feira tecnológica.
Promoveu debates sobre energia hidrelétrica.

2015

Destacou a geração distribuída, a eficiência energética e os avanços da energia solar.

Introduziu a entrega do Prêmio Personalidade, Energia e Sustentabilidade.



2016



Trouxe a exposição de artigos científicos no hall da Conferência.

Foi lançada a Revista Smart Energy.

2017

Deu ênfase às construções sustentáveis e com energia inteligente.

Entregou certificações LEED e Zero Energy a empreendimentos paranaenses.

2018

Ampliou a participação com convidados internacionais.

Destacou a inovação e a eficiência energética.

Promoveu maior integração entre setor produtivo, sociedade e políticas públicas para acelerar a transição energética.

2019



Teve como palestra magna a participação do então juiz federal Sérgio Moro.

2024



Debatou mercado livre de energia, transição energética e tecnologias como IA e IoT.

Inseriu o Fórum de Eficiência Energética.

Foi certificado pela I-REC, atestando o uso de energia 100% renovável.

2025

Inseriu o hidrogênio entre os debates sobre energias renováveis.

Relançou a Revista Smart Energy, que passou a incluir a publicação de artigos científicos.

REVOLUÇÃO NA SMART GRID DO REINO UNIDO

**EDF POSSUI MAIS DE 30
PARQUES EÓLICOS NA EUROPA**

Países como China, Estados Unidos e Alemanha investem cada vez mais nas chamadas smart grids – redes elétricas inteligentes que propiciam a modernização da distribuição de energia. Elas integram tecnologias digitais e de comunicação, otimizando a geração e o consumo. Ou seja, oferecem à concessionária uma gestão mais eficiente e, ao usuário, um serviço sem interrupções. Um exemplo bem-sucedido é o da EDF do Reino Unido, dona do maior gerador de eletricidade com zero carbono da Grã-Bretanha. Com 25 anos de existência, a companhia possui um portfólio operacional de 36 parques eólicos, investe em energia solar e em instalações nucleares, garantindo o fornecimento de eletricidade de baixo carbono para atender 7% da demanda do Reino Unido. A EDF anunciou um investimento de 50 bilhões de euros até 2035 para gerar 15 GW de eletricidade com emissão zero de carbono, o que, considerando os números atuais, significaria atender 25% das necessidades energéticas da região.

“O setor elétrico em todo o mundo está passando por uma transformação profunda para acomodar as fontes renováveis. No Reino Unido, a EDF é uma participante-chave na expansão da smart grid”, observa Felipe Freitas, físico brasileiro, que atua no setor de Inovação Digital da EDF no Reino Unido físico.

Ele explica que a empresa instala medidores inteligentes para os usuários, que transmitem dados de consumo em tempo real. “Esse processo permite um faturamento preciso e fornece insights para um melhor gerenciamento de energia”. Instalados na Europa, os parques energéticos da EDF possuem baterias em escala industrial, residencial e comercial e podem atender até mesmo regiões remotas. Esse sistema promove a integração de diferentes matrizes energéticas: solar, eólica, hidrelétrica e até hidrogênio de baixo carbono, utilizando baterias para armazenamento de energia.

O cientista avalia que, ao facilitar a integração de fontes renováveis por meio do monitoramento em tempo re-

al da geração solar e eólica, da gestão inteligente da intermitência com sistemas de armazenamento e do balanceamento automático entre oferta e demanda, a smart grid tem o poder de revolucionar o mercado de energia elétrica. “Essas redes inteligentes permitem o despacho otimizado de múltiplas fontes simultâneas e a integração eficiente de microgeradores residenciais. No gerenciamento da demanda, as smart grids implementam tarifação dinâmica e incentivos para consumo nos períodos de alta geração renovável, promovendo o deslocamento inteligente de cargas por meio de eletrodomésticos conectados e sistemas automatizados. Isso inclui o carregamento otimizado de veículos elétricos e climatização eficiente baseada na disponibilidade energética”, esclarece.

Ele ressalta que, entre outros benefícios, estão uma maior estabilidade da rede, mesmo com fontes variáveis, redução significativa de perdas na transmissão, diminuição dos custos operacionais e menor dependência de combustíveis fósseis.

>>>>>>>>>

Rede Paraná Tecnologia e Metrologia:

soluções personalizadas em

medições para sua empresa

>>>>>>>>>

>>>>>>

A Rede Paraná Tecnologia e Metrologia é reconhecida como referência nacional em tecnologia industrial e metrologia. Atuamos em parceria com empresas e profissionais de diversos setores, oferecendo soluções científicas aplicadas às medições, que garantem precisão, eficiência e inovação nos processos produtivos.

Desenvolvemos soluções personalizadas para o setor empresarial, promovendo capacitação técnica, adoção de metodologias modernas e atuação em conformidade com os mais altos padrões nacionais.

Articulamos a integração entre empresas, associados e instituições, conectando oferta e demanda de serviços tecnológicos nas áreas de metrologia, qualidade e tecnologia. Assim, contribuímos para a qualificação e agregamos valor ao autêntico produto paranaense, assegurando seu enquadramento nos padrões nacionais e internacionais.

Oferecemos:

- ⚙️ Programas de Ensaios de Proficiência
- ⚙️ Auditoria Técnica
- ⚙️ Treinamentos
- ⚙️ Assessorias
- ⚙️ Consultorias
- ⚙️ Eventos



Rede Paraná Tecnologia e Metrologia

- ☎️ (41)3362.6622
- ✉️ paranametrologia@paranametrologia.org.br
- 📍 Av. Comendador Franco, 1.341
Campus da Indústria/FIEP
- 🌐 www.paranametrologia.org.br

DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

CONSELHO ACADÊMICO

Bill Jorge Costa - TECPAR

Luiz Pereira Ramos - UFPR

Arion Zandoná Filho - UFPR

Eduardo Teixeira da Silva - UFPR

Durval Nascimento Neto - UFPR

Eduardo Teixeira da Silva - UFPR

Felipe Freitas - Unicap

As normas para submissão de artigos poderão ser encontradas no seguinte endereço: smartenergy.org.br

ESTRATÉGIA DE DESCARBONIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DO SETOR ENERGÉTICO: DO DESAFIO À OPORTUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO

José Luis G. de Almeida
SENAI-CIMATEC

Walter Pinheiro
SENAI-CIMATEC

Luiz Pereira Ramos
Universidade Federal do Paraná

1. Resumo

A crise climática constitui um dos maiores desafios do século XXI, exigindo a transição - ou melhor, uma evolução - para uma economia de baixo carbono em prazo compatível com as metas globais estabelecidas pelo Acordo de Paris. Este artigo propõe uma abordagem estratégica para a descarbonização sustentável do setor energético, com foco na realidade brasileira e no potencial de inserção competitiva do país no cenário global. Partindo de dados recentes sobre as emissões globais e nacionais, discutem-se as lacunas entre compromissos climáticos e ações efetivas, bem como as oportunidades de inovação tecnológica, novos modelos de negócio e ganhos de competitividade associados à transição energética. Conclui-se que, ao transformar desafios em oportunidades, este processo deixa de ser apenas um imperativo ambiental para ser um vetor estruturante do desenvolvimento social, econômico, tecnológico e ambiental, em sintonia com a condição singular do Brasil de possuir uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo.

2. Introdução

O aumento da concentração atmosférica de gases de efeito estufa (GEE) é amplamente reconhecido e decorre, majoritariamente, da queima de combustíveis fósseis, das mudanças no uso da terra e de processos industriais (3). Em 2023, as emissões globais atingiram 57,1 GtCO₂e, um novo recorde histórico, representando aumento de 1,3% em relação a 2022. O crescimento foi puxado principalmente por China (+5,2%) e Índia (+6,1%), enquanto Estados Unidos (-1,4%) e União Europeia (-7,5%) apresentaram reduções. Os países do G20 responderam por cerca de 77% das emissões globais (10). Esses números reforçam a magnitude do desafio e contextualizam o papel do Brasil, embora com singularidade em sua matriz energética altamente renovável.

O Brasil figura entre os dez maiores emissores globais, com destaque para o desmatamento, que em 2023 liberou 1,04 GtCO₂e brutas — tornando o país o quinto maior emissor mundial. Considerado isoladamente, o desmatamento brasileiro seria o oitavo maior emissor do planeta, acima do Irã e abaixo do Japão (1).

O *Emissions Gap Report 2024* alerta para o distanciamento crescente entre os compromissos climáticos anunciados e a realidade das trajetórias de emissões, exigindo cortes imediatos e consistentes (2). Ao mesmo tempo, o país detém uma vantagem estratégica rara: a matriz elétrica brasileira atingiu 88,2% de participação renovável em 2024, puxada por hidrelétricas, eólica e solar, enquanto a matriz energética global alcançou 50% de renovabilidade (9). Segundo o PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia 2034, essa trajetória se manterá ao longo dos próximos anos, com 88% de renovabilidade projetada na matriz elétrica para 2034 (8). Tal posição confere ao Brasil um diferencial competitivo na produção de Power-to-X (como hidrogênio de baixa emissão de carbono e e-combustíveis), setores em franca expansão no comércio internacional.

Diante desse panorama, a estratégia de descarbonização sustentável do setor energético precisa ir além da dimensão ambiental, integrando também os seus desdobramentos sociais, econômicos e tecnológicos. Esta descarbonização não é

apenas uma resposta ao risco climático: ela pode impulsionar a criação de novos mercados de energia limpa, gerar empregos qualificados, estimular a modernização industrial e fortalecer a inserção competitiva do país no contexto internacional.

3. Metodologia

A construção da análise seguiu três eixos complementares:

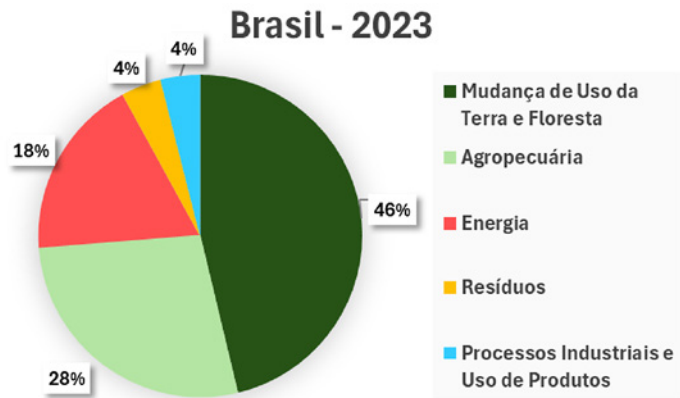
- Revisão documental – Foram examinados relatórios internacionais de referência (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*, UNEP – *United Nations Environment Programme*, IEA – *International Energy Agency*), relatórios nacionais (SEEG/OC – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima, Imflora-Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola, ICLEI – *Local Governments for Sustainability*) e literatura científica sobre tecnologias de baixo carbono (eletrificação industrial, captura e uso de CO₂, hidrogênio verde, biocombustíveis avançados, entre outros).
- Análise comparativa – Avaliou-se a posição relativa do Brasil frente às principais economias globais em termos de emissões, intensidade de carbono e compromissos assumidos.
- Integração de oportunidades – Foram evidenciado que a transição energética, além de mitigar impactos ambientais, pode gerar externalidades positivas nas dimensões social (emprego e inclusão), econômica (competitividade e novos modelos de negócio) e tecnológica (inovação, digitalização e redesenho industrial), de modo a transformar o desafio da mitigação em vetor de desenvolvimento sustentável.

4. Resultados e Discussão

4.1 O desafio das emissões

As emissões globais atingiram em 2023 cerca de 53,0 GtCO₂e (sem LULUCF - Land Use, Land Use Change, and Forestry), confirmando a tendência de crescimento que levou as emissões totais a 57,1 GtCO₂e, quando incluídas todas as fontes (10). Esse crescimento ocorre em meio à rápida expansão de economias emergentes, notadamente China e Índia, contrastando com a retração ou estabilização das emissões nas economias desenvolvidas. Esse cenário global de alta pressiona todos os países a agir de forma mais rápida e consistente.

No Brasil, as emissões brutas em 2023 atingiram 2,3 GtCO₂e, com destaque para as mudanças no uso da terra (46%), agropecuária (28%) e energia (18%). O setor de agropecuária registrou seu quarto recorde consecutivo, com aumento de 2,2%, devido sobretudo à expansão do rebanho bovino. Apenas a fermentação entérica respondeu por 405 MtCO₂e — mais do que as emissões totais da Itália (1). Apesar da redução no desmatamento da Amazônia em 2023, outros biomas, como o Cerrado, a Caatinga, a Mata Atlântica e o Pantanal, registraram aumentos expressivos, sendo o último o que apresentou o incremento mais acentuado.



Perfil das emissões brasileiras em 2023 (1)

No setor de energia, houve incremento de 1,1% nas emissões, puxado pelo crescimento do consumo de diesel, gasolina e querosene de aviação, elevando os transportes a um recorde histórico de 224 MtCO₂e. Esse aumento mais do que compensou a queda de 8% nas emissões do parque termelétrico fóssil, favorecida pela boa hidrologia de 2023.

No setor de resíduos, as emissões cresceram para 92 MtCO₂e, refletindo aumento populacional e maior acesso ao saneamento básico. Já as queimadas não associadas ao desmatamento responderam por 95 MtCO₂ e, ainda que em queda de 7% em relação a 2022 (1).

Esses números reforçam o diagnóstico de que a descarbonização da economia brasileira depende de atacar simultaneamente o controle do desmatamento, a intensificação de práticas agropecuárias sustentáveis e a transição para uma mobilidade de baixa emissão.

4.2 Oportunidades tecnológicas

Nos setores industriais de difícil abatimento – cimento, aço, vidro e químicos – há um conjunto de rotas em desenvolvimento: captura e armazenamento de carbono (CCS), eletrificação de processos de alta temperatura, fornos oxcombustíveis (oxy-combustion) e uso de biocombustíveis (5). O Brasil combina alto potencial tecnológico com vantagem estrutural em energia limpa. A matriz elétrica renovável abre espaço para produção competitiva de hidrogênio verde e o PDE 2034 projeta avanços na integração de biocombustíveis como o biometano e os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) (8). O BEN 2025 mostra que em 2024 o país já alcançou 23,7% de participação das energias eólica e solar na matriz elétrica, consolidando uma plataforma robusta para soluções Power-to-X. Mais do que atuar como mero exportador de moléculas como vetores energéticos, o Brasil deve aproveitar essa base renovável para produzir bens e insumos de elevado valor agregado, como combustíveis sintéticos, hidrogênio, amônia, fertilizantes e produtos químicos avançados de baixa emissão de carbono. Essa estratégia pode impulsionar a competitividade industrial, reduzir vulnerabilidades externas e, sobretudo, elevar a qualidade de vida da sociedade brasileira. O Nordeste brasileiro, detentor de alguns dos melhores recursos solares e eólicos do mundo, destaca-se como epicentro potencial para o desenvolvimento de soluções Power-to-X como o hidrogênio de baixa emissão de carbono, que representam uma grande oportunidade de transformação econômica e social, capazes de gerar emprego, renda e inclusão em territórios historicamente marcados por desigualdades. Por outro lado, outras regiões do país se caracterizam por oferecer condições apropriadas para a implantação de projetos de produção de ativos de grande potencial energético (biogás, biometano, hidrogênio, bio-óleo e gás de síntese) a partir da biomassa.

4.3 Dimensão regulatória e econômica

Além da pressão externa — como o CBAM – Carbon Border Adjustment Mechanism europeu e as possíveis exigências de *Product Carbon Requirements* (PCRs) — o Observatório do Clima propôs, em 2024, uma NDC (*Nationally Determined Contribution*, ou Contribuição Nacionalmente Determinada em português) alternativa, com redução de 92% das emissões líquidas até 2035 (6). Para atingir essa meta ambiciosa, o Brasil precisaria reduzir em 23% o desmatamento da Amazônia nos próximos dois anos e em 55% nos demais biomas até 2025.

A adoção institucional desse nível de ambição tecnológica e compromisso com a agenda climática, como política de Estado, criaria um ambiente favorável para a atração de investimentos capazes de consolidar o Brasil como destino estratégico e ator-chave no desenvolvimento da economia de baixo carbono.

4.4 Transformando desafios em oportunidades

A transição para uma economia neutra em carbono não deve ser vista apenas como obrigação ambiental, mas como oportunidade de reposicionar o Brasil no cenário global. Seus efeitos se estendem muito além da indústria. No campo social, a transição oferece oportunidades concretas para a formação de mão de obra qualificada em áreas como energias renováveis, gestão de carbono e tecnologias digitais, fortalecendo as cadeias de valor regionais ligadas à bioeconomia e à produção descentralizada (territorial) de energia.

Na dimensão econômica, a descarbonização favorece a diversificação da base produtiva e exportadora, reduzindo a dependência dos combustíveis fósseis e criando oportunidades em segmentos estratégicos como a produção de hidrogênio, metanol, amônia, diesel renovável, SAF e rotas de captura e uso de carbono.

Sob o ponto de vista tecnológico, o Brasil tem uma singularidade rara: a elevada participação de renováveis em suas matrizes elétrica e energética. Essa condição oferece vantagem competitiva na produção de moléculas limpas — hidrogênio verde, e-metanol, amônia e SAF — cuja demanda cresce de forma acelerada nos mercados europeu e asiático. O PDE 2034, ao projetar cerca de R\$ 3,2 trilhões de investimentos no setor energético na próxima década, reforça a dimensão dessa oportunidade, sinalizando a expansão da infraestrutura necessária para consolidar o país como líder nesse processo de transformação (9).

Esse conjunto de fatores demonstra que a descarbonização sustentável deve ser encarada como um projeto de transformação abrangente — social, ambiental, econômica e tecnológica — capaz de elevar a competitividade nacional e posicionar o Brasil como protagonista da evolução energética global.

5. Conclusão

A descarbonização sustentável não deve ser vista como custo, mas como estratégia de competitividade e desenvolvimento. O Brasil reúne três ativos singulares: biodiversidade, matriz elétrica majoritariamente renovável e liderança agrícola. Ao alinhar redução de emissões com inovação tecnológica e políticas industriais verdes, o país pode assumir protagonismo global na evolução energética.

O desafio do desmatamento — responsável por mais de 1 GtCO₂e em 2023 — precisa ser enfrentado com prioridade absoluta. Em paralelo, a consolidação da bioeconomia, dos biocombustíveis avançados e da integração do setor elétrico com rotas *Power-to-X* pode colocar o Brasil no centro da economia de baixo carbono.

Em síntese, a descarbonização sustentável configura-se como alicerce para um novo paradigma de desenvolvimento, integrando as dimensões social, econômica, ambiental e tecnológica que transforma o risco climático em oportunidade de liderança estratégica.

Esse papel de liderança ganha ainda mais relevância diante do quadro internacional: com as emissões globais em níveis recordes de 57,1 GtCO₂e, e com os países do G20 respondendo por mais de três quartos do total, há uma pressão crescente por ambições mais auspiciosas na concepção e execução das NDCs.

Nesse contexto, o Brasil pode não apenas contribuir para a redução global, mas também se destacar como referência de como combinar elementos estratégicos como sustentabilidade, competitividade e inclusão social em sua economia.

Diante da crescente pressão internacional por metas mais ambiciosas de redução de emissões, o Brasil tem a oportunidade de liderar pelo exemplo. Ao conjugar sustentabilidade, inovação e inclusão social, o país pode consolidar sua posição como referência global em desenvolvimento de baixo carbono.

7. Referências

1. Observatório do Clima & SEEG. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**. São Paulo: OC/Imaflora, 2024.
2. United Nations Environment Programme. **Emissions Gap Report 2024: No more hot air... please!** Nairobi: UNEP, 2024. DOI: [10.59117/20.500.11822/46404].
3. IPCC. **Summary for Policymakers. Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, 2007.
4. National Public Utility Council. **Annual Utility Decarbonization Report 2023**. Washington, D.C., 2023.
5. Pisciotto, M. et al. **Current state of industrial heating and opportunities for decarbonization**. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 91, 2022. DOI: [10.1016/j.pecs.2021.100982].
6. Gerres, T. et al. **To ban or not to ban carbon-intensive materials**. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, v. 30, n. 2, 2021. DOI: [10.1111/reel.12395].
7. Sikarwar, V. S. et al. **Progress in in-situ CO₂-sorption for enhanced hydrogen production**. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 91, 2022. DOI: [10.1016/j.pecs.2022.101008].

8. Ministério de Minas e Energia – MME; Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034)**. Brasília: MME/EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>.
9. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanço Energético Nacional 2025: Síntese**. Brasília: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>.
10. United Nations Environment Programme – UNEP. **Emissions Gap Report 2024: No more hot air ...please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments**. Nairobi: UNEP, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59117/20.500.1822/46404>.
11. European Commission; Joint Research Centre – JRC; International Energy Agency – IEA; Crippa, M.; Guizzardi, D.; Pagani, F.; Banja, M.; Muntean, M.; Schaaf, E.; Monforti-Ferrario, F.; Becker, W.; Quadrelli, R.; Risquez Martin, A.; Taghavi-Moharamli, P.; Köykkä, J.; Grassi, G.; Rossi, S.; Melo, J.; Oom, D.; Branco, A.; San-Miguel, J.; Manca, G.; Pisoni, E.; Vignati, E.; Pekar, F. **GHG Emissions of All World Countries – 2024**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. DOI: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897>.

EXPANSÃO DA MOBILIDADE ELÉTRICA E SEUS INVESTIMENTOS ESTRATÉGICOS NO BRASIL

ELECTRIC MOBILITY EXPANSION AND STRATEGIC INVESTMENTS IN BRAZIL

Edgar Barassa; Barassa & Cruz Consulting
Robson Ferreira da Cruz; Barassa & Cruz Consulting
Sabrina Cima; Barassa & Cruz Consulting

ABSTRACT

This study provides a comprehensive assessment of the current status, growth trajectory, and strategic investments shaping Brazil's electric mobility sector. In 2024, the country registered 177,358 light electric vehicles (EVs), representing an 89% increase over the previous year and consolidating a sustained growth trend. This acceleration is underpinned by the combined effect of industrial policies—such as the MOVER and Nova Indústria Brasil programs—targeted investment in public transport electrification, and the rapid expansion of charging infrastructure, which reached 12,000 public charging points nationwide by the end of 2024, with an additional 2,500 fast chargers planned for 2025. The analysis adopts a multi-technology perspective, covering Battery Electric Vehicles (BEVs), Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs), and Hybrid Electric Vehicles (HEVs), including flex-fuel variants that leverage Brazil's bioenergy potential. The findings reveal that supply-side investments—amounting to more than R\$ 20 billion between 2019 and 2024—are driving industrial transformation, fostering local manufacturing capacity, vertical integration of battery supply chains, and innovation in emerging segments such as battery recycling, domestic cell production, and electric aviation. The public transport segment, although still in its early stages with around 800 operational electric buses, is gaining momentum through federal and municipal programs, supported by established manufacturers and an increasingly localized supply chain. However, structural challenges remain, including the geographic concentration of charging infrastructure, regulatory gaps, and high entry barriers for large-scale fleet electrification. By synthesizing market data, regulatory frameworks, and investment trends, through theoretical study, it offers insights into the interaction between technological trajectories, industrial policies, and private sector strategies, positioning Brazil as a potential leader in sustainable mobility in the Global South. It concludes by identifying strategic opportunities for stakeholders and research gaps, particularly in regional impact assessment, value chain modelling, and multisectoral integration, as key areas for enabling a just and accelerated transition to zero-emission transportation.

Keywords: Electric Mobility, Industrial Policy, Charging Infrastructure, Sustainable Transportation, Brazil.

RESUMO

Este estudo apresenta uma avaliação abrangente sobre o estágio atual, a trajetória de crescimento e os investimentos estratégicos que moldam o setor de mobilidade elétrica no Brasil. Em 2024, o país registrou 177.358 veículos elétricos leves (VEs), representando um aumento de 89% em relação ao ano anterior e consolidando uma tendência de crescimento sustentado. Essa aceleração é sustentada pelo efeito combinado de novas empresas entrantes; políticas industriais — como os programas **MOVER** e **Nova Indústria Brasil** —, investimentos direcionados à eletrificação do transporte público e pela rápida expansão da infraestrutura de recarga, que atingiu 12.000 pontos públicos de carregamento em todo o território nacional até o final de 2024, com previsão de instalação de mais 2.500 carregadores rápidos em 2025. A análise adota uma perspectiva **multitecnológica**, abrangendo Veículos Elétricos a Bateria (BEVs), Veículos Híbridos Plug-in (PHEVs) e Veículos Híbridos (HEVs), incluindo variantes *flexfuel* que aproveitam o potencial bioenergético brasileiro. Os resultados revelam que os investimentos pelo lado da oferta — que somaram mais de R\$ 20 bilhões entre 2019 e 2024 —

estão impulsionando a transformação industrial, fomentando a potencial capacidade de manufatura local, a integração vertical das cadeias de suprimento de baterias e a inovação em segmentos emergentes como reciclagem de baterias, produção doméstica de células e aviação elétrica. O segmento de transporte público, embora ainda em estágio inicial com cerca de 800 ônibus elétricos em operação, vem ganhando dinamismo por meio de programas federais e municipais, apoiados por fabricantes estabelecidos e por uma cadeia de suprimento cada vez mais nacionalizada. Contudo, persistem desafios estruturais, incluindo a concentração geográfica da infraestrutura de recarga, lacunas regulatórias e elevadas barreiras de entrada para a eletrificação de frotas em larga escala. Ao sintetizar dados de mercado, marcos regulatórios e tendências de investimento, por meio de estudo teórico oferece insights sobre a interação entre trajetórias tecnológicas, políticas industriais e estratégias do setor privado, posicionando o Brasil como potencial líder em mobilidade sustentável no Sul Global. Conclui-se identificando oportunidades estratégicas para os diferentes atores e lacunas de pesquisa, especialmente em avaliação de impactos regionais, modelagem de cadeias de valor e integração multissetorial, como áreas-chave para viabilizar uma transição justa e acelerada rumo ao transporte de emissões zero.

Palavras-chave: Mobilidade Elétrica, Política Industrial, Infraestrutura de Recarga, Transporte Sustentável, Brasil

1. INTRODUÇÃO

A busca global pela descarbonização tem imposto uma pressão sem precedentes sobre o setor de transportes para acelerar a transição rumo a tecnologias de baixo carbono. A mobilidade elétrica, em particular, emergiu como uma estratégia para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover o desenvolvimento urbano sustentável. Países ao redor do mundo estão vivenciando um crescimento exponencial na adoção de veículos elétricos (VEs), impulsionado por políticas climáticas ambiciosas, avanços tecnológicos e pelo aumento da aderência dos consumidores [1], [2].

Nesse contexto, o Brasil constitui um caso singular de estudo. Como a maior economia da América Latina, o país dispõe de uma robusta indústria automotiva e de uma matriz energética renovável consolidada — fatores que o posicionam favoravelmente na corrida global pela mobilidade sustentável [3]. A transição energética em curso, associada a políticas industriais como os programas **MOVER** e **Nova Indústria Brasil**, criou uma janela estratégica de oportunidade para fortalecer a capacidade produtiva doméstica, estimular a inovação tecnológica e integrar soluções sustentáveis à agenda nacional de transportes.

Compreender a evolução da mobilidade elétrica no Brasil é fundamental para avaliar como essas forças de mercado, combinadas a políticas públicas e investimentos privados, estão moldando uma nova trajetória para o setor automotivo. Nesse sentido, emerge uma questão central: **como se dá a difusão das tecnologias de mobilidade elétrica no Brasil entre os diferentes segmentos veiculares?**

Este estudo busca conduzir uma revisão da literatura do cenário da mobilidade elétrica no Brasil, analisando tendências de mercado e fluxos de investimento em diferentes arquiteturas tecnológicas e classes de veículos. O objetivo é oferecer uma compreensão geral da interação entre incentivos de política pública, investimentos do setor privado e avanços tecnológicos que sustentam a transição do país rumo a um transporte de baixo carbono.

2. METODOLOGIA

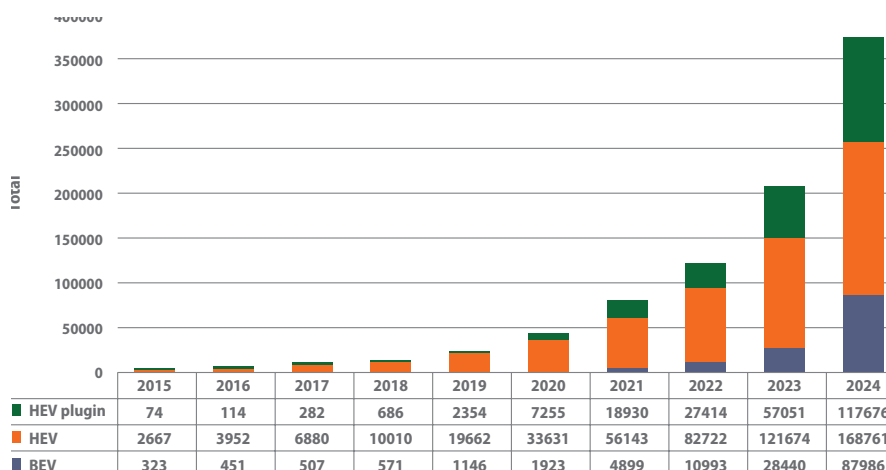
Esta pesquisa baseia-se em uma revisão de fontes secundárias, incluindo relatórios oficiais, estudos de mercado e artigos técnicos. Os principais repositórios de dados e publicações analisados incluem o **Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica (PNME)**, o **Relatório Anual da ANFAVEA**, e o portal da **Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE)**, além de diversos relatórios de inteligência de mercado [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Dados complementares foram coletados em anúncios corporativos, documentos de políticas governamentais e fontes públicas disponíveis na internet, garantindo uma análise abrangente dos padrões de investimento e da dinâmica de mercado.

3. RESULTADOS

3.1. PANORAMA DE MERCADO PARA VEÍCULOS DE PASSEIO ELÉTRICOS

O mercado brasileiro de mobilidade elétrica entrou em uma fase de expansão acelerada, sustentada por uma combinação de políticas industriais, crescente demanda dos consumidores e investimentos significativos pelo lado da oferta. Em 2024, o registro de **177.358 veículos elétricos leves** representa não apenas um aumento de 89% em relação a 2023, mas também um marco decisivo que indica a consolidação de uma nova trajetória de crescimento. Esse avanço reflete um mercado em amadurecimento, que começa a superar barreiras estruturais iniciais, como a oferta limitada e os elevados custos de aquisição.

Gráfico 1. Evolução da frota total de veículos eletrificados no Brasil (2015-2024)



Fonte: adaptado de [10]

A análise mais detalhada da distribuição por tecnologia revela que os **Veículos Elétricos a Bateria (BEVs)** alcançaram tração com **61.615 unidades vendidas** — quase o triplo do registrado no ano anterior. Essa tendência ascendente sugere uma mudança nas preferências dos consumidores em direção a soluções totalmente elétricas, impulsionada pelas agressivas estratégias de mercado de fabricantes como BYD e GWM. Seus investimentos em fábricas locais, aliados a políticas de preços competitivos e à expansão das redes de recarga, reduziram significativamente as barreiras de entrada para a adoção de BEVs.

Os **Veículos Híbridos Plug-in (PHEVs)**, que registraram **64.009 unidades emplacadas em 2024**, continuam desempenhando um papel essencial de transição no mercado brasileiro. Sua popularidade reflete a preferência crescente dos consumidores por uma solução que oferece **maior eficiência energética** e a **possibilidade de recarga doméstica**, ao mesmo tempo em que mantém a **flexibilidade de um motor a combustão complementar** para viagens de longa distância ou em regiões com infraestrutura de recarga ainda limitada. Esse perfil híbrido faz com que os PHEVs se consolidem como uma alternativa pragmática, equilibrando os benefícios da eletrificação com a segurança de abastecimento proporcionada pelo motor térmico, enquanto o país avança gradualmente na expansão de sua infraestrutura de recarga.

Já os **Veículos Híbridos (HEVs)**, responsáveis por aproximadamente **35.000 registros**, permanecem como um componente relevante na transição para uma mobilidade de baixas emissões. Destaca-se, nesse contexto, a ampla difusão das tecnologias híbridas *flexfuel*, que sublinham a especificidade da trajetória de descarbonização brasileira. Esse modelo de hibridização, ao combinar propulsão elétrica com motores a combustão interna movidos a etanol, representa uma alternativa de custo-efetiva à eletrificação total — sobretudo em regiões onde a infraestrutura de recarga ainda apresenta implantação desigual.

Em conjunto, os dados demonstram que o Brasil vem seguindo um **caminho multitecnológico** rumo à mobilidade sustentável, mesclando soluções imediatas de baixo carbono com uma visão de longo prazo para a eletrificação. Essa estratégia, embora complexa, oferece uma abordagem flexível e resiliente para a descarbonização, alinhada tanto à realidade da matriz energética nacional quanto ao perfil socioeconômico do mercado automotivo do país.

3.2. ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO

A eletrificação do transporte público no Brasil vem avançando de forma consistente, posicionando o país com ascensão em soluções urbanas de mobilidade de emissão zero. Atualmente, a frota operacional inclui aproximadamente **800 ônibus elétricos**, sendo **456 unidades a bateria e 300 trólebus**. Embora esses números possam parecer modestos quando comparados a referências globais e latino-americanas, é importante reconhecer que esse segmento apresenta **barreiras de entrada elevadas**, incluindo os altos custos iniciais de aquisição dos veículos e as adaptações necessárias na infraestrutura de recarga e de rede elétrica.[11]

Apesar dessas barreiras, avanços significativos têm sido observados em grandes centros urbanos, como São Paulo e Curitiba. Essas cidades estabeleceram metas ambiciosas para a descarbonização de suas frotas de transporte público,

amparadas por incentivos de governos locais e programas federais como o **NOVO PAC**, que estimulam a produção doméstica de ônibus elétricos. Esse alinhamento de políticas públicas tem fomentado o desenvolvimento de uma **cadeia de suprimentos nacionalizada**, reduzindo gradualmente a dependência de veículos e componentes importados.

Além disso, a crescente participação de fabricantes tradicionais de ônibus, como **Marcopolo** e **Eletra**, no processo de eletrificação de suas linhas de produtos evidencia a viabilidade e a competitividade crescentes desse segmento no Brasil.

3.3. INFRAESTRUTURA DE RECARGA

O desenvolvimento da infraestrutura de recarga continua sendo um elemento crítico para a expansão da mobilidade elétrica no Brasil. Até o final de 2024, o país havia alcançado a marca de **12.000 pontos públicos de carregamento**, representando um progresso significativo em relação aos anos anteriores. Entretanto, a **distribuição geográfica** dessa infraestrutura permanece altamente concentrada nas regiões **Sudeste e Sul**, com destaque para os estados de **São Paulo e Paraná**. Essa implantação desigual constitui um desafio estrutural que pode limitar a adoção de veículos elétricos em regiões menos desenvolvidas, a menos que políticas públicas específicas e investimentos privados sejam direcionados para reduzir esse desequilíbrio [10].

Do total, cerca de **2.500 pontos correspondem a estações de recarga rápida**, que são os verdadeiros elementos estratégicos para a **eletrificação das rodovias e corredores de longa distância**. Esses pontos são cruciais para reduzir uma das principais barreiras funcionais à adoção dos veículos elétricos — a chamada “ansiedade de autonomia” —, pois permitem o abastecimento em tempos compatíveis com as necessidades de deslocamentos interurbanos. Ainda que a expansão da infraestrutura lenta e semirrápida seja relevante para o uso cotidiano em áreas urbanas, é a presença de recargas rápidas ao longo das principais conexões viárias que definirá a viabilidade de uma mobilidade elétrica nacionalmente integrada.

Destaca-se que esses investimentos estão sendo liderados, cada vez mais, por **empresas de energia**, como **Raízen**, **Vibra Energia** e **EDP**. Esse movimento demonstra a **convergência entre os setores de energia e transporte** no apoio à agenda de descarbonização. Tal tendência reflete um fenômeno global mais amplo, em que a eletrificação do transporte está intrinsecamente vinculada tanto à modernização da infraestrutura de distribuição de energia quanto ao crescimento das fontes renováveis [12].

3.4. INVESTIMENTOS PELO LADO DA OFERTA: CATALISADORES DA TRANSFORMAÇÃO INDUSTRIAL

O volume e a escala dos investimentos recentes no setor de mobilidade elétrica no Brasil revelam um claro reposicionamento estratégico de atores nacionais e internacionais da indústria. Os aportes realizados por empresas como **BYD** e **GWM** exemplificam essa nova lógica industrial [13]. Ambas vêm acelerando a **localização da produção** para contornar barreiras tarifárias e fortalecer sua competitividade, ao mesmo tempo em que asseguram recursos estratégicos, como o **lítio**, por meio de concessões de mineração no **Vale do Lítio, em Minas Gerais**. Essa estratégia de integração **vertical** é crucial para reduzir vulnerabilidades na cadeia de suprimentos e garantir produção com custos mais competitivos em um mercado global altamente disputado.

Paralelamente, gigantes tradicionais da indústria automotiva, como **Stellantis**, **Volkswagen** e **General Motors**, vêm apostando em estratégias de eletrificação híbrida e *flexfuel*, alinhadas à singularidade da matriz energética brasileira. Esses investimentos indicam que a transição no Brasil não será conduzida exclusivamente pelos BEVs, mas seguirá um **caminho diversificado**, incorporando múltiplas tecnologias. Essa pluralidade permitirá ao país **capitalizar sua liderança em bioenergia** ao mesmo tempo em que expande progressivamente a eletrificação.

A maturação do mercado de mobilidade elétrica no Brasil também está abrindo **novas fronteiras de inovação**. Iniciativas de **reciclagem de baterias**, lideradas por empresas como **Tupy** e **Energy Source do Brasil**, estão estabelecendo as bases para a construção de uma economia circular no setor de veículos elétricos. Esses projetos são fundamentais não apenas para reduzir o impacto ambiental do descarte de baterias, mas também para **assegurar matérias-primas valiosas**, que se tornarão cada vez mais escassas diante da aceleração da demanda global por baterias.

Além disso, a criação da **primeira planta-piloto de células de bateria de íons de lítio** do país, desenvolvida pelo **Instituto SENAI de Inovação em Eletroquímica**, representa um passo decisivo para reduzir a dependência tecnológica de fornecedores estrangeiros. A integração dos esforços locais de **P&D** com instrumentos de política industrial, como o **programa Rota 2030**, reflete uma visão estratégica para consolidar a posição do Brasil nas **cadeias globais de valor de tecnologias de armazenamento de energia** [14].

Setores emergentes, como a **aviação elétrica**, também ilustram a ambição tecnológica do país. A iniciativa **Eve Air Mobility**, da Embraer, apoiada por um investimento de **US\$ 88 milhões**, está pioneiramente desenvolvendo aeronaves elétricas de **decolagem e pouso vertical (eVTOLs)**, com início das operações comerciais previsto para 2026. Esse

avanço posiciona o Brasil na vanguarda dos **novos paradigmas de mobilidade**, com potencial para revolucionar a logística urbana e o transporte de passageiros em curtas distâncias [15].

3.5. POLÍTICAS PÚBLICAS E REGULAÇÕES

O Brasil estabeleceu um **arcabouço inicial de regulação e incentivos** para acelerar a adoção da mobilidade elétrica. Políticas-chave e mecanismos de financiamento estão moldando o mercado, abrindo oportunidades para fabricantes, desenvolvedores de infraestrutura e provedores de tecnologia. Contudo, ainda há necessidade de avanços regulatórios e de maior estruturação institucional para garantir maior eficiência e previsibilidade no setor.

Quadro 1. Principais políticas públicas brasileiras aplicadas aos veículos elétricos

Instrumento	Principais aspectos
Incentivos de Imposto de Importação	O Brasil implementou isenções do imposto de importação para veículos elétricos (VEs), variando de 0% a 18%. Entretanto, está em curso a reintrodução gradual dessas tarifas: 10% a partir de janeiro de 2024, 18% em julho de 2024, 25% em julho de 2025 e atingindo 35% em julho de 2026. O objetivo é estimular a produção nacional de VEs e híbridos, tornando os produtos locais mais competitivos.
Reduções de IPVA (Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores)	Diversos estados brasileiros oferecem incentivos adicionais para promover a adoção de VEs. Em São Paulo, maior estado em circulação veicular, há isenção de IPVA para híbridos flex-fuel , desde que utilizem o motor a etanol; contudo, veículos totalmente elétricos não são elegíveis. No Rio de Janeiro, a alíquota é reduzida para 0,5% em VEs e 1,5% em híbridos; em Minas Gerais, há isenção total para veículos elétricos e híbridos fabricados no estado; e o Distrito Federal concede isenção integral para ambos.
Programa MOVER	Introduzido em 2024, o MOVER (Programa de Mobilidade e Industrialização Verde) substitui o Rota 2030 e tem como foco estimular a pesquisa e desenvolvimento. Inclui benefícios fiscais para empresas que investem em sustentabilidade e novas soluções de mobilidade, com espaço para a produção eletrificados, de baterias e no transporte público elétrico.
Iniciativas Estaduais e Municipais	Programas como o PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) destinam recursos para renovação de frotas de ônibus públicos com modelos elétricos. Além disso, alguns estados implementaram mandatos de eletrificação de frotas , obrigando a transição do transporte coletivo para veículos de emissão zero.
Fundo Clima & Financiamentos BNDES	O BNDES oferece linhas de financiamento para mobilidade elétrica via Fundo Clima e modalidades de crédito específicas, como o FINEM , voltado a projetos de grande porte em produção de VEs e expansão da infraestrutura.

Fonte: adaptado de [8], [16], [17].

4. CONCLUSÕES

A análise do panorama da mobilidade elétrica no Brasil revela um momento de **crescimento estratégico** no setor automotivo nacional, marcado por altas taxas de crescimento, investimentos relevantes e um alinhamento crescente entre políticas públicas, iniciativas privadas e inovação tecnológica. O registro de **177.358 veículos elétricos leves em 2024** — um aumento de 89% em relação ao ano anterior — indica que o mercado superou sua fase inicial e passa a trilhar um caminho de expansão mais consistente.

Esse processo é sustentado por quatro eixos principais:

1. **Agressividade de empresas novas entrantes como BYD e GWM** no mercado brasileiro
2. **Programas governamentais** como o **MOVER** e a **Nova Indústria Brasil**, que estimulam a produção local e reduzem a dependência de importações;
3. **Expansão da infraestrutura de recarga**, que alcançou 12.000 pontos públicos e demonstra 2.500 carregadores rápidos.
4. **Adoção de múltiplas arquiteturas tecnológicas** — dos BEVs aos híbridos flex-fuel — permitindo uma transição plural, em sintonia com a matriz energética e a realidade socioeconômica brasileira.

A estratégia brasileira se apoia na **diversificação tecnológica** como pilar central, articulando eletrificação plena, soluções híbridas e uso de biocombustíveis. Essa abordagem possibilita que o país avance de forma gradual e resiliente, aproveitando sinergias entre cadeias produtivas já consolidadas (como o etanol) e novas fronteiras de inovação, como reciclagem de baterias, produção doméstica de células e setores emergentes, a exemplo da aviação elétrica.

Contudo, permanecem **desafios estruturais**: a concentração da infraestrutura de recarga no Sul e Sudeste, a necessidade de maior governança e clareza regulatória e os altos custos para eletrificação do transporte público. Além disso, o fortalecimento da cadeia de valor das baterias — da mineração à reciclagem — será decisivo para garantir competitividade de longo prazo e reduzir riscos de dependência externa.

Diante desse cenário, é possível afirmar que o Brasil tem condições de se consolidar como **um dos protagonistas da mobilidade elétrica no Sul Global**, ainda que não como líder absoluto. O sucesso dessa trajetória dependerá da capacidade de coordenar políticas públicas, investimentos privados e inovação tecnológica de forma integrada e consistente ao longo dos próximos anos.

REFERÊNCIAS

- [1] International Energy Agency (IEA), “Global EV Outlook 2024 Moving towards increased affordability,” Paris, 2024. [Online]. Available: iea.org
- [2] E. Barassa, “A CONSTRUÇÃO DE UMA AGENDA PARA A ELETROMOBILIDADE NO BRASIL: COMPETÊNCIAS TECNOLÓGICAS E GOVERNANÇA,” TESE DE DOUTORADO, Instituto de Geociências, UNICAMP, 2019. [Online]. Available: <http://repositorio.unicamp.br/acervo/e/1094309?guid=1645056005960&returnUrl=%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3D1645056005960%26q=quantidadePaginas%3D1%26codigoRegistro%3D1094309%231094309&i=6>
- [3] PNME, “Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica,” 2021. [Online]. Available: <https://www.pnme.org.br/biblioteca/1o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica/>
- [4] NTU (Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos), “Anuário NTU 2019—2020,” 2020.
- [5] ANFAVEA, “Anuário ANFAVEA,” São Paulo, 2024.
- [6] E. Barassa *et al.*, “2º Anuário da Mobilidade Elétrica,” Brasília, 2022. [Online]. Available: <https://www.pnme.org.br/biblioteca/2o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica-pnme/>
- [7] PNME, “1º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica,” 2021. [Online]. Available: <https://www.pnme.org.br/biblioteca/1o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica/>
- [8] E. Barassa, R. F. da Cruz, and R. F. Wolffenbüttel, *3 ANUÁRIO BRASILEIRO DA MOBILIDADE ELÉTRICA 2023*, 3rd ed., vol. 4, no. 1. Brasília: PNME, 2023. [Online]. Available: pnme.org.br
- [9] BCG ANFAVEA, “Avançando nos caminhos da descarbonização automotiva no Brasil,” 2024.
- [10] ABVE, “ABVE DATA Eletropostos.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://abve.org.br/abve-data/bi-eletropostos/>
- [11] ABVE, “ABVE DATA Frotas.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://abve.org.br/bi-frotas/>
- [12] Flávia Consoni, Tatiana Bermúdez Rodríguez, Altair Aparecido Oliveira Filho, Edgar Barassa, and Anna Carolina Navarro, *As Cidades como Protagonistas – Políticas públicas de transição para a mobilidade elétrica*, 1st ed. Papagaio, 2025.
- [13] Forbes, “Nova fábrica da BYD acirra concorrência entre marcas chinesas.” Available: <https://forbes.com.br/forbeslife/forbes-motors/2023/10/nova-fabrica-da-byd-acirra-concorrenca-entre-marcas-chinesas/>
- [14] SISTEMA FIEP, “Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica lidera projeto estruturante de baterias de íons-lítio no Paraná - Notícias - Senai Paraná - Senai Tecnologia e Inovação - Blog STI.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.senai.br/pt-br/tecnologiaeinovacao/blog/instituto-senai-de-inovacao-em-eletoquimica-lidera-projeto-estruturante-de-baterias-de-ions-litio-no-parana-1-36128-488475.shtml>
- [15] REVISTA PESQUISA FAPESP, “Avança o desenvolvimento do eVTOL da Embraer: Revista Pesquisa Fapesp.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://revistapesquisa.fapesp.br/avanca-o-desenvolvimento-do-evtol-da-embraer/>
- [16] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, “Mover: Programa de Mobilidade Verde é lançado — Planalto.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-acoes-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>
- [17] E. Barassa, *Geografia produtiva da indústria de veículos de transporte público no Brasil e impacto da COVID-19 sobre as cadeias de fornecimento*, 1st ed. Santiago de Chile: CEPAL, 2023. [Online]. Available: <https://www.cepal.org/pt-br/publicaciones/68736-geografia-produtiva-industria-veiculos-transporte-publico-brasil-impacto-covid>

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO SETOR ELÉTRICO: IMPACTOS, INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E POLÍTICAS NACIONAIS

Fabio A. Guerra, Eng. Dr.

Resumo

A **Inteligência Artificial (IA)** vem transformando o setor elétrico em escala global, e no Brasil encontra-se em processo de consolidação apoiado por **políticas públicas, programas de PDI e diretrizes nacionais**. Este artigo apresenta os **impactos sociais, educacionais e empresariais** da adoção da IA, discute o **panorama de tendências e desafios no setor elétrico**, exemplifica **áreas práticas de aplicação por meio de agentes de IA** desenvolvidos pela Tech2Think – **Inteligência Artificial além da nuvem** em projetos de **PDI ANEEL** e analisa como as **diretrizes do Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (2024-2028)** podem potencializar a inovação e a sustentabilidade. Conclui-se que a IA vai muito além dos **modelos de linguagem**, abrangendo **soluções críticas de operação, regulação e gestão de ativos**, e que seu avanço depende da **integração entre tecnologia, regulação e capacitação humana**.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Setor Elétrico, Governança, PDI ANEEL, Plano Brasileiro de Inteligência Artificial.

Introdução

A Inteligência Artificial consolidou-se como uma das tecnologias mais transformadoras da atualidade, impactando setores estratégicos da economia e da sociedade. No setor elétrico, sua aplicação **transcende** os modelos de linguagem de grande escala (LLMs), envolvendo previsões de carga, otimização da operação, manutenção preditiva e processos regulatórios. Embora as iniciativas no Brasil ainda estejam dispersas, observa-se crescente maturidade apoiada por programas regulatórios da ANEEL e pelas diretrizes nacionais de inovação.

Impactos Sociais, Educacionais e Empresariais

A IA no setor elétrico gera impactos que extrapolam a operação técnica. Do ponto de vista **social**, contribui para ampliar a **qualidade do fornecimento de energia**, beneficiando consumidores. No campo **educacional**, demanda a **formação de profissionais capacitados em ciência de dados, machine learning e governança digital**, promovendo novas carreiras e transformando currículos acadêmicos. Já no âmbito **empresarial**, a adoção de IA está ligada a **maior eficiência, redução de custos e criação de novos modelos de negócio**. Para sustentar tais avanços, destacam-se a **governança de dados** e a **gestão do conhecimento**, essenciais para consolidar experiências, garantir confiabilidade e transformar dados em **ativos estratégicos**.

Panorama no Setor Elétrico

A **Bibliografia Temática da ANEEL (jul/2025)** ressalta que a IA é um elemento-chave da transição energética, caracterizada pela descentralização, digitalização e descarbonização. Entre as aplicações de destaque estão previsão de carga e geração, detecção de falhas, manutenção preditiva e otimização de ativos. A agência também aponta desafios como interoperabilidade entre sistemas legados, qualidade dos dados, segurança cibernética e capacitação técnica, além da discussão sobre o consumo energético dos próprios modelos de IA e sua sustentabilidade. Esses elementos mostram que a adoção da IA deve equilibrar ganhos operacionais imediatos com impactos ambientais e sociais de longo prazo.

Casos Práticos no Brasil

No Brasil, a **Tech2Think – Inteligência Artificial além da nuvem** tem demonstrado que a IA aplicada ao setor elétrico é capaz de gerar **resultados** em diferentes frentes operacionais e regulatórias. As soluções baseadas em **agentes de IA** abrangem desde a **classificação inteligente de ocorrências na rede de distribuição**, aumentando a precisão na identificação de falhas e reduzindo o tempo de resposta, até a análise e melhoria da qualidade de dados regulatórios, que fortalece a confiabilidade das informações e amplia a eficiência das equipes. Outro campo de destaque é a **teoria de grafos na modelagem de redes**, utilizada para otimizar o compartilhamento de infraestrutura e identificar pontos estratégicos de proteção, reduzindo riscos de desligamentos amplos. Além disso, a empresa aplica **agentes de IA** especializados em manutenção preditiva, capazes de antecipar falhas e prolongar a vida útil de ativos essenciais. Essas iniciativas comprovam que a IA, quando organizada em **micros e agentes de IA voltados a problemas específicos**, vai muito além dos modelos de linguagem e se traduz em ganhos operacionais, regulatórios e estratégicos que impactam consumidores, concessionárias e todo o ecossistema do setor elétrico.

Diretrizes Estratégicas Nacionais

O **Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA 2024-2028)** representa um marco para o país, prevendo investimentos de R\$ 23 bilhões até 2028. O documento estrutura-se em cinco eixos: ações de impacto imediato; fortalecimento da infraestrutura e desenvolvimento de IA; difusão, formação e capacitação de profissionais; uso da IA para melhoria dos serviços públicos; e suporte ao processo regulatório e de governança. Para o setor elétrico, esses eixos se traduzem na possibilidade de acelerar soluções tecnológicas, ampliar a base de profissionais qualificados e promover um ambiente regulatório propício à inovação responsável. Assim, o PBIA não apenas cria condições para que a IA se desenvolva de forma soberana e ética, mas também conecta inovação tecnológica às necessidades nacionais de eficiência, sustentabilidade e inclusão social.

Considerações Finais

A **Inteligência Artificial** no setor elétrico brasileiro se consolida como uma **ferramenta estratégica** para enfrentar os **desafios da transição energética**. Seus impactos vão muito além do **ganho de eficiência operacional**, alcançando dimensões **sociais, educacionais e empresariais**. No setor elétrico brasileiro, observa-se que algumas empresas já se organizaram em relação aos **dados** e avançaram na disponibilização por meio de **data lakes**. Contudo, muitas delas ainda aplicam IA exclusivamente via **soluções de big techs**, o que tem gerado **expectativas não correspondidas** em termos de **resultados concretos e duradouros**. Isso ocorre principalmente pela adoção da tecnologia “**por aplicar**”, sem um **entendimento profundo da teoria que sustenta a IA** e de sua **real capacidade de transformação** dentro do processo. Outras empresas, por sua vez, sequer possuem a **adequada disponibilização de dados**, mas ainda assim tentam se posicionar no discurso de inovação em IA resultando em **frustrações**. Essa jornada precisa ser **organizada tecnicamente**, garantindo que os investimentos em IA de fato se convertam em **valor e resultados perceptíveis para os stakeholders**. Poucos, entretanto, pensam em **agentes ou micros de IA**, que quando aplicados de forma direcionada já são capazes de gerar **impactos reais, com eficiência e resultados mensuráveis**.

O avanço sustentável da IA dependerá da **integração entre tecnologia, regulação e capacitação humana**, da **consolidação de uma governança de dados sólida** e da **implementação de políticas de incentivo**, como as previstas no **Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA 2024-2028)**. Nesse sentido, destaca-se também o alinhamento com as **diretrizes estratégicas de PDI da ANEEL**, em especial o eixo **TE4: Novas Tecnologias de Suporte – Inteligência Artificial, Realidade Virtual e Aumentada e Blockchain**, que reforça a necessidade de explorar **tecnologias emergentes** de forma articulada para **maximizar seus impactos** no setor elétrico. Dessa forma, o setor elétrico poderá **transformar a inovação em valor real para empresas, consumidores e para o país**, consolidando o Brasil como **protagonista global na aplicação de IA em energia**.

Sobre Fabio A. Guerra, Eng. Dr.

Sou doutor e mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, Engenheiro de Computação e Conselheiro de Administração, com mais de 25 anos de experiência em **Inteligência Artificial, Machine Learning e sistemas complexos**. Ao longo da minha trajetória, liderei mais de 50 projetos aplicados e publiquei trabalhos científicos, sempre com o objetivo de transformar tecnologia em soluções práticas para desafios reais.

Sou sócio-proprietário da **Tech2Think (T2T)** e da **Tech4Think (T4T)**, empresas criadas com o propósito de **levar a Inteligência Artificial além da nuvem**, unindo profundidade científica e aplicabilidade prática para gerar impacto em diferentes setores. Atualmente, também sou responsável pela **evolução tecnológica institucional e pela aplicação estratégica de IA na Defensoria Pública do Paraná**, conduzindo iniciativas que fortalecem a instituição e produzem benefícios concretos para a sociedade.

Minha jornada passou por indústrias, institutos de tecnologia, empresas privadas e instituições públicas. Em todos esses contextos, sempre busquei **construir alianças sólidas, aplicar tecnologia de forma responsável e desenvolver estratégias de crescimento sustentável**. Acredito que a inovação só tem valor real quando resulta em impacto positivo para empresas, governos e, principalmente, para as pessoas.

LinkedIn - <https://www.linkedin.com/in/fabioalessandroguerra/>

Lattes - <http://lattes.cnpq.br/6703284531309272>

AVALIAÇÃO DO USO DE BIOGÁS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR DE GERAÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL

Mauro Sérgio Conceição¹

¹Emerson Martim¹

Fulvy Antonella Venturi Pereira¹

RESUMO

A população mundial necessita de energia para sua sobrevivência, e os combustíveis fósseis, que são os mais utilizados como fonte não renovável para obtenção desta energia e causam grande impacto ao meio ambiente. Este artigo busca realizar, por meio de revisão bibliográfica, uma avaliação do uso do biogás na transição energética do setor de geração de energia no Brasil. Destaca que o biogás possui propriedades semelhantes às de combustíveis de fontes não renováveis para a produção de energia. Também analisa os resíduos gerados por atividades econômicas e saneamento básico, que podem servir como matéria-prima para a produção de biogás. Um comparativo entre o biogás e as principais fontes de energia não renováveis é apresentado para avaliar seu potencial como combustível alternativo e sua compatibilidade com as condições da nova matriz energética. O biogás mostrou-se uma excelente opção como combustível alternativo na matriz energética brasileira, apresentando grande potencial de disponibilidade e atendendo aos requisitos da nova matriz energética.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a população mundial necessita de energia para sobreviver, sendo os combustíveis fósseis os principais recursos não renováveis para obtenção desta energia e causam grande impacto ao meio ambiente. O biogás apresenta aplicações similares aos combustíveis de fontes não renováveis na geração de energia, embora sua viabilidade e produção possam variar dependendo do tipo de biomassa. O aumento das atividades econômicas e do consumo gera mais resíduos, e durante sua decomposição os gases gerados no meio ambiente, contribuem para aumentar as emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a utilização desses gases pode ser fundamental na transição para uma matriz energética mais sustentável, gerando energia renovável na forma de biogás, que pode ser usada localmente para gerar energia, na forma de calor, eletricidade ou substituir combustíveis tradicionais. Este estudo se mostra importante para contribuir com a utilização de um combustível alternativo para geração de energia a partir de resíduos, mitigando os impactos ambientais relativos à produção industrial. Adicionalmente, verificar: se o potencial de geração de biogás a partir dos efluentes industriais, O agronegócio e os aspectos sanitários são mensuráveis, assim como sua disponibilidade. Como uma fonte renovável, é importante identificar se eles têm uma repercussão positiva, criando valor a partir de um passivo ambiental, transformando-o em um ativo energético e, ao mesmo tempo, reduzindo o impacto sobre o meio ambiente.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido seguindo o propósito de pesquisa descritiva com abordagem de natureza quantitativa contínua, com a finalidade de entender e analisar a possibilidade da utilização do biogás na geração de energia durante a transição energética no Brasil. O procedimento adotado para a coleta de dados foi baseado na técnica de revisão bibliográfica (GIL, 2002, p. 28-50), levantados em teses, dissertações, artigos científicos e livros disponíveis em meio

¹ Especialização em Engenharia de Energias Renováveis - PUCPR

eletrônico na internet. Para analisar a possibilidade de utilizar o biogás como combustível para geração de energia, o presente trabalho foi dividido em três seções, sendo a primeira, identificar as principais atividades que produzem biogás, a segunda, verificar as propriedades químicas e físicas do biogás e, finalmente, identificar se o resultado da combustão poderia atender aos requisitos da transição energética no Brasil.

3. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

O conceito de transição energética é usualmente associado a mudanças significativas na estrutura da matriz energética primária mundial, coexistindo a fonte que caracteriza a transição energética e as fontes anteriores, que são progressivamente substituídas. Não é um processo linear e de ruptura (SMIL, 2024. p. 228 – 289) . Neste cenário de mudanças estruturais contemporâneas na matriz energética, surge uma nova filosofia de mudança, conhecida como nova transição energética, que consiste em um processo de transformações no sentido de uma economia de baixo carbono e menor pegada ambiental. O foco principal é o incremento da eficiência no uso das diferentes fontes de energia e substituir, progressivamente, recursos energéticos com maiores intensidade de carbono e pegada ambiental por aqueles com menores emissões de gases de efeito estufa (GEE) e impacto ao meio ambiente (EPE, 2019, p. 2).

A matriz energética é o conjunto de fontes usadas por um país, ou no mundo, para atender à demanda de energia. No Brasil, ela é composta por 55,2% de fontes não renováveis e 44,8% de fontes renováveis, sendo as não renováveis as principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa. As fontes não renováveis que sustentam a matriz energética brasileira incluem derivados de petróleo (35,7%), gás natural (10,5%), energia nuclear (1,3%) e outras não renováveis (0,6%). Também conhecida como fonte convencional, este grupo é formado por fontes combustíveis, que, exceto a nuclear, precisam ser queimadas para gerar energia com a consequente liberação de gases poluentes, impactando a saúde e o meio ambiente (EPE, 2024).

4. BIOGÁS

Segundo Soares et al.(2022, p. 9), o biogás é uma mistura de gases originada através do processo de biodigestão anaeróbica de matéria orgânica, a qual é totalmente convertida em gás, energia (calor) e biomassa. Este processo ocorre naturalmente no meio ambiente, por degradação dos seres vivos, pela decomposição de resíduos, rejeitos, efluentes industriais, dejetos de animais e/ou lodo de esgoto (Angelidaki et al., 2018, apud Soares et al, 2022). O biogás é um combustível composto de uma mistura de CH₄, CO₂ e outras impurezas, cuja concentração de CH₄ depende da quantidade de gorduras, proteínas e carboidratos presentes no substrato (SCHULZ e SOARES, 2014, p.3).

A produção do biogás, como fonte energética, representa, em geral, uma produção em pequena escala, o que permite a descentralização do setor de energia e a inclusão de muitos novos atores. Na Tabela 1, está demonstrado o potencial de produção do biogás pelos setores mais importantes na geração de resíduos.

Tabela 1 – Potencial do biogás, por setor de produção

Setor	Potencial de Biogás (Bilhões Nm ³ /ano)
Sucroenergético	39,76
Agroindústria	38,39
Resíduos sólidos urbanos	12,4
Esgoto sanitário	1,7

Fonte: ABIOGÁS (2020), EPE (2019).

No Brasil, os resíduos agroindustriais podem ser destacados, especialmente o setor sucroalcooleiro, devido ao alto volume de etanol produzido e à quantidade ainda maior de resíduos gerados durante o processo. Outros setores importantes incluem abatedouros, laticínios, processamento de alimentos e bebidas (SOARES et al., 2022, p.13). Apesar de sua importância econômica e na geração de empregos, a agroindústria também é uma das principais responsáveis pela produção de resíduos e contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa. Seu potencial de geração de biogás é estimado em 78,15 bilhões de Nm³ por ano. Resíduos de saneamento referem-se aos resíduos produzidos pelos serviços, infraestrutura e instalações de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem

urbana, manejo de resíduos sólidos e água pluvial. No setor de saneamento, as principais fontes de geração de biogás são a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e o esgotamento sanitário. Estima-se que o potencial de produção de biogás a partir dessas fontes seja de 7,2 bilhões de Nm³ por ano (Associação Brasileira do Biogás, 2020, p. 23).

5. FATORES DETERMINANTES PARA ESCOLHA DE UM COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

Segundo Turns (2013), a combustão converte a energia armazenada em ligações químicas em energia térmica, auxiliando na produção de bens de consumo e de capital, e na outra ponta do ciclo de vida de um produto, como uma forma de processamento de resíduos. O valor da soma de uma parcela de energia associada às ligações químicas e outra parcela associada à temperatura de uma reação de combustão determina a escolha de um combustível. Uma combustão é completa quando todo o carbono do combustível é convertido em CO₂ e todo o hidrogênio é convertido em H₂O, na condição padrão de referência (25°C, 1 atm). O calor gerado na combustão, conhecido como poder calorífico, é numericamente equivalente às parcelas de energia da reação. O poder calorífico superior, ou PCS, indica a quantidade de calor liberada na combustão quando toda a água nos produtos é condensada, atingindo a máxima liberação de energia. Por outro lado, o poder calorífico inferior, PCI, considera a condição em que toda a água permanece como vapor. Para a avaliação de candidatos a combustível, o poder calorífico padrão é um dos critérios principais, seguido pelo tipo de combustível (sólido, líquido ou gasoso) e sua disponibilidade.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste artigo, abordaremos o biogás livre proveniente de resíduos das atividades agroindustriais e de saneamento. Vale destacar que os gases produzidos na biodigestão de matéria orgânica contribuem para o efeito estufa, especialmente o metano, que está presente em alta concentração no biogás livre e possui um potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o do dióxido de carbono (Myhre et al., 2014 apud Soares et al., 2022). De acordo com Turns (2013), a primeira etapa na escolha de um combustível é verificar sua composição química, que varia de acordo com a fonte geradora. Segundo Lins et al. (2015), também é necessário comparar as principais fontes de produção de biogás para avaliar sua quantidade e qualidade, que variam de acordo com o tipo de biomassa. A qualidade do biogás é fundamental, pois fornece uma indicação segura sobre as variações nos componentes presentes e se há necessidade de tratamento específico antes de seu uso como fonte de energia. Na Tabela 2, é apresentada a composição do biogás proveniente dos principais tipos de biomassa disponíveis no Brasil, coletada nas principais fontes de produção.

Tabela 2 - Composição média do biogás para diferentes tipos de biomassa

Composição do Biogás	Biomassa residual (efluente)		
	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
Amidonaria (mandioca)	54,3	44,9	97,0
Bovinocultura leiteira	59,6	39,1	329,3
Misto (aves de postura + bovinocultura de corte)	69,2	29,8	64,1
Abatedouro de aves	68,2	29,6	1897,1
Suinocultura – terminação	62,0	37,0	2782,3
Suinocultura – produção de leitões	68,4	30,6	1309,1
Aterro sanitário	40 - 55	30 - 40	200
Esgoto sanitário	60 - 85	5 - 24,1	100 - 500

Fonte: LINS et al (2015), ANP (2007), LARISSA (2022)

A segunda etapa na escolha de um combustível alternativo é analisar sua propriedade energética, que corresponde à energia produzida durante sua combustão. No caso do biogás, o CH₄ é o gás combustível responsável por suas propriedades energéticas, enquanto o CO₂, que não sofre combustão, reduz o seu poder calorífico e limita sua transportabilidade, pois não pode ser injetado em gasodutos de gás natural. Outros componentes, como sulfeto de hidrogênio (H₂S), vapor de água (H₂O) e siloxanos, causam a corrosão nas peças metálicas e reduzem o poder calorífico do biogás. Assim,

é fundamental separar o CO₂ e outros constituintes corrosivos para potencializar e ampliar a utilização do biogás, pois após a remoção das impurezas, ocorre o aumento da energia existente do biogás bruto, com sua conversão em uma fonte de energia alternativa com as mesmas propriedades que as do gás natural: o biometano (SOARES et al., 2022).

A terceira e última etapa é analisar a conformidade do combustível alternativo, ao atendimento aos requisitos definidos pela nova matriz energética. Conforme LEE et al. (2023), a medida métrica usada para comparar as emissões de vários GEE é o equivalente de dióxido de carbono ou equivalente de CO₂, abreviado como CO₂-eq. Esta medida, das emissões de GEE de cada fonte de energia, é calculada com base potencial de aquecimento global (GWP), convertendo quantidades de outros gases para a quantidade equivalente de CO₂ com o mesmo potencial de aquecimento global. Por exemplo, o GWP para metano (CH₄) é 25 e para óxido nitroso (N₂O) é 298. Isso significa que as emissões de 1 milhão de toneladas métricas de CH₄ e N₂O, respectivamente, são equivalentes às emissões de 25 e 298 milhões de toneladas métricas de dióxido de carbono.

A Tabela 3 apresenta o comparativo do biogás com a matriz energética brasileira não renovável, contendo as principais propriedades e os resultados da combustão do biogás, do biometano (Biogás purificado) e dos combustíveis não renováveis da matriz energética brasileira.

Após comparar os combustíveis da matriz energética brasileira, o biogás manteve-se entre os combustíveis HFO e o carvão mineral, mostrando uma vantagem significativa em emissões que atendem aos requisitos da nova matriz energética. Após o tratamento para remoção de impurezas, o biogás, agora na forma de biometano, mostrou diferenças relevantes frente aos demais combustíveis avaliados, evidenciando valores de PCI superiores aos demais (ANP, 2022). Além disso, o biometano apresentou resultados positivos após a combustão, apresentando níveis seguros de resíduos contaminantes, além da importante ausência de cinzas, tornando-se uma excelente opção como combustível alternativo.

Tabela 3 – Comparativo do poder calorífico inferior e composição química dos combustíveis da matriz energética e do biogás

Combustíveis	Energia	Composição química						Resultado da combustão		
	PCI	CH ₄	C	H	O	N	S	Cinzas	Umidade BU	Emissões
	(MJ/kg)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(tCO ₂ -eq/ktep)
Biogás	34,00	55	<1	1	<1	<3	<1	0	7	0
Biometano	50,00	98,1	<2	<0,2	<0,8	0	<1	0	0	0
GLP	46,60	70		<5	<0,2	1,28	<1	0	<1	-
Petróleo cru	42,68	8	87	<11	<3	<1	6	0,3	<1	-
Gás natural	48,63	99	<0,3	<1	<0,8	<1	<1	-	0	2339
Óleo combustível pesado (HFO)	39,46	0	86,5	10,6	-	<1	2,8	0,1	-	3217
Diesel	42,79	0	85,8	13,5	-	-	0,7	-	-	3080
Gasolina	43,44	0	84	13	1,8	0	<10	0	0	2264
Carvão mineral	22,73	0	62,7	3,9	10,3	0,8	0,5	4,7	17,1	3899

Fonte: AL SEADI et al. (2008), ANP (2007, 2022), EPE (2024), SILVEIRA et al. (1015), WRIGHT et al.(2009)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a sociedade, a produção de biogás oferece uma tecnologia eficiente para tratar resíduos orgânicos, promovendo a reciclagem de nutrientes e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Essas vantagens fazem do biogás uma tecnologia que proporciona múltiplos benefícios ambientais em diversos setores. A utilização do processo de biodigestão em resíduos do agronegócio é uma forma interessante de destinar esses resíduos e gerar renda, evitando que eles causem impactos ambientais negativos. Ficou evidenciado que o biogás, em sua forma bruta (com impurezas), é um combustível alternativo capaz de substituir o carvão mineral e o HFO, apresentando alto poder calorífico e baixas emissões durante a queima. Após o tratamento, transformado em biometano, seus resultados superaram todos os combustíveis não renováveis da matriz energética brasileira, conforme o objetivo deste estudo. O biogás purificado contém maior energia de combustão e suas emissões estão dentro dos padrões exigidos pela nova transição energética, confirmando sua condição como excelente combustível alternativo. O biogás possui importantes vantagens, como: (1) excelente pro-

priedade energética; (2) produção a partir de resíduos orgânicos disponíveis nas regiões; (3) produção próxima ao local de consumo, sem grandes investimentos na construção de gasodutos e infraestrutura de distribuição; e (4) solução a passivos ambientais que se tornam ativos energéticos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP nº 889, de 07 de outubro de 2022. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, DF, 10 out. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-889-2022>. Acesso em: 18 ago. 2024.

_____. **Nota Técnica Conjunta nº 002/SCM/SAB/SQP/SRP**. 2007. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gasnatural/estudos-e-notas-tecnicas/projetos-especificos/nota-tecnica-002-2007.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2024.

_____. Resolução ANP nº 906, de 24 de novembro de 2022. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, DF, 24 nov. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022>. Acesso em: 18 ago. 2024.

AL SEADI, Teodorita; RUTZ, Dominik; PRASSL, Heinz; KÖTTNER, Michael; FINSTERWALDER, Tobias; VOLK, Silke; JANSSEN, Rainer. Utilisation of biogas. In: **The biogas handbook**. 2008 ed. Esbjerg : Syddansk Universitet, 2008. 124 p. Disponível em: <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>. Acesso em: 28 out. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. O potencial brasileiro de biogás. **Nota Técnica Potencial de Biogás** – 2020. São Paulo. Disponível em: https://cdn.prod.websitefiles.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390e394c734a95f3-032a2da_NOTA-TECNICA_PO-TENCIAL_ABIOGAS.pdf. Acesso em: 18 ago. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Panorama sobre a transição energética**. Caderno especial: Ciclo de debates com Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP sobre transição energética. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-718/Caderno Transição Energetica - V0.2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-718/Caderno%20Transi%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica-V0.2.pdf). Acesso em: 24 ago. 2024.

_____. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2024**. Disponível em: < [https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/ balancoenergetico-nacional-2024](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-2024) >. Acesso em: 18 out. 2024.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p. Disponível em: [https://www.academia.edu/48899027/Como_Elaborar_Projetos_De_Pesquisa_6a_Ed_GIL? auto=download](https://www.academia.edu/48899027/Como_Elaborar_Projetos_De_Pesquisa_6a_Ed_GIL?auto=download). Acesso em: 16 nov. 2024.

LEE, Hoesung et al. **Climate Change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. IPCC, Geneva, Switzerland. p. 1-34, 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-doipcc/arquivos /pdf/copy_of_IPCC Longer_Report_2023_Portugues.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-doipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf). Acesso em: 15 out. 2024.

LINS, Leonardo Pereira; MITO, Jessica Yuki de Lima; FERNANDES, Daniela Martins. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. **IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, v. 4, 2015 – Rio de Janeiro – RJ. Disponível em: https://www.sbera.org.br/4sigera/files/4.28_JessicaYukiLimaMito.pdf. Acesso em: 27 ago. 2024.

RODRIGUES, Larissa Jonaly. **Panorama de aproveitamento energético do biogás dos tratamentos de esgoto sanitário e de resíduos sólidos urbanos. 2022**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/16911>. Acesso em 18 ago. 2024.

SCHULZ, E. L.; SOARES, I. P. **Reforma do biogás** – revisão. Circular Técnica n. 13. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2014. 9 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/998908> Acesso em: 13 out. 2024.

SILVEIRA, Bruno et al. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015.

SMIL, Vaclav. **Energia e civilização: uma história**. 11. ed. Porto Alegre. Bookman, 2024. 548 p.

SOARES, Itânia Pinheiro; SCHULTZ, Emerson Léio; GAMBETTA, Rossano; GONCALVES, Sílvia Belém. **Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, Brasília. Embrapa Agroenergia, 2022. 29 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/243782/1/DOC-49-final-1.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2024.

TURNES, Stephen R. **Introdução à Combustão: Conceitos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: ed. Bookman, 2013. 420 p.

WRIGHT, Lynn; BOUNDY, Bob; BADGER, Philip C.; PERLACK, Bob; DAVIS, Stacy. **Biomass energy data book: Edition 2**. Oak Ridge, Tennessee. Oak Ridge National Laboratory, 2009. U. S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. Office of the Biomass Program. 2. Ed. p.173. Disponível em: https://www.shastacounty.gov/sites/default/files/fileattachments/planning/page/3375/3_exhibit_2.pdf. Acesso em 12 ago. 2024.

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE (H2V) COM ENERGIA RENOVÁVEL

Alexandre Diório
Giuliana Thomas Vitorino
Pablo Eduardo Magiero
Emerson Martim

1. Resumo

A demanda crescente por soluções energéticas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento do hidrogênio verde (H2V) como uma alternativa estratégica para a descarbonização e a transição energética. Produzido por eletrólise da água usando eletricidade de fontes renováveis, o H2V é uma opção limpa e versátil, embora enfrente desafios econômicos consideráveis. Este estudo analisou a viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde no Brasil, considerando três cenários de fornecimento de energia para o processo eletrolítico: sistemas fotovoltaicos, eólicos e hidrelétricos. Utilizou revisão bibliográfica e modelos financeiros (VPL, TIR e LCOH) com dados de bases técnicas, relatórios setoriais e especificações de fabricantes. Foram considerados custos de investimento (CAPEX), operação e manutenção (OPEX) e receitas da venda do H2 e do O2 coproduzido. Os resultados mostram que, sem incentivos fiscais, os projetos enfrentam limitações econômicas. O cenário hidrelétrico apresentou o menor LCOH (R\$ 30-40/kg), mas devido ao alto CAPEX e VPL negativo, é inviável sem infraestrutura existente. O sistema fotovoltaico mostrou potencial de viabilidade ao considerar a venda do oxigênio, com TIR de 22,24% e VPL positivo. O sistema eólico também se torna viável com a venda de oxigênio. Incentivos governamentais, como os previstos na Lei nº 14.948/24 e programas do BNDES, podem reduzir custos em até 15%, aproximando o LCOH da competitividade internacional. Conclui-se que, apesar dos desafios, a produção de H2V no Brasil tem potencial econômico e ambiental, especialmente com políticas públicas fortes, avanço tecnológico e integração setorial, consolidando o país como protagonista na transição energética global.

2. Introdução

Nos últimos anos, a busca por alternativas energéticas sustentáveis tem ganhado destaque, impulsionada pela necessidade de reduzir os impactos das mudanças climáticas e diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Nesse cenário, o hidrogênio se destaca como um vetor energético promissor, capaz de armazenar e fornecer energia de maneira limpa e versátil. Entre as diferentes formas de produção, o hidrogênio verde (H2V), produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, tem se mostrado uma solução estratégica para apoiar a transição energética e a descarbonização de diversos setores industriais (CNI, 2022; REN et al., 2017).

A eletrólise da água envolve a separação de suas moléculas em hidrogênio e oxigênio por meio de corrente elétrica. Quando essa energia é proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica, o processo não libera gases de efeito estufa (GEE), tornando o produto final mais sustentável (SANTOS et al., 2013; SHIVA KUMAR; HIMABINDU, 2019). Apesar de seu potencial, a produção de hidrogênio verde ainda enfrenta obstáculos, incluindo eficiência energética, altos custos de investimento (CAPEX) e operação (OPEX), além da necessidade de políticas de incentivo que tornem essa tecnologia competitiva em relação aos métodos tradicionais, como a reforma a vapor do metano (hidrogênio cinza) e a reforma com captura de carbono (hidrogênio azul) (NIKOLAIDIS; POULLIKKA, 2017). Avanços nas tecnologias renováveis, especialmente na redução dos custos de energia solar e eólica, têm impulsionado a competitividade da eletrólise frente aos métodos tradicionais (URSÚA, 2010; BAMPAGOU; PANOPoulos, 2024). Além disso, o desenvolvimento de eletrolisadores mais eficientes, como os baseados em membrana de troca de prótons (PEM) e óxido sólido (SOEC), tem desempenhado papel fundamental na viabilização econômica dessa rota de síntese (SHIVA

KUMAR; HIMABINDU, 2019). Diante desses fatores, este estudo buscou avaliar a viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde no Brasil, utilizando diferentes fontes renováveis para alimentar o processo eletrolítico, fornecendo uma análise dos custos, receitas potenciais e indicadores financeiros relacionados.

3. Metodologia

Este estudo possui um caráter teórico e bibliográfico, sendo desenvolvido a partir da revisão de literatura científica e técnica, além da coleta de dados em bases especializadas e relatórios setoriais. Para as análises numéricas, foram usadas planilhas eletrônicas para aplicar as equações e modelos econômicos.

Inicialmente, coletaram-se as características técnicas dos principais componentes do sistema de geração, incluindo módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas, centrais hidrelétricas e eletrolisadores, com base em especificações de fabricantes e literatura técnica. Em seguida, procedeu-se ao cálculo das eficiências energéticas dos sistemas e estimaram-se os investimentos (CAPEX) e custos operacionais (OPEX), usando dados de referência da IRENA (2023) e dos fabricantes.

A análise da viabilidade econômica utilizou indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH), seguindo a metodologia de KUCKSHINRICH et al. (2018), adaptada por NICITA et al. (2020). Foram consideradas receitas da venda de hidrogênio e oxigênio coproduzidos, além de parâmetros financeiros como taxa de desconto, inflação e depreciação do sistema de geração.

Os cálculos contemplaram estimativas para diferentes cenários energéticos: solar fotovoltaico, eólico e hidrelétrico.

4. Resultados e Discussão

A análise de viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde (H2V) considerou três cenários diferentes para o fornecimento energético para a eletrólise da água: energia solar fotovoltaica, energia eólica e geração hidrelétrica. Em todos os casos, foi utilizado um eletrolisador PEM modelo H2B2 EL 30, capaz de produzir 2,85 kg de H2 por hora, com um consumo específico de 57,9 kWh por kg (ALEIXO, 2023).

4.1. Sistema fotovoltaico

Para o sistema solar fotovoltaico, foram utilizados painéis Sunova SS-460-60-MDH, com potência unitária de 460 W e eficiência de 21,3%. A operação foi estimada em 7 horas diárias de insolação, resultando em um total de 359 módulos para suprir a demanda energética do eletrolisador. A eficiência energética global do sistema acoplado ao eletrolisador, foi de 41,8%, valor obtido pelo produto das eficiências do módulo fotovoltaico (73,5%) e do eletrolisador (56,9%). O investimento total (CAPEX) na configuração fotovoltaica foi avaliado em aproximadamente R\$ 1,54 milhão, considerando os painéis solares, inversores, estrutura de suporte e instalação (IRENA, 2023). A produção mensal de hidrogênio foi calculada em 598,5 kg, com um preço médio de venda de R\$ 35,46 por kg (FGV, 2023), gerando uma receita bruta mensal de R\$ 21.222,81. Apesar do potencial de geração de receita, o LCOH mostrou valores elevados, entre R\$ 45,00/kg e R\$ 60,00/kg, destacando a necessidade de incentivos fiscais e redução do custo de capital para tornar essa configuração economicamente competitiva.

4.2. Sistema eólico

No cenário eólico, foi considerada a turbina Enercon E-48, com potência nominal de 800 kW e área de varredura de 1.809,6 m², projetada para operar a 7 m/s. A potência média gerada foi de 180 kW, suficiente para atender à demanda do eletrolisador na maior parte do tempo de operação. O investimento estimado para instalação da turbina foi de R\$ 1,18 milhão, com custos adicionais de operação e manutenção superiores aos do sistema fotovoltaico (IRENA, 2023). A eficiência global do sistema eólico acoplado à eletrólise apresentou valores semelhantes aos do cenário solar, embora com menor viabilidade sazonal. O LCOH estimado variou entre R\$ 38,00/kg e R\$ 50,00/kg, oferecendo uma leve vantagem econômica em relação ao sistema fotovoltaico devido à maior disponibilidade do recurso eólico em regiões adequadas, o que diminui a intermitência do processo.

4.3. Sistema hidrelétrico

No cenário hidrelétrico, foi considerado uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH) de 850 kW, com uma eficiência de 93% e uma queda d'água de 70 m (HYDROPOWER SOLUTION, 2024). Esse arranjo destacou-se por apresentar a melhor performance técnica, operando quase de forma contínua e eliminando a sazonalidade observada em outros sistemas. Contudo, os custos de CAPEX foram muito mais elevados, variando de R\$ 9.822,00 a R\$ 12.000,00 por kW ins-

talado, totalizando um investimento de cerca de R\$ 8 milhões. Por outro lado, o LCOH caiu para uma faixa de R\$ 30,00 a R\$ 40,00 por kg, reforçando a competitividade da eletrólise quando combinada à fonte hídrica, especialmente em regiões com infraestrutura já existente.

4.4. Impacto de incentivos e subsídios na viabilidade econômica

A Tabela 1 resume os principais indicadores dos três cenários analisados. No caso da energia solar fotovoltaica, ao considerar apenas o H2 produzido, o VPL não é atrativo; porém, ao aproveitar o oxigênio gerado no processo, esse valor praticamente dobra, chegando a quase R\$ 6 milhões. Com uma TIR de 22,24%, superior ao WACC de 2,52%, o projeto demonstra potencial financeiro. Além disso, o LCOH foi a opção mais competitiva entre as alternativas. A comercialização do O2 se destaca como um diferencial que aumenta a rentabilidade do projeto. Para a energia eólica, os resultados também foram promissores, embora com algumas ressalvas, sendo economicamente viável apenas na estratégia de venda do oxigênio. A energia hidrelétrica acoplada à eletrólise mostrou-se desfavorável.

Tabela 1. Indicadores financeiros e viabilidade sem considerar incentivos e subsídios

Fonte	VPL H ₂ (R\$)	VPL H ₂ + O ₂ (R\$)	TIR (%)	LCOH (R\$/kgH ₂)	Viabilidade econômica
Solar FV	103.787,27	5.929.679,27	22,24	35,00	Viável
Eólica	-1.456.183,59	3.894.799,35	10,02	53,64	Viável com venda de O
CGH	-10.685.736,51	-5.334.753,58	-	174,09	Inviável

Incentivos governamentais e subsídios desempenham um papel importante na previsão econômica de projetos de produção de hidrogênio verde no Brasil. A Lei nº 14.948/24 marca um avanço importante ao criar créditos fiscais e incentivos para importação e compra de equipamentos (Rehidro), além de estabelecer o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2), que define padrões de sustentabilidade. Entre 2028 e 2031, o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC) deverá destinar, aproximadamente, R\$ 18 bilhões em créditos fiscais, reduzindo custos e aumentando a competitividade da tecnologia.

Além disso, programas do BNDES e do Fundo Clima oferecem linhas de crédito e redução de juros para projetos de H2V, impulsionando a inovação e a escalabilidade do setor. Esses incentivos impactam diretamente a viabilidade econômica, diminuindo CAPEX e OPEX e, consequentemente, o LCOH. Por exemplo, a suspensão de tributos pode reduzir os custos de aquisição em até 15%, enquanto créditos fiscais reduzem despesas operacionais. Os resultados mostraram que, com esses incentivos, o LCOH de projetos fotovoltaicos pode cair de R\$ 35,00/kg para R\$ 31,35/kg, tornando-os mais atraentes. Nos projetos eólicos, o impacto é similar, porém, nos hidrelétricos, mesmo com reduções tributárias, os custos permanecem elevados e o VPL é negativo, devido ao alto investimento inicial.

5. Conclusão

A análise mostrou que produzir hidrogênio verde por eletrólise da água utilizando diferentes fontes renováveis é tecnicamente viável, porém economicamente desafiadora nas condições atuais do mercado brasileiro atual. Entre os cenários considerados, sistemas hidrelétricos tiveram o menor LCOH (entre R\$ 30-40/kg), graças à alta eficiência e disponibilidade contínua do recurso hídrico. Contudo, os elevados custos de investimento limitam sua aplicação a projetos de infraestrutura já existentes. As rotas baseadas em energia solar e eólica destacam-se por sua modularidade e flexibilidade, embora apresentem LCOH superiores, devido à intermitência e ao maior custo de capital específico. Esses resultados mostram a necessidade de políticas públicas sólidas, incentivos financeiros e avanços tecnológicos para reduzir custos de eletrolisadores e fontes renováveis, tornando o H2V competitivo frente às rotas tradicionais, como a reforma a vapor do metano. Além da viabilidade econômica, o potencial ambiental da eletrólise renovável é notável, pois pode diminuir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e ajudar a alcançar metas globais de descarbonização. Assim, a produção de H2V representa uma oportunidade estratégica para o Brasil, dada sua abundância de recursos renováveis e a possibilidade de integração com setores industriais intensivos energia.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de análises dinâmicas que considerem variações na oferta de energia, estratégias de armazenamento, integração com sistemas híbridos e impactos regulatórios, visando consolidar bases técnicas e econômicas para a inserção do hidrogênio verde na matriz energética nacional.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa de pós-graduação em Engenharia de Energias Renováveis da PUC Curitiba.

Referências

- ALEIXO, H. M. F. Produção e uso de hidrogênio verde na descarbonização da indústria. 2023. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2023. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/153508/2/646983.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.
- BAMPAOU, M.; PANOPOULOS, K. D. An overview of hydrogen valleys: Current status, challenges and their role in increased renewable energy penetration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 207, 114923, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114923. Acesso em 10 out. 2024.
- Confederação Nacional da Indústria. Hidrogênio Sustentável: Perspectivas e Potencial para a Indústria Brasileira. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/08/CNIhidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- FERNANDES, G.; AZEVEDO, J. H. de; AYELLO, M.; GONÇALVES, F. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. Coluna Opinião, Fundação Getúlio Vargas, 2023. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/394ce383-de77-4732-b637-3125057f1ea7/content>. Acesso em: 6 nov. 2024.
- HYDROPOWER SOLUTION. Turbina Francis. 2024. Disponível em: <https://www.fstgenerator.com/pt/850kw-francis-turbine-product/>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- IRENA - International Renewable Energy Agency, Renewable Power Generation Costs in 2023, Abu Dhabi, 2024. Disponível em: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024_Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf. Acesso em: 6 nov. 2024.
- KUCKSHINRICHS, W.; KOJ, J.C. Levelized cost of energy from private and social perspectives: the case of improved alkaline water electrolysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 203, p. 619-632, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.232>
- NICITA, A.; MAGGIO, G.; ANDALORO, A. P. F.; SQUADRITO, G. Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 20, p. 11395-11408, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydne.2020.02.062.
- NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 597-611, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
- REN, J. et al. Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: a critical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 1, p. 289-311, 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.195.
- SANTOS, D. M. F.; SEQUEIRA, C. A. C.; FIGUEIREDO, J. L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Química Nova*, v. 36, n. 8, p. 1176-1193, 2013. Disponível em: DOI: 10.1590/S010040422013000800017.
- SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. Produção de hidrogênio por eletrólise de água PEM – Uma revisão. *Ciência dos materiais para tecnologias de energia*, v. 2, n. 3, p. 442-454, 2019. DOI: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2012. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2156750.

PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE ALUMÍNIO RESIDUAL: LATAS E EMBALAGENS LAMINADAS

Rhayssa Marra¹

Dhyogo Miléo Taher²

Henrique Pope Guerra³

André Bellin Mariano⁴

José Viriato Coelho Vargas⁵

Arion Zandoná Filho⁶

1. Resumo

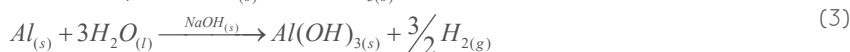
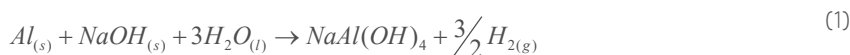
O crescimento da demanda global por energia, aliado à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, tem impulsionado a busca por rotas alternativas e sustentáveis de produção de hidrogênio. Entre as diferentes matérias-primas estudadas, resíduos sólidos contendo alumínio apresentam grande potencial devido à abundância do metal e à possibilidade de aproveitamento a partir de fluxos de descarte ainda pouco valorizados. Este trabalho investigou a viabilidade da produção de hidrogênio por meio da reação de hidrólise alcalina de dois tipos de resíduos: embalagens laminadas multicamadas contendo alumínio e latas de alumínio para bebidas. Os resultados confirmam a influência da composição dos resíduos na eficiência da hidrólise alcalina do alumínio. Enquanto as embalagens multicamadas possuem viabilidade desafiadora devido às camadas poliméricas presentes no material, as latas de alumínio se destacam como fontes promissoras de hidrogênio, conciliando elevada disponibilidade metálica com uma cinética estável de reação. Esses resultados reforçam o potencial de valorização de resíduos de alumínio como estratégia complementar para a economia circular e para o desenvolvimento de rotas alternativas de geração de hidrogênio verde.

2. Introdução

A busca por alternativas energéticas sustentáveis tem se intensificado frente à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos das mudanças climáticas. O crescimento populacional aliado à urbanização intensiva tem elevado de forma significativa a demanda global por energia, pressionando ainda mais uma matriz energética fortemente dependente de combustíveis fósseis (IEA, 2024; Damiri et al., 2024; Dawood et al., 2020). Esse cenário contribui diretamente para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), que estão entre os principais responsáveis pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas (IPCC, 2023). Diante disso, organismos internacionais, como a Organização das Nações Unidas (ONU) e a Agência Internacional de Energia (IEA), têm reforçado a necessidade de ampliar o uso de fontes renováveis e adotar tecnologias limpas que favoreçam a transição energética (United Nations, 2015; IEA, 2025).

Nesse contexto, o hidrogênio tem se consolidado como um vetor energético estratégico, com potencial de aplicação no fornecimento de eletricidade, no transporte, na indústria e no armazenamento de energia em sistemas de baixa emissão de carbono (Hren et al., 2023). Seu elevado poder calorífico (120 kJ/g), aliado à versatilidade e à possibilidade de produção a partir de rotas sustentáveis, reforça sua atratividade para a transição energética (Acar & Dincer, 2022; Singh et al., 2015). Contudo, estima-se que mais de 80% da produção mundial ainda derive de fontes fósseis, como gás natural e carvão, em processos sem captura de carbono, o que restringe sua efetiva contribuição para a mitigação das emissões (IEA, 2024). Diante disso, intensificam-se os esforços científicos e tecnológicos no desenvolvimento de rotas alternativas que possibilitem a produção do chamado “hidrogênio verde”, ou seja, obtido sem emissões de CO₂ e independente de insumos fósseis (Incer-Valverde et al., 2023).

Entre os processos estudados, destaca-se a reação de hidrólise de metais, como alumínio, magnésio e zinco, que possibilitam a liberação de hidrogênio a partir do contato com soluções aquosas em meio alcalino (Hurtubise et al., 2018). O alumínio, em particular, apresenta grande potencial devido a sua abundância, fácil manuseio e viabilidade de aproveitamento a partir de resíduos sólidos recicláveis (Zou et al., 2013; K p Aylikci et al., 2021). No entanto, sua elevada resistência   corrosão, atribuída à camada passivante de óxido, exige o uso de soluções fortemente alcalinas, como hidróxido de sódio (NaOH), para permitir a reação (Guerra et al., 2024). A reação química entre o alumínio e o hidróxido de sódio   descrita nas Equações 1, 2 e 3 (Hurtubise et al., 2018):



Nos últimos anos, diferentes resíduos contendo alumínio têm sido investigados como matérias-primas para a geração de hidrogênio, com destaque para aqueles de maior pureza, como lascas e folhas metálicas (Testa et al., 2023; Urbonavicius et al., 2023). Nesse sentido, as embalagens laminadas multicamadas representam uma alternativa particularmente desafiadora e ainda pouco estudada para esse fim. Apesar da elevada disponibilidade das embalagens e do baixo  ndice de reciclagem (OECD, 2022), a presença de polímeros e aditivos nessas embalagens dificulta a exposição do alumínio ao meio reacional, reduzindo a eficiência do processo. A presença de alumínio em sua composição aponta sua viabilidade de produção, mas de forma ainda limitada, evidenciando a necessidade de estudos adicionais que avaliem seu potencial frente a outros resíduos contendo alumínio (Vogt et al., 2021)

Paralelamente, outro resíduo amplamente disponível é o gerado a partir de latas de alumínio, cujo consumo global é significativo, especialmente no setor de bebidas. Apesar de apresentar taxas de reciclagem mais elevadas em comparação às embalagens laminadas, parte relevante desse resíduo ainda é descartada inadequadamente, reforçando a necessidade de soluções complementares de valorização (Abralatas, 2024). Além disso, devido   maior pureza metálica e menor presença de barreiras poliméricas, as latas apresentam potencial superior de geração de hidrogênio quando comparadas às embalagens multicamadas.

Assim, este trabalho propõe uma análise comparativa da produção de hidrogênio a partir de dois tipos de resíduos: embalagens laminadas e latas de alumínio, com folhas comerciais de alumínio. O objetivo é avaliar a eficiência relativa desses materiais no processo de hidrólise alcalina, investigando a contribuição de cada um para o desenvolvimento de rotas alternativas de geração de hidrogênio verde e para a valorização de resíduos dentro do conceito de economia circular.

3. Metodologia

• Caracterização

As latas de bebidas e as embalagens flexíveis contendo alumínio, classificadas conforme a NBR 13230 como polipropileno (PP), foram caracterizadas com o objetivo de estimar a fração metálica em sua composição. Para isso, as amostras foram submetidas à calcinação em mufla a 823,15 K por 3 h, promovendo a completa eliminação da matriz orgânica. O resíduo inorgânico resultante, correspondente ao óxido de alumínio (Al_2O_3), foi quantificado, possibilitando a determinação indireta do teor de alumínio presente nas amostras. A reação de oxidação do alumínio, responsável pela formação de Al_2O_3 durante o processo, é apresentada na Equação 4.



Cabe destacar que, no caso das latas de alumínio, a liga mais frequentemente utilizada em seu corpo, segundo George e Magidi-Chicuba (2023), é a AA3104, cuja composição apresenta cerca de 95,2% de alumínio.

• Experimento

As embalagens e as latas de alumínio foram previamente lavadas, secas e posteriormente trituradas em triturador elétrico (HPM Solutions), com o objetivo de reduzir o tamanho das partículas e, conseqüentemente, favorecer o desempenho das reações de geração de hidrogênio. A Figura 1 apresenta o equipamento empregado e os materiais após o processo de trituração.

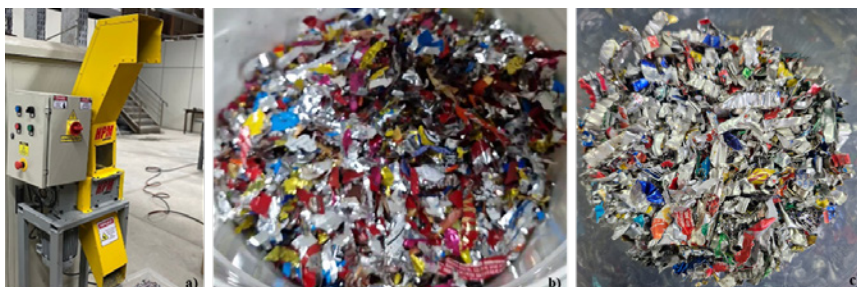


Figura 1. (a) Triturador HPM Solutions (b) Embalagem triturada (c) Latas de alumínio trituradas

A reação de geração de hidrogênio a partir do alumínio foi conduzida em um kitassato modificado, conectado a um coletor de gás por meio de uma mangueira de silicone acoplada a uma pipeta de 10 mL, conforme ilustrado na Figura 2. Para viabilizar a visualização do fluxo gasoso, adicionou-se solução de água e sabão à mangueira, permitindo a formação de bolhas na pipeta, as quais funcionaram como indicador visual do volume de gás liberado ao longo do tempo.

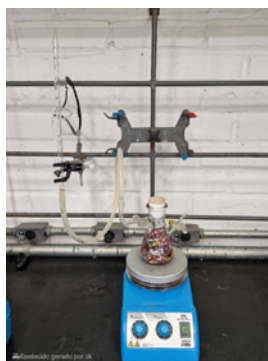


Figura 2. Set-up experimental

A massa das amostras das embalagens laminadas foi definida em função da capacidade do frasco, sendo estipulada em 4 g. De acordo com a Equação 3, uma reação estequiométrica exigiria $2,15 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ de solução de NaOH 1 mol.L⁻¹. Entretanto, devido ao baixo teor de alumínio das embalagens laminadas e ao alto volume do material, esse volume seria insuficiente para garantir contato completo com as superfícies reativas. Por esse motivo, utilizou-se um volume de $1,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ da mesma solução, assegurando a interação completa entre o reagente e o material.

Todas as reações foram conduzidas em triplicata, à temperatura ambiente, utilizando $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ de solução de NaOH 1 mol.L⁻¹. As amostras e suas quantidades estão detalhadas na Tabela 1. Devido ao grande volume das embalagens laminadas trituradas, as reações foram realizadas com agitação mecânica, a fim de otimizar o contato entre a solução alcalina e o material. A temperatura foi monitorada com termômetro digital infravermelho, e o tempo de reação, com cronômetro.

Tabela 1. Condições experimentais para a geração de Hidrogênio

Amostra	Massa de material (kg)	Solução (1 mol.L ⁻¹ NaOH)	Agitação
Embalagem Laminada Polipropileno	4×10^{-3}	$1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	Sim
Lata de alumínio (Corpo)	$6,1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	Sim

A fim de uma comparação consistente entre os dois materiais utilizados, a massa definida para o experimento foi estipulada com base na porcentagem de alumínio de sua composição, a qual foi estimada pelo processo de calcinação. A Tabela 2 exibe os valores médios obtidos da calcinação das amostras de embalagens laminadas com polipropileno (PP) e das latas metálicas, a quantidade de alumínio e a massa de material considerada para a reação.

As amostras de embalagens laminadas sofreram oxidação do metal durante a calcinação, conforme a Equação 4. Sendo assim, a massa de cinzas, obtida após o processo térmico, corresponde à formação do óxido de alumínio (Al₂O₃). O teor de alumínio em massa desse óxido é de 52,9%; portanto, para o cálculo da massa de alumínio das amostras de embalagens laminadas, multiplicou-se a porcentagem de cinzas, o teor de alumínio do Al₂O₃ e a massa do material. As latas de bebidas, por outro lado, não passaram pelo processo de oxidação. Portanto, para essas amostras, o teor de alumínio foi calculado a partir da razão entre a massa final (após a calcinação) e a massa inicial (antes do processo), multiplicada pela massa da amostra utilizada.

Tabela 2. Média dos resultados do processo de calcinação e massa utilizada na reação de produção de H₂

Amostra	Cinzas (%)	Alumínio contido na amostra (%)	Desvio Padrão (%)	Massa de alumínio utilizada para a reação (kg)	Massa da amostra utilizada (kg)
Embalagem Laminada PP	2,75	1,45	0,84	5,8 x 10 ⁻⁵	4,0 x 10 ⁻³
Lata de alumínio (Corpo)	–	95,98	1,69	5,8 x 10 ⁻⁵	6,1 x 10 ⁻⁵

5. Resultados e Discussão

O processo de produção de hidrogênio, apresentado nas Equações de 1 a 3, apresentou grande variação a partir da matriz utilizada. O compilado dos resultados é apresentado na Tabela 3.

Os experimentos realizados com as embalagens laminadas apresentaram volumes de produção de hidrogênio variando entre 6,8 e 9,3 mL e tempo de reação entre 101 e 131 min. Esse tempo pode ser normal comparado com resultados obtidos por Urbonavicius et al. (2023), em que as reações atingiram tempos entre 120 e 160 min. No entanto, a produção de gás foi baixa, com rendimento entre 7,9% e 10,7% em relação à estequiometria da reação. Isso reflete a dificuldade que existe em relação ao acesso da solução à a parte metálica do material. A predominância da matriz polimérica em embalagens laminadas limita a disponibilidade de alumínio reativo, funcionando como uma barreira e prejudicando a eficiência da produção de H₂.

Em contraste, as latas de alumínio, apesar de reagirem por mais tempo, se mostram como uma melhor matéria-prima em relação à quantidade de hidrogênio produzido (em torno de 40 mL). Portanto, além de apresentarem um maior rendimento em relação à estequiometria (46%), atingem velocidades maiores de reação. A maior produtividade está diretamente associada à composição das latas, que contêm cerca de 96% de alumínio.

Tabela 3. Resultados experimentais da produção de Hidrogênio

Amostra	Tempo total de reação (min)	Temperatura inicial (K)	Temperatura final (K)	Volume de H ₂ produzido (m ³)
1. Embalagem Laminada (PP)	131	296,25	298,95	9,3x 10 ⁻⁶
2. Embalagem Laminada (PP)	125	294,95	298,45	6,8x 10 ⁻⁶
3. Embalagem Laminada (PP)	101	293,55	297,85	7,8x 10 ⁻⁶
4. Lata de Alumínio	140	291,45	295,75	4,8 x 10 ⁻⁵
5. Lata de Alumínio	140	293,55	296,15	4,0 x 10 ⁻⁵
6. Lata de Alumínio	140	292,65	294,75	4,2 x 10 ⁻⁵

Cabe destacar que a reação entre alumínio e NaOH é exotérmica, liberando calor durante a quebra da molécula de água. Entretanto, nos ensaios realizados, as temperaturas iniciais e finais permaneceram próximas a 295 K em todas as amostras. Esse comportamento pode ser explicado pela pequena quantidade de material reativo utilizado, fator que limita a observação de aumentos significativos de temperatura. Assim, as diferenças nos volumes de hidrogênio obtidos estão diretamente relacionadas à composição das amostras, e não a variações térmicas.

A Figura 3 apresenta a variação da velocidade de produção do H₂ (mL.min⁻¹) em função do tempo de reação para as amostras estudadas. Observa-se que para a lata de alumínio a reação apresenta uma rápida etapa de rápida ascensão da velocidade atingindo a velocidade 0,3 mL.min⁻¹ logo nos primeiros 20 min, a qual continua subindo até um

máximo de $0,54 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ com 80 min de reação. Após esse período, a velocidade começa a reduzir gradualmente até o encerramento com cerca de 140 min. Esse comportamento evidencia a elevada disponibilidade de alumínio reativo e uma cinética bem definida.

As embalagens laminadas, por outro lado, exibem velocidades muito menores e com perfil cinético irregular, caracterizado por oscilações durante a reação. Esse comportamento pode ser relacionado à heterogeneidade do material, no qual as camadas poliméricas limitam o contato reacional efetivo. Comparativamente, a taxa máxima de geração de H_2 para as latas foi cerca de 4 a 5 vezes maior que a obtida para as embalagens laminadas, em concordância com os resultados de volume total apresentados na Tabela 3. Esses achados confirmam que, além de fornecerem maior quantidade de alumínio, as latas também apresentam cinética mais estável e eficiente, o que as torna fontes superiores para a produção de hidrogênio em processos de hidrólise alcalina.

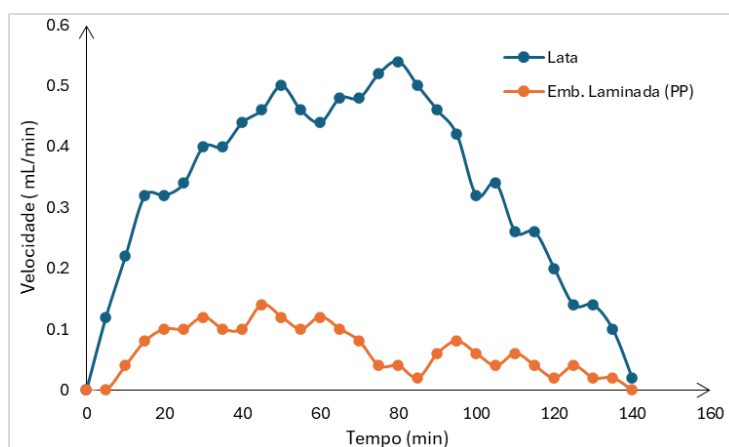


Figura 3 - Gráfico comparativo de velocidade de reação

Conclusão

O presente estudo demonstrou a viabilidade da produção de hidrogênio a partir da reação de resíduos contendo alumínio em meio alcalino, destacando as diferenças de desempenho entre embalagens laminadas multicamadas e latas de alumínio. As embalagens apresentaram rendimentos modestos, limitados pela barreira polimérica que restringe a exposição do alumínio ao reagente. Em contrapartida, as latas mostraram elevada eficiência, produzindo volumes expressivos de H_2 e apresentando cinética de reação estável, em consonância com sua composição metálica predominante (liga AA3104).

Esses resultados evidenciam que, embora as latas de alumínio representem uma alternativa mais promissora para geração de hidrogênio em processos de hidrólise alcalina, as embalagens laminadas também podem ser exploradas como fonte complementar. Além de contribuir para o aproveitamento de resíduos abundantes, a rota estudada reforça o papel do alumínio reciclado como vetor estratégico na produção descentralizada de hidrogênio verde, integrando conceitos de sustentabilidade, economia circular e transição energética.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação Araucária e à UFPR pelo apoio e o financiamento pela realização desse projeto.

Referências

1. Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio para Bebidas (Abralatas); Recicla Latas, 2024. Relatório Setorial ESG — O Futuro da Lata de Alumínio 2024. Abralatas, São Paulo, Brasil.
2. Acar, C., Dincer, I. 2022 “Selection criteria and ranking for sustainable hydrogen production options”. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 47 pp. 40118-40137.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13230: embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis — identificação e simbologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
4. Damiri, A.P., Stamatakis, E., Bellas, S., Zoulias, M., Mitkidis, G., Anastasiadis, A.G., Karellas, S., Tzamalís, G., Stubos, A. and Tsoutsos, T., 2024. “A review of alternative processes for green hydrogen production focused on generating hydrogen from biomass”. *Hydrogen*, Vol. 5, pp. 163–184. <https://doi.org/10.3390/hydrogen5020011>.
5. Dawood, F., Anda, M., Shafiullah, G.M., 2020. “Hydrogen production for energy: An overview”. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, pp.2847-3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
6. George, S., Magidi-Chicuba, L. Intermetallic and dispersoid structures in AA3104 aluminium alloy during two-step homogenisation. *Sci Rep* 14 2958 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51890-2>
7. Guerra, H.P., Vargas, J.V.C., Raimundo, R.C., Taher, D.M., Martins, L.S., Och, S.H., Pitz, D.B., Mariano, A.B., Cardozo-Filho, L., Venter, G.S., Ordonez, J.C., 2024. “Green H₂ electricity derived from reacting water and aluminum catalyzed by sodium hydroxide”. *Topics in Catalysis*.
8. Hren R., Vujanovic A., Van Fan Y., Klemes K., Krajnc D., Cucek L. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 173 pp.113113. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113113>
9. Hurtubise, D. W.; Klosterman, D. A.; Morgan, A. B., 2018. “Development and demonstration of a deployable apparatus for generating hydrogen from the hydrolysis of aluminum via sodium hydroxide”. *International journal of hydrogen energy*, Vol. 43, No. 14, pp. 6777-6788.
10. Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., Morousuk, T, 2023. ““Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity”. *Energy Conversion and Management*. Vol. 291, pp. 117294.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
12. International Energy Agency (IEA), 2024. *Global Hydrogen Review 2024*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Accessed 12 April 2025.
13. International Energy Agency (IEA), 2024. *World Energy Outlook 2024*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Accessed 12 April 2025.
14. International Energy Agency (IEA), 2025. “CO₂ Emissions – Global Energy Review 2025.” International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>. Accessed 12 April 2025
15. K p Aylikci, N., Mert, S.O., Aylikci, V., Bahceci, E., Depci, T. and Oru ,  ., 2021. “Microhydrogen production with water splitting from daily used waste aluminum”. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, pp. 28912–28924.
16. OECD, 2022. *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>. Accessed 13 April 2025.
17. Singh, S., Jain, S., Venkateswaran, P.S., Tiwari, A.K., Nouni, M.R., Pandey, J.K. and Goel, S., 2015. “Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 623–633. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.040>.
18. Testa, V., Gerardi, M., Zannini, L., Romagnoli M., Santangelo, P., 2024. Hydrogen production from aluminum reaction with NaOH/H₂O solution: Experiments and insight into reaction kinetics. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 83 pp. 589–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.152>
19. Urbonavicius M., Varnagiris S., Mezulis M., Lesnienoks P., Knoks A., Richter C., Milcius D., Meirbekova R., Gunnarsson G., Kleperis, J. Hydrogen from industrial aluminium scraps: Hydrolysis under various conditions, modelling of pH behaviour and analysis of reaction by-product. Vol. 50, vol. 431- 446. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.065>
20. United Nations Climate Change, 2015. “Paris Agreement”. <https://unfccc.int/process/conferences/pastconferences/paris-climate-change-conference-november-2015/paris-agreement>
21. United Nations

TRANSESTERIFICAÇÃO *IN SITU* DA MICROALGA *Monoraphidium sp.* NA PRESENÇA DO CATALISADOR HETEROGÊNEO LA-SBA-15 PH

Magno Régis de Oliveira¹

João Paulo da Costa Evangelista²

Aruzza Mabel de Moraes Araújo³

Amanda Duarte Gondim⁴

1. Resumo

Com o objetivo de desenvolver uma rota mais econômica e sustentável para a produção de biodiesel, este estudo investigou a reação de transesterificação *in situ* da microalga *Monoraphidium sp.* utilizando um catalisador heterogêneo. O catalisador foi sintetizado pelo método hidrotérmico e impregnado com lantânio na razão Si/La = 25, com ajuste do pH do gel de síntese para 6, empregando-se $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (cloreto de lantânio heptahidratado) como fonte de La. O material obtido, denominado La-SBA-15 pH, foi caracterizado por difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TGA/DTG), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX) e acidez superficial por adsorção e dessorção de *n*-butilamina.

A reação de transesterificação *in situ* foi conduzida a 60 °C por 30 e 60 min em forno de micro-ondas, seguida de sonicação por 60, 90 e 120 min após o tratamento em micro-ondas. As sínteses dos materiais catalíticos SBA-15 e La-SBA-15 pH foram bem-sucedidas, sendo confirmada a formação de uma estrutura hexagonal bem ordenada após a incorporação de lantânio. O catalisador La-SBA-15 pH apresentou incorporação de 6,53% de La em sua estrutura, além de densidade de sítios ácidos de 2,126 mmol/g.

Os melhores rendimentos de transesterificação foram de 82,8% e 80,5% em biodiesel, correspondendo às conversões em ésteres etílicos de 56,7% e 45,1%. Esses valores foram obtidos sob as mesmas condições reacionais (60 °C, 60 min em micro-ondas e 120 min em ultrassom) tanto para a reação padrão (catalisador HCl 37%) quanto para a reação em estudo (catalisador La-SBA-15 pH), respectivamente.

2. Introdução

Apesar do avanço das fontes alternativas para geração de energia estacionária (eólica, solar, das marés, entre outras), o consumo de combustíveis fósseis, especialmente no setor de transportes, continua a crescer em muitos países [1]. Nesse contexto, intensifica-se a necessidade de desenvolver combustíveis alternativos capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Diversas tecnologias energéticas vêm sendo estudadas para promover o desenvolvimento sustentável do setor, e uma das propostas é a produção de biodiesel por meio de rotas promissoras que eliminam etapas onerosas do processo convencional, reduzindo o consumo de reagentes químicos e a geração de resíduos.

Uma alternativa é o uso da biomassa de microalgas como fonte lipídica, visto que estas não competem diretamente com cadeias produtivas de outros setores da indústria. Além disso, podem ser cultivadas em terras não aráveis, apresentando elevada taxa de crescimento e alta produtividade lipídica, o que as torna uma fonte atrativa de biocombustível [2–4]. Diversas espécies de microalgas já foram identificadas com alto teor de lipídios e excelentes resultados para a produção de biodiesel, como *Coelastella sp.* [5], *Chlorella vulgaris* [6], *Nannochloropsis gaditana* [7] e *Monoraphidium sp.* [8,9].

Para a obtenção de biodiesel com propriedades físico-químicas compatíveis com as especificações atuais, é desejável que o perfil de lipídios neutros da microalga seja rico em ácido palmítico (C16:0), ácido esteárico (C18:0) e ácido oleico (C18:1), como ocorre em *Monoraphidium* sp.. Os ácidos graxos saturados (C16:0 e C18:0) contribuem para o aumento do índice de cetano (CN) do biodiesel, melhorando o desempenho dos motores e suas propriedades de combustão. Já os ácidos graxos monoinsaturados (C18:1) conferem maior estabilidade oxidativa e boas propriedades de fluxo a frio [9].

Diversos métodos de conversão de lipídios em biodiesel têm sido explorados, como esterificação, transesterificação convencional e hidroesterificação. Entre eles, a transesterificação *in situ* se destaca pela capacidade de reduzir custos operacionais, uma vez que promove a ruptura da parede celular das microalgas e a conversão direta de seus lipídios em biodiesel, em uma única etapa, mediante o contato direto da biomassa com o solvente e um catalisador específico [10]. A utilização de biomassa seca é preferível, pois a presença de água compete com o catalisador ácido pelos prótons disponíveis, desativando-o [11]. No caso de catalisadores alcalinos, a água favorece a formação de sabões [12]. Além disso, pode ocorrer a hidrólise dos ésteres graxos do biodiesel, liberando metanol e ácidos graxos livres [13]. Assim, a otimização de parâmetros como teor de umidade, tipo e concentração do álcool, temperatura da reação e natureza e quantidade do catalisador é fundamental para aumentar o rendimento da transesterificação heterogênea [12,14–16].

Os catalisadores heterogêneos apresentam vantagens técnicas e ambientais relevantes, como a possibilidade de reutilização em sucessivos ciclos reacionais [17], facilidade de separação do meio, maior pureza dos produtos e menor geração de resíduos, eliminando etapas adicionais de lavagem. Por essas razões, têm sido amplamente considerados sistemas promissores nos últimos anos [16,18].

A peneira molecular SBA-15, empregada neste estudo como suporte catalítico, apresenta canais mesoporosos bidimensionais e uniformes, área superficial de 600 a 1000 m²/g, volume de poros entre 0,6 e 1,3 cm³/g e diâmetro de poros de 50 a 100 Å. Essas propriedades podem ser ajustadas pelas condições de síntese, incluindo a incorporação de metais de terras raras, como o lantânio (La). Esse elemento, pertencente ao grupo das terras raras, pode ser obtido a partir da bastnaesita e da monazita e é considerado relativamente barato, não tóxico e ambientalmente favorável [19,20].

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo desenvolver uma nova rota para a produção sustentável de biodiesel, empregando a microalga *Monoraphidium* sp. como fonte de biomassa, o catalisador heterogêneo La-SBA-15 com ajuste de pH e a técnica de transesterificação *in situ*, visando à redução da produção de efluentes.

3. Metodologia

3.1 Síntese da peneira molecular SBA-15

O material SBA-15 foi sintetizado pelo método hidrotérmico, utilizando o copolímero tribloco P123 (EO₂₀PO₆₇EO₂₀), ácido clorídrico (HCl 37%), água destilada e tetraetilortossilicato (TEOS) como fonte de sílica, na proporção molar 1,000 TEOS : 0,015 P123 : 2,75 HCl : 166,0 H₂O [21]. O processo iniciou-se com a dissolução completa do copolímero em HCl diluído por 2 h, a 35–40 °C. Em seguida, adicionou-se o TEOS, mantendo a agitação constante na mesma temperatura por 24 h. A mistura gelatinosa resultante foi transferida para autoclave de Teflon e submetida a 100 °C por 48 h. Após esse período, o material foi resfriado até temperatura ambiente, filtrado a vácuo e lavado com solução etanol/HCl a 2% até atingir pH 7. Finalmente, o sólido foi calcinado a 550 °C por 6 h para remoção do P123.

3.2 Síntese do catalisador La-SBA-15 (pH)

A síntese do catalisador La-SBA-15 pH iniciou-se com a dissolução completa do copolímero P123 em HCl diluído em água destilada, sob agitação vigorosa e temperatura de 40 °C, por 2 h. Em seguida, foram adicionados o TEOS e o cloreto de lantânio heptahidratado (LaCl₃·7H₂O), previamente dissolvido em água, mantendo-se a agitação na mesma temperatura por 24 h [22]. Posteriormente, o gel foi transferido para recipiente de Teflon, mantido a 100 °C por 24 h. Após o resfriamento até temperatura ambiente, ajustou-se o pH para 6 com n-butilamina anidra e realizou-se novo aquecimento em frasco lacrado, a 100 °C, por mais 24 h. O material obtido foi resfriado, filtrado a vácuo e lavado com 50 mL de etanol. A secagem ocorreu à temperatura ambiente por 48 h. A calcinação diferiu do procedimento padrão para SBA-15, pois visou remover tanto o direcionador quanto a base utilizada. Inicialmente, o material foi submetido a atmosfera de N₂ (100 mL/min) e aquecido a 10 °C/min até 550 °C por 2 h. Em seguida, a atmosfera foi substituída por ar por mais 2 h, obtendo-se o catalisador heterogêneo La-SBA-15 pH.

3.3 Caracterização dos materiais catalíticos

A caracterização dos materiais SBA-15 e La-SBA-15 pH teve como objetivo identificar suas propriedades físico-químicas, que serviram de base para a análise de sua atividade catalítica. As técnicas utilizadas foram: difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TGA/DTG), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX) e determinação da acidez por dessorção de n-butilamina.

3.4 Obtenção e caracterização da biomassa de microalga

A biomassa da espécie *Monoraphidium* sp. (Mono-0117) foi fornecida, em estado úmido, pelo Centro Tecnológico de Aquicultura (CTA), na Fazenda Samisa, município de Extremoz, Região Metropolitana de Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. A biomassa foi liofilizada por 48 h antes do uso.

3.4.1 Teor de lipídios (%)

O teor total de lipídios da biomassa seca foi determinado conforme Yu et al. [23]. Uma amostra de 1 g foi moída em pó fino e misturada com 3 mL de clorofórmio:metanol (2:1). A solução foi agitada por 20 min a 100 rpm, em temperatura ambiente, e centrifugada a 2000 rpm por 10 min. O sedimento foi reextraído duas vezes com 3 mL da mesma solução. O extrato coletado foi evaporado a 40 °C, seco a 70 °C por 2 h e pesado após resfriamento.

O teor de lipídios foi calculado pela Equação 1:

$$\text{Teor de lipídios (\%)} = W_L/W_A \times 100\% \quad (1)$$

onde W_L (g) é o peso dos lipídios extraídos e W_A (g) é a biomassa seca da microalga.

3.4.2 Caracterização da biomassa por TGA/DTG

A biomassa foi caracterizada em equipamento Shimadzu DTG-60, de 30 a 900 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob fluxo de N_2 (50 mL/min). O teor de umidade foi determinado a partir da perda de massa em análise TG/DTG, utilizando equipamento TA Instruments, modelo SDT Q-600 [24].

3.5 Reação de transesterificação *in situ*

A reação de transesterificação *in situ* da biomassa foi conduzida com o catalisador heterogêneo La-SBA-15 pH (objeto de estudo) e, para comparação, com HCl 37% (reação de referência). Aproximadamente 0,900 g de biomassa úmida e 0,100 g do catalisador heterogêneo foram adicionados a três tubos digestores de micro-ondas, juntamente com 4 mL de etanol e 6 mL de hexano, que foram então lacrados. Para a reação padrão, 1 g de microalga úmida foi misturado a 4 mL de etanol, 6 mL de hexano e 0,5 mL de HCl (37%) em tubo digestor.

As reações foram realizadas em micro-ondas a 270 W, 60 °C, por 30 e 60 min. Após o resfriamento, os tubos foram submetidos a ultrassom por 60, 90 e 120 min. Em seguida, adicionaram-se 3 mL de água deionizada para interromper a reação e 3 mL de hexano para promover a separação de fases, resultando em fração inferior (biomassa e subprodutos) e fração superior (ésteres etílicos e solvente). A fase superior foi recolhida em novos tubos, repetindo-se o processo três vezes para maximizar a recuperação do produto. O solvente foi removido em estufa a 60 °C por 15 h, e os ésteres etílicos obtidos foram analisados por termogravimetria [25].

4. Resultados e Discussão

4.1 Difração de raios-X (DRX)

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam os difratogramas de raios X em baixo ângulo (0,5 a 5°) dos materiais SBA-15, La-SBA-15 pH (não calcinado) e La-SBA-15 pH (calcinado). O objetivo da análise foi verificar a formação da estrutura hexagonal mesoporosa, caracterizada pela presença de planos cristalográficos com índices de Miller (100), (110) e (200). A presença exclusiva do pico de difração correspondente ao índice (100) indica uma formação adequada da estrutura, embora com baixa ordenação. Já a detecção dos picos adicionais (110) e (200) confirma uma elevada ordenação, típica da simetria bidimensional P6mm, utilizada como molde na síntese de materiais do tipo SBA-15.

Os resultados obtidos para os catalisadores La-SBA-15 pH (não calcinado) e La-SBA-15 pH (calcinado) demonstram que a estrutura mesoporosa não sofreu deformações, mesmo após o processo de calcinação para remoção do direcionador P123. O material SBA-15 puro foi empregado como padrão comparativo para a avaliação da formação estrutural em relação ao material La-SBA-15 pH, sintetizado na presença de $LaCl_3 \cdot 7H_2O$ [21,22,26].

Os parâmetros cristalográficos referentes às distâncias interplanares (d_{100}) e à constante de rede hexagonal (a_0), que representa a distância entre centros de poros adjacentes, estão apresentados na Tabela 1.

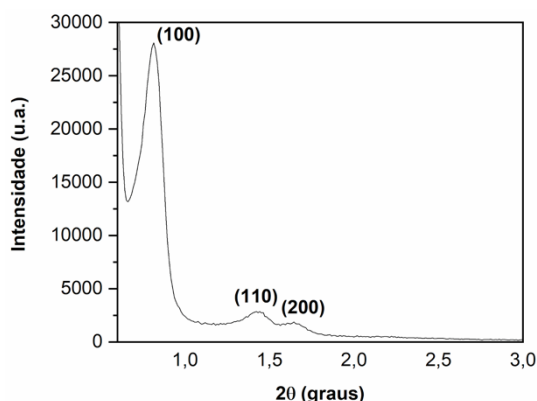


Figura 01. DRX do material mesoporoso SBA-15 calcinado.

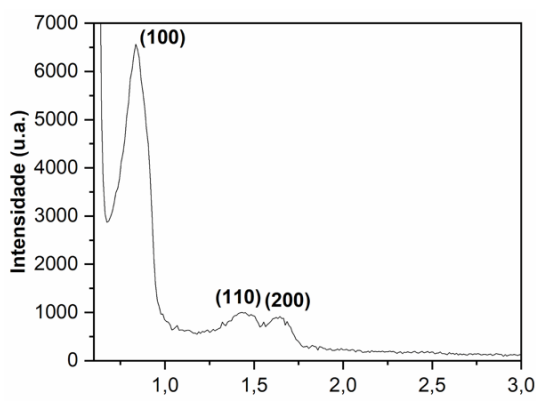


Figura 02. DRX do material mesoporoso La-SBA-15 pH não-calcinado.

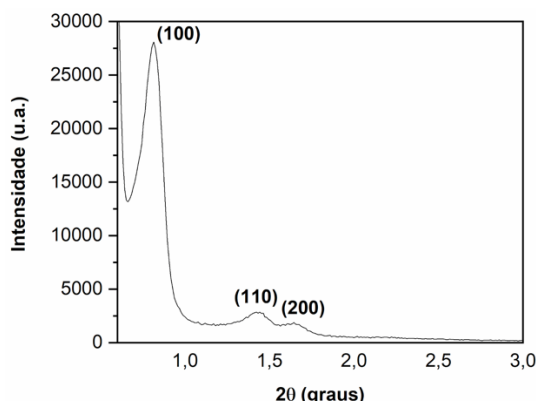


Figura 03. DRX do material mesoporoso La-SBA-15 calcinado.

Tabela 01. Dados de parâmetros cristalográficos, fornecidos por difração de raios X de SBA-15, La-SBA-15 pH (não calcinado) e La-SBA-15 pH (calcinado).

Materiais	d_{100} (nm)	a_0 (nm)
SBA-15	5,42	6,26
La-SBA-15 pH (não calcinada)	5,3	6,12
La-SBA-15 pH (calcinada)	5,42	6,26

A Tabela 1 evidencia uma diminuição no parâmetro (a_0) para o material La-SBA-15 pH (não calcinado), seguida de um aumento posterior até valores equivalentes ao material mesoporoso padrão (SBA-15). Sugere-se, de forma especulativa, que a redução inicial esteja associada à presença de ions de cloreto de lantânio heptahidratado ($\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), em conjunto com o copolímero tribloco P123, distribuídos sobre a superfície ou no interior dos poros do catalisador. O subsequente aumento do parâmetro (a_0) seria, então, decorrente da remoção dessas espécies após o processo de calcinação.

4.2 Análise Termogravimétrica (TGA/DTG)

As Figuras 4 e 5 apresentam os eventos de perda de massa para os materiais catalíticos SBA-15 (não calcinado) e La-SBA-15 pH (não calcinado). A Figura 4 evidencia que as curvas TGA/DTG do material SBA-15 (não calcinado) exibem duas etapas de perda de massa. O primeiro evento térmico, na faixa de 30 a 150 °C, corresponde à liberação de moléculas de H_2O presentes na estrutura da sílica mesoporosa. O segundo evento, na faixa de 150 a 550 °C, está associado à re-

moção do material orgânico (copolímero P123), bem como de moléculas de H_2O remanescentes da condensação dos grupos silanóis no material mesoporoso [24,27-29].

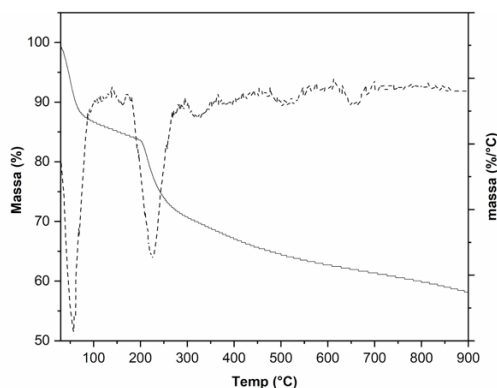


Figura 04. Curvas de TGA/DTG do material SBA-15 não-calcinado.

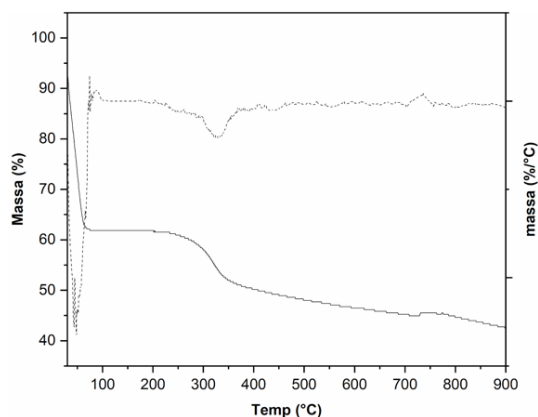


Figura 05. Curvas de TGA/DTG do material La-SBA-15 pH não-calcinado.

Em relação ao material catalítico La-SBA-15 pH (não calcinado) (Figura 5), também foram observados dois eventos térmicos: o primeiro, entre 30 e 90 °C, e o segundo, entre 200 e 500 °C. Essas perdas de massa ocorrem pelas mesmas razões descritas anteriormente para o material mesoporoso SBA-15 (não calcinado). Em ambos os materiais — SBA-15 (não calcinado) e La-SBA-15 pH (não calcinado) —, a faixa de temperatura considerada adequada para a remoção completa do direcionador e/ou de impurezas foi de 500 a 550 °C, visto que, nessa condição, não foram registradas perdas de massa significativas. Assim, o material pode ser considerado termicamente estável.

4.3 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de infravermelho dos catalisadores La-SBA-15 pH (não calcinado) e La-SBA-15 pH (calcinado) são apresentados nas Figuras 6 e 7. Esses espectros exibem as seguintes bandas: 3386, 2978, 1640, 1458, 1379, 1048, 955, 791 e 439 cm^{-1} para o material não calcinado; e 3398, 1636, 1052, 968, 800 e 438 cm^{-1} para o material calcinado. Tais bandas correspondem a estiramentos e deformações de grupos funcionais inorgânicos e orgânicos, originados de moléculas do copolímero tribloco P123.

As bandas largas, centradas em 3386 e 3398 cm^{-1} , representam os estiramentos dos grupos hidroxila (O-H) associados aos silanóis (Si-OH) da estrutura dos materiais catalíticos, evidenciando a presença de água [26,30]. As bandas em 2978, 1458 e 1379 cm^{-1} correspondem às deformações axiais de C-H em CH_2 e às deformações das ligações C-O-C, relacionadas ao copolímero P123. Essas bandas desaparecem após a calcinação, indicando a remoção efetiva do copolímero. A diferença observada nas bandas de 1640 cm^{-1} (La-SBA-15 pH não calcinado) e 1636 cm^{-1} (La-SBA-15 pH calcinado) reflete a distorção das ligações O-H na molécula de H_2O , decorrente de seu desprendimento da superfície do catalisador durante a calcinação [22].

As bandas observadas antes e após a calcinação, localizadas em 1048/1052, 955/968, 791/800 e 439/438 cm^{-1} , confirmam a presença de lantânio na estrutura hexagonal do SBA-15. As bandas de 1048/1052 cm^{-1} correspondem ao estiramento assimétrico T-O-T (T = Si, La); as bandas em 791/800 cm^{-1} são típicas do estiramento simétrico T-O-T (T = Si, La); e as bandas de 955/968 e 439/438 cm^{-1} referem-se, respectivamente, aos alongamentos das ligações Si-OH e às modificações nas ligações Si/La-O-Si/La, características de silicatos [24].

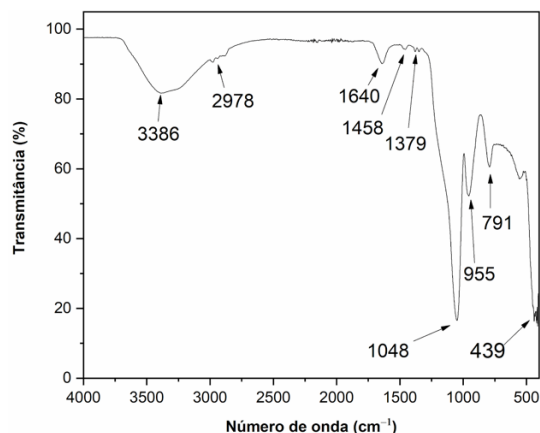


Figura 06. Espectro de FTIR do material La-SBA-15 pH não-calcinado.

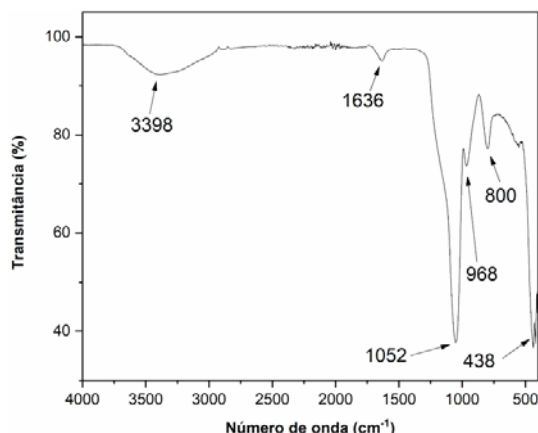


Figura 07. Espectro de FTIR do material La-SBA-15 pH calcinado.

4.4 Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRX)

O teor de lantânio incorporado no material La-SBA-15 pH foi determinado por fluorescência de raios X (FRX), conforme apresentado na Tabela 2. Observa-se que, para a razão molar utilizada, a incorporação de lantânio não atingiu os valores relatados por outros autores [22], que alcançaram 56,28% para Si/La = 25. Entretanto, em comparação com sínteses similares de La-SBA-15 sem ajuste de pH até 6 [31], o resultado obtido é significativamente superior.

Durante as 24 h de tratamento hidrotérmico em pH = 6, ocorre a formação do complexo $[La(OH)_n]^{3-n}$, cuja solubilidade é inferior à do íon isolado devido ao aumento da concentração de íons hidróxido (OH^-) no meio. Esse fenômeno provoca a precipitação do complexo na região do gel, responsável pela formação da estrutura do catalisador, facilitando, assim, a incorporação do lantânio na estrutura mesoporosa da SBA-15.

Tabela 2. Teor de Lantânio na amostra de La-SBA-15 pH.

Amostra	Razão Si/La	Incorporação de La (%) na forma de La_2O_3
La-SBA-15 pH	25	6,53

4.5 Determinação da acidez (dessorção de n-butilamina)

A acidez do catalisador La-SBA-15 pH, com razão molar Si/La = 25, foi determinada por meio de análise termogravimétrica após adsorção da base n-butilamina. A Figura 8 mostra que a dessorção das moléculas de n-butilamina no catalisador ocorreu em três eventos térmicos.

A primeira perda de massa, entre 35 e 350 °C, corresponde ao desprendimento de n-butilamina fisissorvida e adsorvida em sítios ácidos fracos (sítios de Lewis). A segunda perda, na faixa de 350 a 550 °C, está associada ao desprendimento de n-butilamina fisissorvida e adsorvida em sítios ácidos médios (sítios de Lewis + sítios de Brønsted). A terceira perda, entre 550 e 850 °C, refere-se à dessorção de n-butilamina adsorvida em sítios ácidos fortes (sítios de Brønsted).

A diferença nos intervalos de temperatura para os sítios ácidos fracos, médios e fortes reflete a força das interações entre os sítios ácidos e a base: quanto mais intensa a ligação entre a base e o sítio, maior será a energia necessária para romper essa ligação [31].

A Tabela 3 apresenta o número de sítios ácidos fracos, médios e fortes do catalisador La-SBA-15 pH. Observa-se que a formação de sítios ácidos médios e fortes é insuficiente para promover a catálise eficiente da reação de transesterificação em tempos menores. Esse comportamento é consequência do baixo percentual de incorporação de lantânio (6,53%) na estrutura da sílica mesoporosa SBA-15.

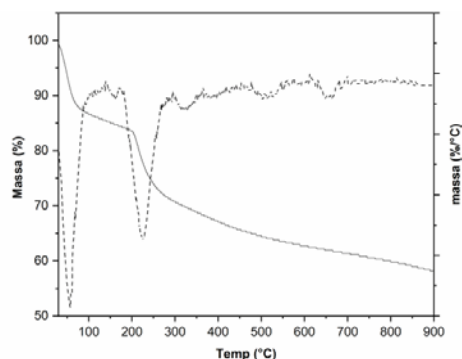


Figura 08. Curvas de TGA/DTG do material La-SBA-15 pH adsorvido com n-butilamina.

Tabela 3. Dados de sítios ácidos fracos, médios e fortes do catalisador sintetizado La-SBA-15 pH.

Amostra	Sítios ácidos fracos (mmol/g)	Sítios ácidos médios (mmol/g)	Sítios ácidos fortes (mmol/g)	Acidez total (mmol/g)
La-SBA-15 pH	1,296	0,27	0,56	2,126

4.6 Caracterização da biomassa

4.6.1 Teor de lipídios (%)

A microalga *Monoraphidium* sp. apresentou, a partir das extrações realizadas em triplicata, um teor lipídico de 8,1% em suas células. Esse valor ficou abaixo do esperado em comparação com o percentual estimado por TGA/DTG, evidenciando uma significativa ineficiência do método de extração convencional.

4.6.2 Teor de umidade por TGA/DTG

O teor de umidade da microalga foi determinado a partir da análise de decomposição por TGA/DTG. A Figura 9 apresenta o gráfico correspondente, evidenciando uma perda inicial de massa de 71,8% na faixa de 30 a 151 °C. Essa perda está diretamente associada à presença de água na amostra, caracterizando um elevado teor de umidade [24].

4.6.3 Caracterização da biomassa de microalga por TGA/DTG

A análise TGA/DTG da microalga revelou três eventos de perda de massa (Figura 9). O primeiro, na faixa de 190 a 350 °C, está relacionado à volatilização de carboidratos e proteínas. O segundo evento, entre 350 e 520 °C, corresponde à decomposição da fração lipídica, especialmente dos triacilglicerídeos. A caracterização da biomassa por TGA/DTG constitui uma metodologia rápida para estimar a porcentagem lipídica média da microalga, permitindo avaliar a eficiência do processo de extração. Considerando a volatilização dos lipídios na faixa de 350 a 520 °C, foi observada uma perda de massa de 14,89%, superior ao teor lipídico extraído (8,1%), indicando uma certa ineficiência do processo de extração. O terceiro evento, entre 630 e 750 °C, é atribuído à carbonização de resíduos de elevada massa molar, como o pigmento clorofila, inerentes à composição química das microalgas, ou à volatilização dos produtos de decomposição dos triacilglicerídeos [32].

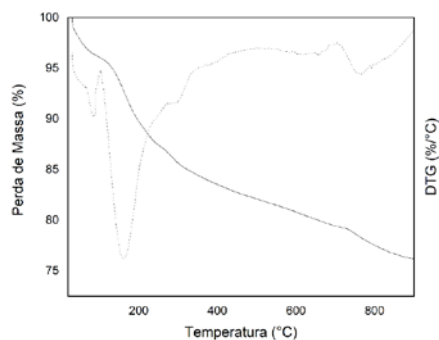


Figura 09. Curvas de TGA/DTG da microalga *monoraphidium*-sp.

4.6 Conversão por transesterificação *in situ*

As reações de transesterificação *in situ* foram realizadas em forno de micro-ondas, seguidas de tratamento ultrassônico. Os tempos empregados foram de 30 e 60 min para o micro-ondas (M30 e M60) e de 60, 90 e 120 min para o ultrassom (U60, U90 e U120). As reações foram conduzidas na presença do catalisador heterogêneo La-SBA-15 pH (Figuras 10 e 11) e do catalisador homogêneo HCl (Figuras 12 e 13), e as taxas de conversão foram determinadas por TGA/DTG.

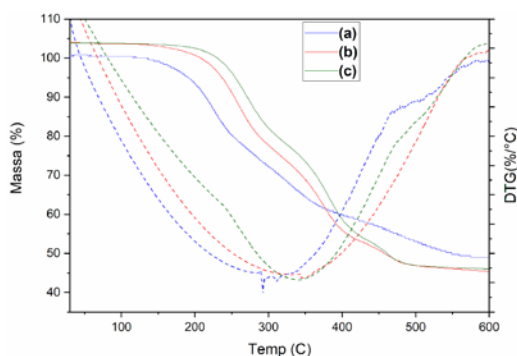


Figura 10. Curvas de TGA/DTG da transesterificação *in situ* utilizando o catalisador La-SBA-15 pH sob diferentes condições reacionais: (a) M30 U60, (b) M30 U90 e (c) M30 U120.

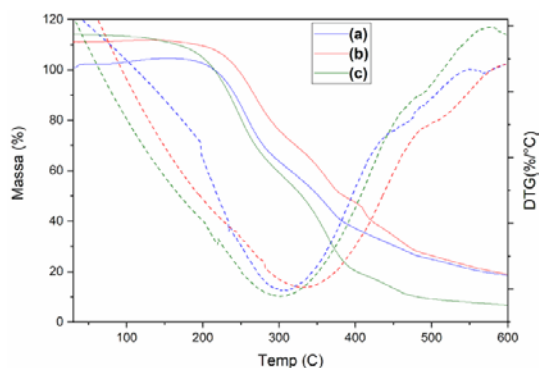


Figura 11. Curvas de TGA/DTG da transesterificação *in situ* utilizando o catalisador La-SBA-15 pH sob diferentes condições reacionais: (a) M60 U60, (b) M60 U90 e (c) M60 U120.

A conversão percentual dos lipídios em monoésteres etílicos (MEE) foi analisada por TGA/DTG, com base na evidência de que a maior parte dos lipídios é formada por triacilglicerídeos, os quais apresentam maior massa molar. Assim, sua decomposição ocorre em temperaturas mais elevadas, até 500 °C, enquanto os monoésteres etílicos, de menor massa molar, volatilizam-se em temperaturas inferiores a 450 °C [32].

Nas Figuras 10 e 11, podem ser observados dois eventos de perda de massa decorrentes das reações de transesterificação. O primeiro evento térmico, situado entre 150 e 310 °C, corresponde à decomposição dos ésteres etílicos provenientes dos triacilglicerídeos. O segundo evento térmico ocorre na faixa de 315 a 420 °C e está relacionado à contribuição significativa de ácidos graxos livres (FFAs) de cadeia longa (C20:0 e C22:0), presentes naturalmente no teor lipídico da microalga [33].

A conversão em biodiesel no primeiro evento térmico para as condições M30/U60, M30/U90 e M30/U120 foi de 28,6%, 43,3% e 37,3%, respectivamente. Já no segundo evento térmico, as conversões correspondentes foram de 11%, 34,6% e 39,1%. Para as condições M60/U60, M60/U90 e M60/U120, os valores relativos ao primeiro evento térmico foram 43,6%, 38,6% e 45,0%, respectivamente, enquanto o segundo evento térmico apresentou conversões de 25,5%, 31,3% e 35,4%, na mesma ordem.

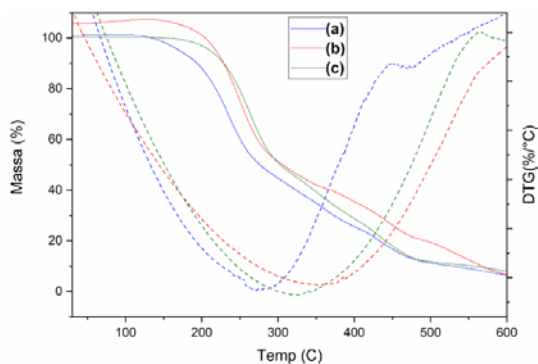


Figura 12. Curvas de TGA/DTG da transesterificação *in situ* utilizando HCl 37% sob diferentes condições reacionais: (a) M30 U60, (b) M30 U90 e (c) M3 U120.

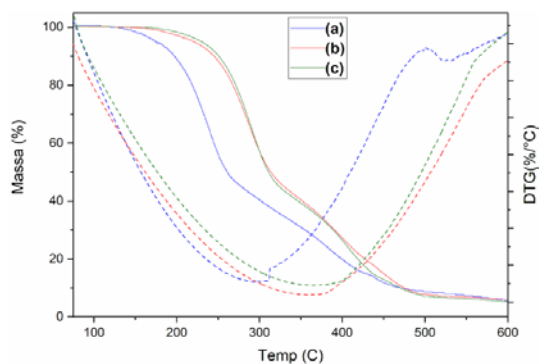


Figura 13. Curvas de TGA/DTG da transesterificação *in situ* utilizando HCl 37% sob diferentes condições reacionais: (a) M60 U60, (b) M60 U90 e (c) M60 U120.

As reações de transesterificação com o catalisador homogêneo HCl também apresentaram dois eventos de perda de massa, semelhantes aos observados nas reações com o catalisador heterogêneo (Figuras 12 e 13). O primeiro evento térmico, na faixa de 150 a 310 °C, está associado aos monoésteres etílicos provenientes dos triacilglicerídeos, enquanto o segundo evento, entre 315 e 420 °C, corresponde aos monoésteres etílicos derivados de ácidos graxos livres (FFAs) de cadeia longa (C20:0 e C22:0) [33].

As conversões em ésteres etílicos para o primeiro evento térmico, nas condições M30/U60, M30/U90 e M30/U120, foram de 55,5%, 50,7% e 51,9%, respectivamente, e para o segundo evento térmico, de 19,1%, 14,0% e 22,3%. Nas condições M60/U60, M60/U90 e M60/U120, as conversões obtidas no primeiro evento térmico foram de 60,0%, 54,1% e 56,7%, enquanto no segundo evento térmico, foram de 21,5%, 24,6% e 26,1%, respectivamente.

A Tabela 4 apresenta os dados numéricos das reações de transesterificação *in situ* em termos de conversão percentual e rendimento total de monoésteres etílicos derivados da biomassa da microalga. Pode-se observar que a percentagem de conversão da reação padrão de referência (HCl) é superior em todas as condições. Isso ocorre porque o catalisador heterogêneo não possui sítios ácidos médios e fortes suficientes para promover a conversão em tempos curtos. Por outro lado, catalisadores heterogêneos requerem tempos de reação prolongados para alcançar rendimentos catalíticos satisfatórios.

Tabela 04. Rendimentos percentuais e conversão percentual em ésteres etílicos obtidos nas reações de transesterificação *in situ*.

Condições reacionais	La-SBA-15pH (% conversão)			HCl (% conversão)		
	1º evento	2º evento	Rend.(%)	1º evento	2º evento	Rend.(%)
M30/U60	28,6	11	39,6	55,5	19,1	74,6
M30/U90	43,3	34,6	77,9	50,7	14	64,7
M30/U120	37,3	39,1	76,4	51,9	22,3	74,2
M60/U60	43,6	25,5	69,1	60	21,5	81,5
M60/U90	38,6	31,3	69,9	54,1	24,6	78,7
M60/U120	45,1	35,4	80,5	56,7	26,1	82,8

Conclusão

A síntese do catalisador La-SBA-15 pH foi confirmada por meio das análises de DRX, FRX, FTIR, TGA/DTG e acidez. A técnica de DRX comprovou a formação da estrutura, enquanto FRX e FTIR evidenciaram a incorporação do lantânio. A análise termogravimétrica (TGA/DTG), associada ao FTIR, demonstrou a presença de água na estrutura do catalisador, bem como a remoção do copolímero tribloco P123 após a calcinação. Além disso, o catalisador apresentou baixa densidade de sítios ácidos de Brønsted (médios/fortes), responsáveis pela hidrólise de triacilglicerídeos, o que compromete sua atuação como peneira molecular catalítica e repercute negativamente nos rendimentos do processo de transesterificação *in situ*.

A análise de TGA/DTG da microalga permitiu identificar os componentes da biomassa e quantificá-los a partir dos eventos de perda de massa em intervalos específicos de temperatura. A fração lipídica determinada por TGA/DTG apresentou valores superiores aos obtidos pela técnica convencional de extração, confirmando sua maior eficiência em relação aos métodos tradicionais.

Os resultados da transesterificação *in situ* dos lipídios da microalga *Monoraphidium sp.*, utilizando etanol na presença do catalisador heterogêneo La-SBA-15 pH, mostraram-se promissores, mas ainda insuficientes para comprovar sua viabilidade técnica. Portanto, tornam-se necessários estudos adicionais com foco no aumento do rendimento da reação.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bio-combustíveis (ANP) – PRH 37.

Referências

- Onwudili, J.A.; Sharma, V.; Scaldaferrì, C.A.; Hossain, A.K. Production of upgraded fuel blend from fast pyrolysis bio-oil and organic solvent using a novel three-stage catalytic process and its combustion characteristics in a diesel engine. *Fuel*, 2023, 335, 127028.
- Lemões, J.S.; Alves Sobrinho, R.C.M.; Farias, S.P.; Moura, R.R.; Primel, E.G.; Abreu P.C. Sustainable production of biodiesel from microalgae by direct transesterification. *Sustain Chem Pharm*, 2016, 3, 33–8.
- Salam, K.A.; Velasquez-Orta, S.B.; Harvey, A.P. Kinetics of fast alkali reactive extraction/in situ transesterification of *Chlorella vulgaris* that identifies process conditions for a significant enhanced rate and water tolerance. *Fuel Process Technol* 2015, 144, 212–9.
- Gan, Y.Y.; Chen, W.-H.; Ong, H.C.; Lin, Y.-Y.; Sheen, H.-K.; Chang, J.-S. Effect of wet torrefaction on pyrolysis kinetics and conversion of microalgae carbohydrates, proteins, and lipids. *Energy Convers Manage*, 2021, 227, 113609.
- Angelaalincy, M.; Nishtha, P.; Ajithkumar, V.; Ashokkumar, B.; Moorthy, I.M.G.; Brindhadevi, K.; Chi, N.T.L.; Pugazhendhi, A.; Varalakshmi, P. Phycoremediation of Arsenic and biodiesel production using green microalgae *Coelastrella* sp. M60 – an integrated approach. *Fuel*, 2023, 333, 126427.
- Kumar, M.; Sharma, M.P. Kinetics of *Chlorella protothecoides* microalgal oil using base catalyst. *Egypt J Pet* 2016, 25, 375–82.
- Likozar, B.; Pohar, A.; Levec J. Transesterification of oil to biodiesel in a continuous tubular reactor with static mixers: Modelling reaction kinetics, mass transfer, scale-up and optimization considering fatty acid composition. *Fuel Process Technol*, 2016, 142, 326–36.
- Lakatos, E.G.; Ranglová, K.; Barcenás-Pérez, D.; Grivalský, T.; Manoel, J.C.; Mylenko, M.; Cheel, J.; Nyari, J.; Wirth, R.; Kovács, K.L.; Kopecký, J.; Nedbalová, L.; Masojidek, J. Cold-adapted culturing of the microalga *Monoraphidium* sp. in thin-layer raceway pond for biomass production. *Algal Research-Biomass Biofuels And Bioproducts*, 2023, 69, 102926.
- Yee, W. Microalgae from the Selenastraceae as emerging candidates for biodiesel production: a mini review. *World J Microbiol and Biotechnol*, 2016, 32, 01-11.
- Suarez, P.A.Z.; Santos, A.L.F.; Rodrigues, J.P.; Alves, M.B. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. *Química Nova*, 2009, 32, 768-775.
- Zhang, Y.; Li, Y.; Zhang, X.; Tan, T. Biodiesel production by direct transesterification of microalgal biomass with co-solvent. *Bioresour Technol*. 2015, 196, 712-5.
- Thanh, N.T.; Mostapha, M.; Lam, M.K.; Ishak, S.; Dasan, Y.K.; Lim, J.W.; Tan, I.S.; Lau, S.Y.; Chin, B.L.F.; Hadibarata, T. Fundamental understanding of in-situ transesterification of microalgae biomass to biodiesel: A critical review. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270, 116212.
- Ehimen, E.A.; Sun, Z.; Carrington, G.C.; Use of ultrasound and co-solvents to improve the in-situ transesterification of microalgae biomass. *Process Environ Sci*, 2012, 15, 47-55.
- Corro, G.; Bañuelos, F.; Vidal, E.; Cebada, S. Measurements of surface acidity of solid catalysts for free fatty acids esterification in *Jatropha curcas* crude oil for biodiesel production. *Fuel*, 2014, 115, 625–8.
- Evangelista, J.P.C.; Gondim, A.D.; Souza, L.D.; Araújo, A.S. Alumina-supported potassium compounds as heterogeneous catalysts for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59, 2016, 887–894.
- Okechukwu, O.D.; Joseph, E.; Nonso, U.C.; Kenec, N.O. Improving heterogeneous catalysis for biodiesel production process, 2022, 3, 100038.
- Orege, J.I.; Oderinde, O.; Kifle, G.A.; Ibikunle, A.A.; Raheem, S.A.; Ejeromedoghene, O.; Okeke, E.S.; Olukowi, O.M.; Orege, O.B.; Fagbohun, E.O.; Ogundipe, T.O.; Avor, E.P.; Ajayi, O.O.; Daramola, M.O. Recent advances in heterogeneous catalysis for green biodiesel production by transesterification. *Energy Conversion and Management*, 2022, 258, 115406.
- Soldi, R.A.; Oliveira, A.R.S.; Ramos, L.P.; César-Oliveira, M.A.F. New heterogeneous acid catalysts in the synthesis of biodiesel. *Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros*, Campina Grande – Paraíba, Brasil, 2007.
- Wang, Q.; Wang, Z.; Pu, Z.; Wang, Y.; Li, M. Lanthanum-doped carbon quantum dots (La-CQDs) for detection of Fe³⁺ in colorimetric test paper and information anti-counterfeiting. *Optical Materials*, 2023, 137, 113630.
- Jang, M.; Park, J.K.; Shin, E.W. Lanthanum functionalized highly ordered mesoporous media: implications of arsenate removal. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2004, 75, 1-2, 159-168.
- Fernandes, F.R.D.; Santos, A.G.D.; Souza, L.D.; Dos Santos, A.P.B. Síntese e Caracterização do Material Mesoporoso SBA-15 Obtido com Diferentes Condições de Síntese. *Revista Virtual de Química*, 2016, 8(6), 1855-1864.
- Luz Júnior, G.E.D. Obtenção de diesel verde por craqueamento termocatalítico de óleo de buriti (*Mauritia flexuosa* L.) sobre materiais nanoestruturados do tipo LaSBA-15. Tese (Doutorado em Química) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte UFRN. Natal/RN. 2010.
- Yu, X.; Zhao, P.; He, C.; Li, J.; Tang, X.; Zhou, J.; Huang, Z. Isolation of a novel strain of *Monoraphidium* sp. and characterization of its potential application as biodiesel feedstock. *Bioresour Technol*, 2012, 121, 256–262.
- Ferreira, I.M.L. Estudo da pirólise catalítica da biomassa de microalga para obtenção de biocombustíveis renováveis utilizando materiais mesoporosos com níquel e molibdênio. 2018. 77f. Dissertação (Mestrado em Química) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- Branco, K.B.Z.F. Estudo da Transesterificação in situ da Microalga *Scenedesmus* sp. visando à síntese de Biodiesel. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.
- Brodie-Linder, N.; Dosseh, G.; Alba-Simonesco, C.; Audonnet, F.; Imperor-Clerc, M. SBA-15 synthesis: Are there lasting effects of temperature change within the first 10 min of TEOS polymerization. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 108, 73-81.
- Gobara, H.M. Characterization and catalytic activity of NiO/mesoporous aluminosilicate AISBA-15 in conversion of some hydrocarbons. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2021, 21, 1-10.
- Kruk, M.; Jaroniec, M.; Ko, C.H.; Ryoo, R. Characterization of the Porous Structure of SBA-15. *Chemistry of Materials*, 2000, 12, 1961-1968.
- Zhao, D.; Feng, J.; Huo, Q.; Melosh, N.; Fredrickson, G.H.; Chmelka, B.F.; Stucky, G.D. Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Ångström Pores. *Science*, 1998, 279, 548.
- Coutinho, A.C.S.L.S. Hidrodesulfurização do tiofeno sobre materiais nanoestruturados do tipo SBA-15 contendo cobalto e molibdênio. 152 f. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- Quintella, S.A. Síntese, Caracterização e propriedades catalíticas da peneira molecular nanoestruturada modificada com lantânio. 90 f. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- Gomes, A.F. Extração e Análise da fração lipídica da microalga *monoraphidium*-sp., Síntese e caracterização do seu biodiesel. 82f. Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- Tutunea, D. Thermal investigation of biodiesel blends derived from rapeseed oil. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, 111, 869–875.

O PAPEL DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA INTEGRAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM COMUNIDADES ISOLADAS

Bruna Sales Theodoro¹

Emerson Martim¹

Fulvy Antonella Venturi Pereira¹

RESUMO

A integração de energias renováveis em comunidades isoladas representa uma solução sustentável para a geração de energia em áreas sem acesso à rede elétrica convencional. No entanto, a variabilidade das fontes renováveis, como solar e eólica, impõe desafios para garantir um fornecimento constante e confiável de energia. Os sistemas de armazenamento de energia (SAE) têm um papel crucial na superação dessa intermitência, possibilitando que a energia gerada durante períodos de alta produção seja armazenada para uso em momentos de baixa produção. Isso garante não apenas a estabilidade no fornecimento de energia, mas também viabiliza a comercialização da energia excedente. A comercialização de energia renovável permite que as comunidades isoladas se tornem autossuficientes e até gerem receita adicional, por meio da venda do excedente gerado para redes locais ou mercados mais amplos. Além disso, o uso de SAE pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis, diminuindo as emissões de gases de efeito estufa e promovendo a transição para um modelo energético mais sustentável. No entanto, a implementação de SAE enfrenta desafios técnicos e financeiros, como o custo inicial de instalação e a necessidade de capacitação local para operação e manutenção dos sistemas. Este artigo examina o papel dos sistemas de armazenamento de energia na integração e comercialização de energias renováveis em comunidades isoladas, destacando os benefícios socioeconômicos e ambientais, além das metodologias e tecnologias mais adequadas para garantir o sucesso dessas iniciativas em longo prazo.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia mais limpa e sustentável está aumentando o uso de energia renovável em todo o mundo. Mas o acesso à eletricidade continua difícil em muitas áreas, especialmente em comunidades remotas. Novas tecnologias, como a energia solar e a eólica, são melhores para estas áreas porque têm fontes de energia abundantes e são de baixo custo, mesmo em áreas remotas. Porém, um dos principais problemas na sua utilização é a interação entre essas fontes, ou seja, a produção de energia muda dependendo de fatores como hora do dia, luz do dia e condições climáticas. As instalações elétricas, especialmente em povoações remotas, não podem ser ligadas à rede. Neste contexto, a tecnologia de armazenamento de energia (SAE) é uma solução importante para a segurança e a autossuficiência energética. Em termos de continuidade e fiabilidade, permite armazenar a energia produzida durante a produção para utilização quando a produção diminui.

Além disso, o armazenamento de energia pode facilitar a comercialização da produção de energia, permitindo que as comunidades vendam energia a empresas ou cooperativas. Pode ser colocado em diferentes tipos de infraestrutura dependendo das necessidades da comunidade e das características do local. Para a comercialização de eletricidade, estes sistemas representam uma solução porque permitem armazenar e ativar a energia quando necessário, o que pode aumentar a eficiência de utilização e os benefícios da produção de energia. Nesta análise, como os acumuladores são mais utilizados

¹ Especialização em Engenharia de Energias Renováveis - PUCPR

fora do Brasil, seu uso em áreas remotas do Brasil também precisa ser analisado. Desafios financeiros e logísticos. A seleção dos equipamentos mais adequados depende de fatores como recursos naturais, custos de investimento inicial, capacidade local de manutenção e políticas públicas vigentes.

Este artigo tem como objetivo explorar o papel do armazenamento de energia na integração e comercialização de energia renovável em comunidades remotas e discutir métodos práticos e melhores práticas para o uso dessas tecnologias. Além disso, o tipo de armazenamento examinado neste artigo será o modelo BESS, e serão discutidos os benefícios para a saúde da SAE, como a redução dos custos dos combustíveis fósseis e a criação de novas oportunidades econômicas.

2 PROBLEMATIZAÇÃO/METODOLOGIA

O principal problema das comunidades remotas no uso de energia renovável é a falta de recursos para a transmissão e distribuição de energia elétrica. Em muitas destas áreas, os projetos de eletricidade são inexistentes ou limitados, tornando mais comum a dependência de geradores a diesel e de outras fontes de energia não renováveis. Isto cria custos elevados para as comunidades e aumenta as emissões de gases com efeito de estufa. A melhor solução para resolver este problema é adotar fontes de energia renováveis nas instalações de produção de baterias, especialmente energia solar e eólica, que têm grande potencial em áreas remotas. Por exemplo, a energia solar é produzida apenas durante o dia e dependendo das condições climáticas, isso pode causar escassez de energia. Já a energia eólica depende da força do vento, que provoca alterações nas lavouras.

Neste contexto, a complementaridade dos sistemas de energia e de armazenamento de energia torna-se uma ferramenta importante para garantir a continuidade do fornecimento de energia. O armazenamento pode armazenar energia produzida durante períodos de alta atividade para uso durante períodos de baixa produção, suavizando picos e vales de demanda e fornecendo energia estável. Uma série de etapas que incluem o planejamento da infraestrutura, a seleção da tecnologia de armazenamento de energia, o armazenamento adicional e a definição de procedimentos operacionais. No planejamento inicial, devem ser tidos em conta fatores como o perfil de utilização da comunidade, a energia e a sustentabilidade das fontes de energia renováveis, e as condições locais, como o clima e a geografia. Para tanto, são realizadas análises comerciais e econômicas, incluindo análise de custos, retorno sobre investimento (ROI) e gestão de sistemas.

O SAE tem muitas opções, incluindo baterias de íons de lítio, ar comprimido e pequenos motores elétricos. Cada um desses métodos apresenta vantagens e desvantagens e deve ser avaliado de acordo com as características da área. Por exemplo, as baterias de íon de lítio são mais eficientes, mas têm um custo inicial mais elevado e requerem manutenção especial. As máquinas de ar comprimido podem ser mais baratas, mas são menos eficientes. Isto inclui a integração com fontes de energia renováveis, a gestão da carga e descarga de baterias ou outros dispositivos de armazenamento e a criação de sistemas de monitorização que garantirão o funcionamento do sistema a longo prazo. A comercialização da produção de energia é outra parte importante da abordagem porque permite à comunidade gerar receitas a partir da venda de produtos energéticos, e essas receitas podem ser usadas para pagar custos operacionais e criar benefícios econômicos para a comunidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de armazenamento de energia têm demonstrado grande potencial na integração de energias renováveis em comunidades isoladas, especialmente no que diz respeito à estabilidade do fornecimento de energia. Estudos de caso realizados em diversas regiões do mundo, como em comunidades na África e na América Latina, mostram que o uso de SAE tem levado a uma redução significativa na dependência de geradores a diesel e a uma diminuição nos custos com combustíveis. Além disso, os SAE também têm contribuído para a melhora na qualidade de vida das comunidades, uma vez que oferecem uma fonte de energia mais acessível e sustentável.

Em termos de comercialização de energia, os sistemas de armazenamento têm sido fundamentais para viabilizar a venda do excedente gerado, especialmente em áreas onde a energia é produzida de forma descentralizada. Com a capacidade de armazenar a energia em períodos de baixa demanda, os SAE traz a opção de permitir a possibilidade da energia ser disponibilizada para a venda nos momentos de pico de demanda, quando os preços são mais altos. Isso aumenta a rentabilidade da produção de energia e pode gerar uma fonte de receita adicional para as comunidades.

No entanto, a implementação de SAE em comunidades isoladas também enfrenta desafios significativos. O custo inicial da instalação dos sistemas pode ser elevado, o que representa uma barreira para muitas comunidades, principalmente aquelas que não têm acesso a financiamento ou subsídios governamentais. Além disso, a manutenção dos sistemas de armazenamento requer conhecimento técnico especializado, o que pode ser um obstáculo em localidades remotas, onde a mão de obra qualificada é escassa.

Outro desafio é a seleção da tecnologia de armazenamento mais adequada para cada comunidade. As opções de SAE variam amplamente em termos de custo, eficiência, vida útil e capacidade de armazenamento. Por exemplo, o BESS (baterias de íon-lítio) são altamente eficientes, mas podem ser caras, enquanto os sistemas hidrelétricos de pequeno porte podem ser mais acessíveis, mas têm uma capacidade de armazenamento menor e dependem de outros fatores. A escolha da tecnologia deve ser feita de acordo com as características da comunidade, incluindo o perfil de consumo, a quantidade de energia renovável disponível e os recursos financeiros.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de armazenamento de energia (SAE) têm se mostrado fundamentais para a integração e comercialização das energias renováveis em comunidades isoladas, proporcionando uma solução eficaz para os problemas de intermitência e garantindo um fornecimento de energia mais estável e confiável. A adoção dessas tecnologias pode contribuir de maneira significativa para a redução da dependência de fontes de energia convencionais, como os combustíveis fósseis, especialmente em áreas remotas que carecem de infraestrutura elétrica confiável.

Com a implementação de SAE, as comunidades isoladas têm a oportunidade de se tornar autossustentáveis em termos energéticos. A possibilidade de gerar, armazenar e até comercializar energia permite não apenas melhorar as condições de vida, mas também criar novas fontes de renda. Isso é particularmente relevante para regiões que, até o momento, dependem de geradores a diesel ou de outras fontes de energia caras e poluentes, com impacto ambiental negativo.

Porém, a implementação dos SAE não é isenta de desafios. A alta demanda inicial de investimento pode ser um obstáculo para muitas comunidades, especialmente aquelas com recursos financeiros limitados, sendo necessário este investimento partir de uma política pública para as comunidades isoladas. A necessidade de capacitação local para a operação e manutenção dos sistemas também é um fator que deve ser cuidadosamente planejado, já que a falta de pessoal qualificado pode prejudicar a continuidade e a eficiência dos sistemas no longo prazo.

Além dos benefícios diretos para as comunidades, a adoção de SAE também pode contribuir para o fortalecimento da rede de energia nacional sendo este interesse dos governos locais e federais. Ao integrar pequenas unidades de geração e armazenamento de energia ao sistema elétrico mais amplo, essas comunidades podem se tornar participantes ativos no mercado energético, contribuindo para a diversificação da oferta e aumentando a segurança do fornecimento.

Contudo, é importante que as políticas públicas abordem de forma integrada as necessidades energéticas dessas comunidades. Além de incentivos financeiros para a instalação dos sistemas de armazenamento de energia, é necessário promover um ambiente regulatório que favoreça a comercialização da energia gerada, garantindo que as comunidades possam acessar mercados competitivos e obter preços justos pela energia vendida. A criação de um marco regulatório claro e eficiente será fundamental para o sucesso de tais iniciativas.

Em última análise, o papel dos sistemas de armazenamento de energia na integração e comercialização de energias renováveis é de extrema importância para as comunidades isoladas. Com a combinação de políticas públicas adequadas, inovações tecnológicas e uma gestão local eficiente, é possível transformar essas comunidades em exemplos de sustentabilidade e autossuficiência energética. O futuro das energias renováveis passa por soluções inovadoras como essas, que podem oferecer benefícios tanto econômicos quanto ambientais, com impactos positivos duradouros.

REFERÊNCIAS

1. BOWER, Luke. **Energy Storage Systems and their Application in Remote Communities**. 1ª ed. Londres: Springer, 2021.
2. GROSS, Robert; SMITH, Michael. **Renewable Energy Integration in Off-grid Communities**. 2ª ed. Nova York: Wiley, 2022.
3. HAWKINS, Alan. **Energy Storage Technologies for Isolated Regions: A Review of Practical Applications**. 2020. 45 f. Renewable Energy Journal, v. 45, n.º 2, p. 112-123, 2020.
4. JAMES, Robert; BROWN, Linda. **Technological Innovations in Energy Storage for Off-Grid Communities**. 2019. 30 f. Energy Policy Journal, v. 58, p. 45-60, 2019.
5. WILSON, Thomas. **Renewable Energy for Remote Areas: Storage Solutions and Policy Considerations**. 2021. 40 f. Energy and Development Journal, v. 39, n.º 3, p. 98-110, 2021.

DINÂMICA DE PATENTEAMENTO EM COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS PARA AVIAÇÃO (SAF): ANÁLISE GLOBAL E IMPLICAÇÕES PARA O BRASIL

PATENT DYNAMICS IN SUSTAINABLE AVIATION FUELS (SAF): GLOBAL ANALYSIS AND IMPLICATIONS FOR BRAZIL

Edgar Barassa; CEHTES
Marcelo Ferreira Tete; CEHTES

RESUMO

Este trabalho analisa a atividade inventiva global relacionada aos Combustíveis Sustentáveis para Aviação (SAFs), utilizando dados de patentes como proxy para o desenvolvimento científico e tecnológico. O estudo buscou caracterizar a evolução temporal do patenteamento, identificar os principais detentores de patentes, mapear a distribuição geográfica dos depósitos e analisar as principais rotas tecnológicas associadas aos SAFs. A metodologia incluiu uma busca abrangente na plataforma Questel Orbit IP Business Intelligence em julho de 2025, resultando na identificação de 972 famílias de patentes, das quais 220 foram publicadas apenas em 2023. Os resultados indicam que a atividade inventiva é recente e vem crescendo de forma expressiva desde 2021, refletindo pressões regulatórias e a abertura de mercados. Observou-se elevada concentração das patentes em poucas empresas, principalmente fabricantes de motores aeronáuticos e companhias dos setores de petróleo e químicos. Estados Unidos, China e Europa concentram a maior parte dos depósitos, mas o Brasil destaca-se na América Latina pela intensidade de depósitos realizados, embora sem participação relevante de empresas, universidades ou institutos de pesquisa nacionais. Conclui-se que o setor de SAFs ainda está em formação, com múltiplas rotas tecnológicas competindo e janelas abertas para novos entrantes. Para o Brasil, país com histórico em biocombustíveis, a construção de um papel protagonista depende de políticas públicas direcionadas, investimentos empresariais em P&D e da articulação estratégica entre indústria, governo e academia.

Palavras-chave: combustíveis sustentáveis para aviação; patentes; desenvolvimento tecnológico; Brasil; biocombustíveis

ABSTRACT

This paper analyzes global inventive activity related to Sustainable Aviation Fuels (SAFs), using patent data as a proxy for scientific and technological development. The study aimed to characterize the temporal evolution of patenting, identify the leading patent holders, map the geographical distribution of filings, and analyze the main technological pathways associated with SAFs. The methodology involved a comprehensive search on the Questel Orbit IP Business Intelligence platform in July 2025, resulting in the identification of 972 patent families, with 220 published in 2023 alone. The results indicate that inventive activity is recent and has been growing significantly since 2021, driven by regulatory pressures and market-opening measures. Patent ownership is highly concentrated among a few companies, primarily aircraft engine manufacturers and oil and chemical companies. The United States, China, and Europe account for most filings, but Brazil stands out in Latin America for its filing intensity, despite the limited participation from domestic companies, universities, or research institutes. The study concludes that the SAF sector is still emerging, with multiple competing technological pathways and open windows of opportunity for new entrants. For Brazil, a country with a strong tradition in biofuels, building a leading role will require targeted public policies, corporate investment in R&D, and strategic coordination among industry, government, and academia.

Keywords: sustainable aviation fuels; patents; technological development; Brazil; biofuels.

1. INTRODUÇÃO

Os Combustíveis Sustentáveis para Aviação (SAF) são combustíveis renováveis ou de baixo carbono concebidos para substituir os querosenes de aviação de origem fóssil. Podem ser produzidos a partir de diferentes matérias-primas e processos, incluindo óleos e gorduras de origem biológica, biomassa lignocelulósica, álcoois e outros. Os SAF são reconhecidos como uma das principais alternativas para a descarbonização da aviação, setor de difícil mitigação para novos combustíveis, elevada intensidade energética, da longa vida útil dos ativos e da limitada viabilidade de eletrificação direta em voos de longa distância [1], [2]. Apesar de sua importância estratégica, os SAF enfrentam desafios significativos que restringem a difusão em larga escala. Os custos atuais de produção permanecem substancialmente superiores aos do querosene convencional, gerando um diferencial que limita a adoção no mercado. Além disso, o campo tecnológico apresenta múltiplas rotas concorrentes — Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), Alcohol-to-Jet (ATJ), síntese de Fischer-Tropsch (FT) e Power-to-Liquid (PtL) —, cada qual com requisitos específicos de tecnologia, insumos e perspectivas de escalabilidade. Ainda não há configuração dominante estabelecida.

Nesse cenário de incerteza, compreender a intensidade e a direção da atividade inventiva torna-se essencial. Dados de patentes, em particular, oferecem evidências relevantes sobre o desenvolvimento tecnológico, permitindo identificar quais agentes lideram os processos de inovação e onde se concentram os investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) [3], [4]. O acompanhamento da evolução do patenteamento também possibilita mapear redes de colaboração e nichos tecnológicos que podem contribuir para superar barreiras existentes e mitigar os altos custos de produção de SAF.

O objetivo deste estudo é identificar, descrever e analisar a atividade inventiva global em SAF, utilizando o patenteamento como uma medida indireta para avaliar o desenvolvimento tecnológico dos SAF. A questão central é: como se caracteriza, em escala mundial, a atividade (dinâmica, atores, países, concessões e outros) de patenteamento relacionada aos SAF? Para responder, são mapeadas a evolução dos depósitos ao longo das últimas duas décadas, a liderança de empresas e instituições, as redes de cooperação e a distribuição geográfica. Ao oferecer uma visão global da atividade inventiva, este trabalho busca fornecer evidências para orientar investimentos e políticas públicas no Brasil, contribuindo para o posicionamento do país no panorama internacional de inovação em SAF e para o delineamento de estratégias alinhadas às tendências tecnológicas internacionais.

2. METODOLOGIA

A propriedade intelectual (PI) refere-se a criações do intelecto humano, como invenções, obras literárias e artísticas, além de símbolos, nomes e imagens utilizados no comércio [5]. A PI se subdivide em diferentes categorias: Propriedade Industrial, Marcas e Direitos Autorais. No domínio da Propriedade Industrial, as patentes constituem um dos principais instrumentos de concessão de direitos exclusivos sobre invenções. Conforme a Organização Mundial da Propriedade Intelectual, “uma patente é um direito exclusivo concedido para uma invenção. As patentes beneficiam inventores ao assegurar proteção legal às suas invenções...” [6].

Os titulares de patentes detêm o direito de controlar o uso de suas invenções durante o período de proteção, incluindo a possibilidade de licenciar ou transferir tais direitos a terceiros. Uma vez encerrado o período de exclusividade, as patentes ingressam no domínio público, permitindo utilização irrestrita pela sociedade. Esse mecanismo evidencia o interesse público associado ao sistema de patentes, que, além de garantir proteção jurídica, funciona como instrumento de disseminação de conhecimento tecnológico [7].

O uso de dados de patentes tem recebido crescente atenção em estudos de inovação e de gestão tecnológica. Patentes oferecem informações valiosas que permitem analisar a evolução tecnológica ao longo do tempo e entre diferentes setores [8], [9], [10]. Embora nem todos os avanços tecnológicos sejam formalizados por meio do patenteamento — em virtude da utilização de segredos industriais, know-how e outros mecanismos informais de proteção —, os dados de patentes permanecem como ferramenta central para mapear trajetórias tecnológicas e identificar agentes líderes. Essa abordagem metodológica é particularmente relevante para setores como o de Combustíveis Sustentáveis para Aviação (SAF), caracterizados pela coexistência de múltiplas rotas tecnológicas concorrentes e pela presença de desafios de custo e escalabilidade.

O presente estudo adota a análise de patentes para identificar os atores globais envolvidos na inovação em SAF, bem como as rotas tecnológicas em desenvolvimento. Parte-se, dessa forma, de outro estudo já ora empreendido e publicado, ao qual este artigo visa complementar e adicionar novos elementos para a análise. [11].

A busca de dados foi realizada em 30 de julho de 2025, utilizando a plataforma Questel Orbit IP Business Intelligence¹. O seguinte comando booleano foi empregado:

((SUSTAINABLE AVIATION FUEL OR SYNTHETIC PARAFFINIC KEROSENE OR RENEWABLE AVIATION FUEL OR LOW-CARBON AVIATION FUEL OR JET BIOFUEL OR GREEN AVIATION FUEL OR ECO-FRIENDLY AVIATION FUEL OR BIOJET FUEL OR BIO-AVIATION FUEL OR ALTERNATIVE AVIATION FUEL OR ADVANCED BIOFUELS FOR AVIATION))/T/I/AB/CLMS/DESC/ODES/OBJ/ADB/ICLM/KEYW/IX AND (STATE/ACT=ALIVE))

Essa equação de busca teve como alvo famílias de patentes ativas que explicitamente fazem referência a termos relacionados a SAF em seus títulos, resumos, reivindicações ou demais campos descritivos. O recorte temporal estendeu-se até julho de 2025.

Para assegurar consistência e comparabilidade, as publicações recuperadas foram organizadas em famílias de patentes, definidas pelo *OECD Patent Statistics Manual* como “o conjunto de patentes (ou pedidos) depositados em diversos países que estão relacionados entre si por uma ou mais prioridades em comum”.^[12].

A fim de capturar com precisão a dinâmica inventiva do setor, a análise utilizou as datas de prioridade das famílias de patentes como principal referência temporal. A data de prioridade representa o primeiro depósito dentro da família e, em geral, constitui o indicador mais próximo do momento em que a atividade inventiva efetivamente ocorreu. O uso da data de prioridade, em lugar da data de publicação ou de concessão, permite visualizar de forma mais clara e precisa a evolução temporal da atividade inventiva em SAF, minimizando distorções resultantes de diferentes prazos de processamento nos escritórios de patentes.

É necessário, contudo, reconhecer as limitações inerentes ao uso de dados de patentes como indicador de desenvolvimento tecnológico. Nem todas as atividades inovativas resultam em pedidos de patentes; algumas empresas podem recorrer a mecanismos alternativos, como segredos industriais, vantagens de tempo de mercado (*lead time*) ou know-how. Além disso, as práticas de patenteamento e a propensão em buscar proteção variam significativamente entre setores e países, o que pode introduzir vieses na representação dos atores ou na caracterização da dinâmica inventiva.

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta uma análise abrangente do panorama global de patentes relacionadas aos Combustíveis Sustentáveis para Aviação (SAF), combinando a exposição dos resultados com uma discussão analítica e estratégica integrada. Todas as análises subsequentes baseiam-se em dados primários extraídos da plataforma *Questel Orbit IP Business Intelligence*. A discussão está estruturada em seis subseções interconectadas, cada uma dedicada a uma dimensão-chave da atividade inventiva mapeada neste estudo. A análise conjunta dessas dimensões possibilita compreender de forma mais aprofundada as dinâmicas tecnológicas, o ambiente competitivo e as implicações estratégicas da inovação em SAF em nível mundial.

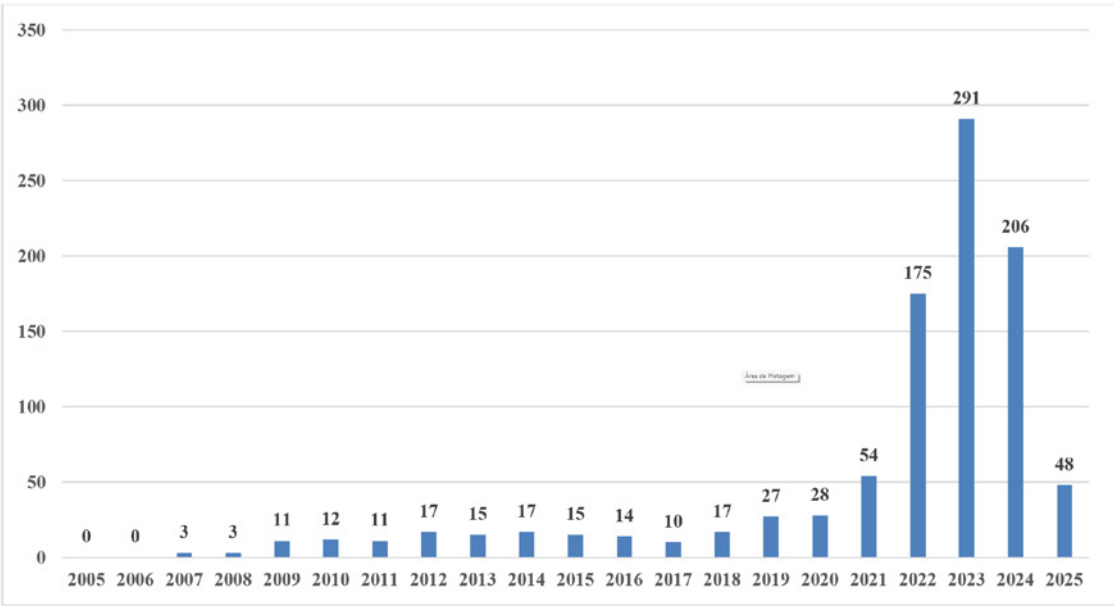
3.1. EVOLUÇÃO TEMPORAL

A análise das famílias de patentes relacionadas a SAF indica trajetória ascendente na última década, com aceleração mais pronunciada a partir de 2020 e continuidade em 2021 e 2022, conforme o Gráfico 1. Esse crescimento culmina em um pico em 2023, quando 220 famílias de patentes foram publicadas, compondo um total de 972 famílias mapeadas globalmente na base de dados. Esse padrão reflete a combinação de pressões regulatórias crescentes — como o fortalecimento do esquema de compensação e redução de carbono para a aviação internacional (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – CORSIA*) da ICAO, bem como as diretivas de energia renovável da União Europeia — e a abertura progressiva de mercados para SAF por meio de mandatos ou compromissos corporativos voluntários. Esses fatores externos criaram incentivos relevantes para o aumento dos

¹ A análise apresentada neste artigo foi realizada utilizando a plataforma Questel Orbit IP Business Intelligence, reconhecida como uma das maiores e mais abrangentes bases de dados mundo. A plataforma cobre mais de 96 escritórios nacionais e regionais de patentes, incluindo USPTO (Estados Unidos), EPO (Europa), WIPO (Internacional), CNIPA (China), JPO (Japão), entre outros, permitindo a integração de dados globais sobre publicações, status legal, famílias de patentes e classificações internacionais (IPC/CPC). Essa ampla cobertura torna o Questel Orbit uma ferramenta estratégica para estudos de inteligência tecnológica e para a análise de tendências em atividades inventivas (Questel, 2025).^[13].

investimentos empresariais em pesquisa e desenvolvimento (P&D), resultando em expansão da atividade inventiva em múltiplas rotas tecnológicas.

Gráfico 1 – Evolução Temporal (2005–2025)



Fonte: Elaboração própria a partir de Questel ORBIT (2025).

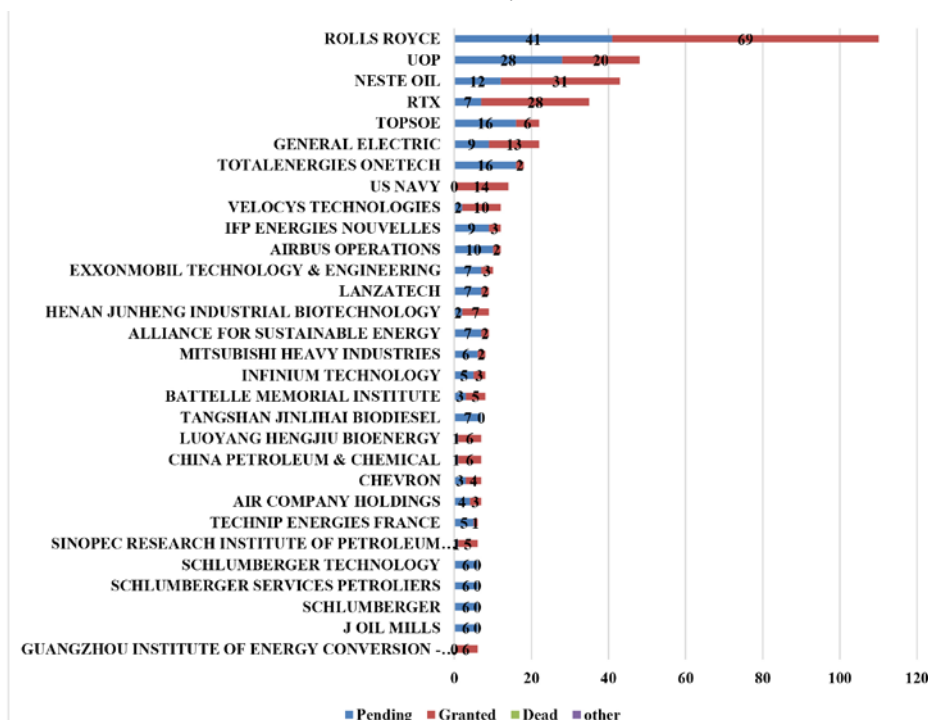
Cabe observar que os dados de publicações de patentes tendem a subestimar o período mais recente. Devido ao período de confidencialidade padrão de 18 meses entre o depósito e a publicação, os anos de 2024 e 2025 provavelmente não capturam a totalidade da atividade inventiva em curso. Ainda assim, a tendência até 2023 oferece evidências consistentes do aumento do interesse e da intensificação dos investimentos estratégicos em tecnologias relacionadas a SAF.

Esse crescimento significativo evidencia a relevância global dos SAF, que se consolidam como um dos pilares críticos na descarbonização da aviação. Embora o número absoluto de patentes ainda seja modesto em comparação a setores tecnológicos mais consolidados, a intensidade da atividade inventiva recente confirma o caráter emergente do setor. Cada família de patentes representa não apenas um avanço tecnológico potencial, mas também um compromisso financeiro deliberado por parte do depositante, o que reflete confiança nas perspectivas comerciais da inovação subjacente. Assim, o aumento acentuado da atividade de patenteamento pode ser interpretado como um indicador do impulso mais amplo em torno do desenvolvimento de SAF, sinalizando um setor em processo de rápida ascensão na agenda estratégica da transição energética global.

3.2. ATORES

A análise da titularidade das patentes, através do Gráfico 2, revela uma concentração marcada em um número reduzido de agentes, o que reforça a relevância estratégica dos Combustíveis Sustentáveis para Aviação (SAF) para um núcleo restrito de organizações. Um aspecto central desse panorama é a presença dos fabricantes de motores aeronáuticos, com destaque para a Rolls-Royce, maior produtora mundial de motores de aviação. A Rolls-Royce se destaca como o principal depositante no campo das patentes relacionadas a SAF, refletindo seu interesse explícito em compreender de que maneira esses combustíveis impactarão o desempenho e a evolução de suas tecnologias de propulsão. Mais do que antecipar requisitos técnicos, a empresa parece utilizar o patenteamento como forma de capturar benefícios potenciais associados ao desenvolvimento de produtos aprimorados, à otimização de equipamentos e à criação de novos serviços vinculados à adoção de SAF.

Gráfico 2 – Principais Atores



Fonte: Elaboração própria a partir de Questel ORBIT (2025).

Após a Rolls-Royce, os dados evidenciam a participação ativa de companhias químicas e de grandes grupos de petróleo e gás, para os quais os SAF representam uma extensão natural de suas atividades já estabelecidas. Entre esses atores estão UOP, Neste Oil, TotalEnergies, entre outros, que dispõem tanto da infraestrutura industrial quanto de cadeias de suprimento de insumos capazes de sustentar a produção em escala. O envolvimento dessas empresas no patenteamento relativo a SAF sugere uma estratégia deliberada de assegurar posição competitiva em um mercado que tende a se consolidar como de grande relevância no futuro.

Outro achado significativo é a presença de depositantes não corporativos, como o Exército dos Estados Unidos, que, embora não se configure como ator convencional da indústria, demonstra interesse em compreender as implicações operacionais dos SAF, particularmente no âmbito da aviação militar. Ademais, diversas instituições de pesquisa e tecnologia, especialmente dos Estados Unidos e da China, também se destacam como depositantes ativos, contribuindo para a fase de exploração tecnológica inicial que caracteriza este campo.

3.3. STATUS LEGAL

A análise do status legal das famílias de patentes relacionadas a SAF (ainda relacionado ao Gráfico 2) demonstra tratar-se de um setor altamente ativo e ainda em fase de formação. A maioria das famílias identificadas no conjunto de dados está concedida ou em exame, ao passo que praticamente não foram observados casos de patentes abandonadas ou expiradas. Esse achado reforça a conclusão de que os SAF constituem um campo tecnológico emergente, com a maior parte das inovações ainda dentro do período de exclusividade.

A predominância de patentes ativas possui implicações estratégicas. Em primeiro lugar, indica que empresas e instituições seguem investindo na manutenção e na defesa de seus portfólios de propriedade intelectual, o que reflete confiança nas perspectivas comerciais de longo prazo das tecnologias relacionadas a SAF. Em segundo lugar, a relativa novidade do campo sugere que litígios futuros tendem a se tornar um tema relevante, especialmente porque muitas famílias de patentes foram depositadas simultaneamente em múltiplas jurisdições. Esse padrão de depósitos paralelos em mercados estratégicos eleva o potencial de disputas por sobreposição de reivindicações e pode moldar as dinâmicas competitivas à medida que o setor amadurece.

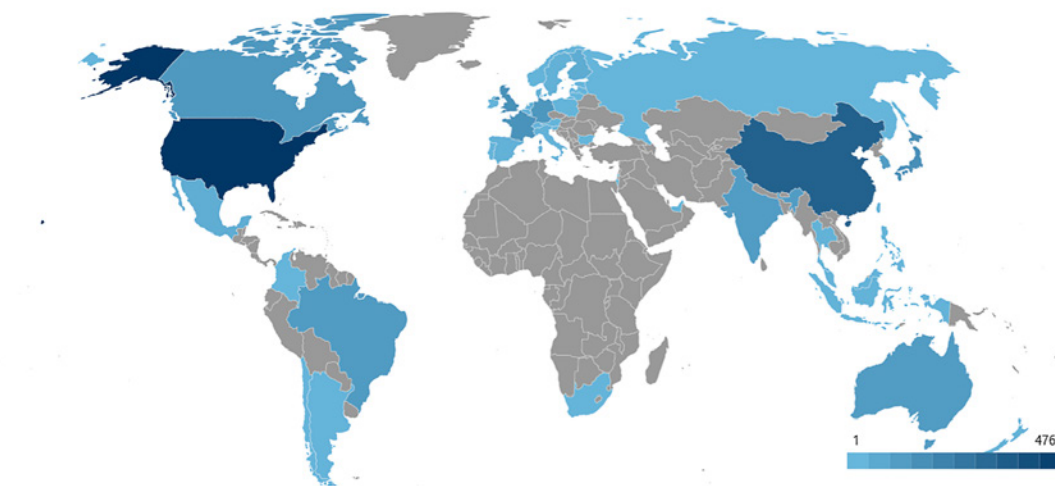
Em síntese, o perfil atual do status legal demonstra que o panorama de patentes em SAF não apenas está se expandindo, mas também se consolidando, dado que os depositantes buscam assegurar posições fortes e defensáveis de propriedade intelectual em antecipação ao crescimento de mercado. Isso é consistente com a constatação mais ampla de que os SAF compõem um domínio tecnológico emergente e de alto risco/retorno, no qual a resolução de direitos de propriedade intelectual tende a desempenhar papel decisivo na definição de lideranças.

3.4. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA

A distribuição geográfica das famílias de patentes relacionadas a SAF, ilustrada pela Figura 1, revela clara concentração em um número limitado de jurisdições, com destaque para os Estados Unidos e a China, seguidos pelo Escritório Europeu de Patentes (EPO) e por determinados escritórios nacionais europeus. Essa configuração reflete a convergência entre a atividade inventiva e os principais mercados atuais ou potenciais de SAF, que também concentram os grandes atores industriais e apresentam marcos regulatórios de apoio. A presença de depósitos paralelos nessas jurisdições sugere estratégias deliberadas de assegurar direitos de propriedade intelectual em regiões críticas para a comercialização.

Um achado relevante é a intensidade moderada a alta de depósitos no Brasil, que distingue o país de seus pares latino-americanos, bem como de outras economias emergentes na África e em partes da Ásia. Esse padrão reforça a relevância estratégica do Brasil como alvo de proteção de propriedade intelectual, provavelmente vinculada ao seu setor de biocombustíveis consolidado, à base agrícola robusta e às capacidades industriais historicamente desenvolvidas em produção e processamento de matérias-primas. O posicionamento do país como lócus de atividade inventiva e de proteção sugere que os depositantes percebem o Brasil não apenas como potencial polo de produção, mas também como mercado futuro para tecnologias de SAF.

Figura 1 – Distribuição Geográfica



Fonte: Elaboração própria a partir de Questel ORBIT (2025).

Essa observação carrega implicações significativas para o ecossistema doméstico de inovação. A presença de depositantes estrangeiros — e possivelmente nacionais — registrando patentes de SAF no Brasil indica oportunidades para o desenvolvimento de competências locais, transferência tecnológica e formação de parcerias industriais. Além disso, reflete o reconhecimento das vantagens competitivas singulares do país — incluindo abundância de biomassa e ampla experiência em produção de biocombustíveis — como ativos estratégicos no cenário emergente de SAF em escala global.

Em contraste, outros países da América Latina, assim como diversas economias africanas, apresentam níveis baixos ou irrelevantes de atividade de patenteamento nesse domínio. Essa disparidade destaca a atratividade diferenciada do Brasil no âmbito do Sul Global e reforça o potencial do país para consolidar uma posição de liderança no desenvolvimento e na comercialização de SAF.

3.5. DOMÍNIOS TECNOLÓGICOS

A análise dos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) associados às famílias de patentes relacionadas a SAF demonstra elevado grau de dispersão tecnológica, evidenciando tratar-se de um campo ainda emergente, sem configuração dominante estabelecida. As patentes estão distribuídas entre diversas rotas de produção de SAF, conforme ilustra a Figura 2, incluindo Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), Alcohol-to-Jet (ATJ), síntese de Fischer-Tropsch (FT) e processos Power-to-Liquid (PtL), entre outros. Cada rota apresenta requisitos específicos de insumos, desafios tecnológicos e perfis de custo diferenciados, o que explica a ausência de uma abordagem prevalente.

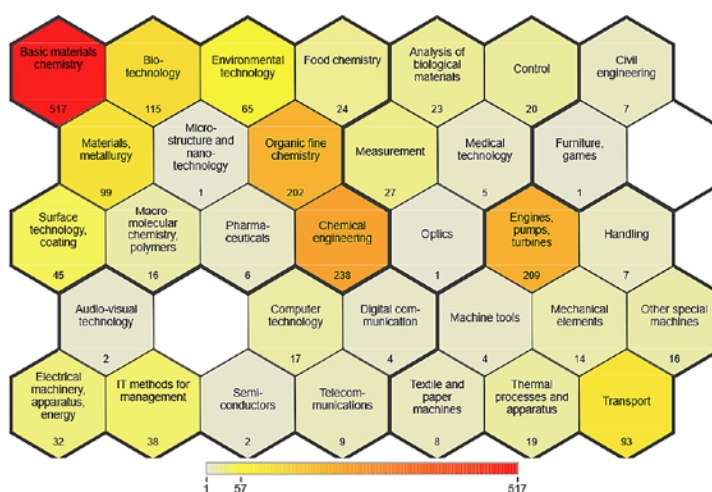
Apesar dessa diversidade, os dados revelam a existência de dois grandes eixos tecnológicos. O primeiro concentra-se em processos químicos e bioquímicos voltados à produção de SAF, representados de forma expressiva nos códigos IPC ligados à engenharia química, catálise, conversão de matérias-primas e aprimoramento de combustíveis. Esse domínio é fortemente ocupado por empresas dos setores de petróleo e químico, que mobilizam infraestrutura e conhecimento acumulado para ampliar a produção em escala.

O segundo eixo compreende tecnologias relacionadas à aplicação dos SAF em motores aeronáuticos, abrangendo compatibilidade de combustíveis, otimização da combustão, controle de emissões e desempenho de longo prazo dos motores. Esse agrupamento de atividades de patenteamento está particularmente associado aos grandes fabricantes de motores, com destaque para a Rolls-Royce, cujo objetivo é assegurar a integração eficaz dos novos combustíveis em sistemas de propulsão existentes e futuros.

A coexistência desses dois domínios — complementares, mas distintos — reflete a natureza dual do desenvolvimento em SAF: a inovação deve ocorrer tanto nas tecnologias de produção quanto nos sistemas de utilização. Essa interdependência é reforçada pelos padrões de citações e depósitos colaborativos entre agentes de ambos os domínios, o que evidencia a relevância das parcerias intersetoriais.

Em síntese, a análise IPC confirma que o panorama tecnológico dos SAF permanece fragmentado, mas altamente dinâmico, com múltiplas rotas de produção e aplicações avançando em paralelo. Essa configuração gera oportunidades e riscos: por um lado, a diversidade estimula experimentação e inovação; por outro, amplia a possibilidade de futura consolidação em torno de um subconjunto de tecnologias vencedoras. A capacidade dos agentes de se posicionarem de forma estratégica nesses dois eixos será determinante para a definição de vantagens competitivas à medida que o setor amadurece.

Figura 2 – Domínios Tecnológicos



Fonte: Elaboração própria a partir de Questel ORBIT (2025).

3.6. CITAÇÕES ENTRE OS ATORES

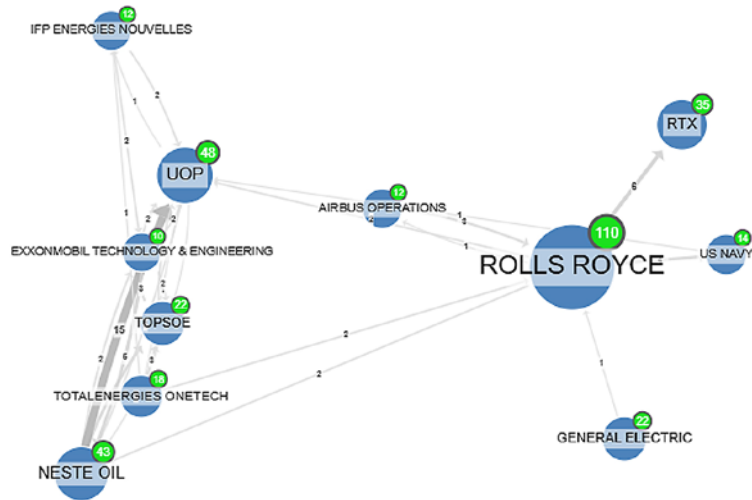
A análise das citações cruzadas entre famílias de patentes relacionadas a SAF fornece informações sobre os agentes que ocupam posições centrais no desenvolvimento tecnológico do setor. Em estudos de panorama de patentes, a frequência com que um portfólio é citado por outros requerentes é utilizada como indicador da relevância tecnológica e do grau de influência de determinado conjunto de invenções sobre pesquisas subsequentes.

No caso dos SAF, os dados mostram que empresas da indústria de motores aeronáuticos e companhias dos setores químico e de petróleo concentram o maior volume de citações recebidas. Esse resultado indica que suas inovações têm sido tomadas como referência por outros agentes, contribuindo para a definição de trajetórias de pesquisa e desenvolvimento em diferentes rotas tecnológicas.

Também se observam redes de interdependência tecnológica, formadas quando diferentes atores registram patentes que citam mutuamente invenções anteriores. Essas redes evidenciam um processo de inovação cumulativo, em que coexistem a competição entre rotas de produção e a necessidade de compatibilidade entre combustíveis e sistemas de propulsão.

A análise das citações cruzadas através da Figura 3, sugere que o campo de SAF evolui em direção a uma possível definição de padrões tecnológicos, resultado da interação entre fabricantes de motores, indústrias químicas e de energia, e instituições de pesquisa. Nessa configuração, compreender quais agentes são mais citados e quais áreas concentram maior interdependência é fundamental para antecipar potenciais lideranças tecnológicas e pontos de disputa em propriedade intelectual.

Fiaura 3 – Citações entre os atores



Fonte: Elaboração própria a partir de Questel ORBIT (2025).

4. CONCLUSÃO

Os resultados demonstram interesse crescente nos SAF, evidenciado pela trajetória ascendente da atividade de patenteamento observada principalmente após 2021, com forte aceleração em 2022 e pico em 2023. Essa tendência indica que os SAF se consolidam como um domínio tecnológico estratégico dentro da agenda mais ampla de descarbonização da aviação.

A análise também mostrou que a titularidade das patentes é altamente concentrada em um número reduzido de empresas, predominantemente dos setores de petróleo, químico e aeroespacial. Destacam-se os fabricantes de motores, como a Rolls-Royce, e grandes produtores de combustíveis, como Neste Oil e TotalEnergies, que ocupam posições centrais no panorama de patentes. Isso reflete tanto o papel crucial das tecnologias de produção de combustíveis quanto a necessidade de assegurar compatibilidade com os sistemas de propulsão aeronáutica. Cabe ressaltar que este estudo não contempla outras formas de proteção de propriedade intelectual, como segredos industriais, que também podem influenciar a dinâmica de inovação. Ainda assim, as evidências baseadas em patentes apontam para um cenário dominado por poucos atores-chave.

Do ponto de vista geográfico, Estados Unidos, China e Europa permanecem como os principais polos de depósitos, em consonância com suas capacidades industriais e ambientes regulatórios. Um resultado relevante, contudo, é a intensidade moderada a alta de depósitos no Brasil, o que distingue o país de outros mercados latino-americanos e de diversas economias emergentes. Esse padrão indica a importância estratégica do Brasil tanto como mercado quanto como potencial polo de produção futura de SAF, dado seu setor agrícola de grande escala e sua experiência consolidada em biocombustíveis.

Apesar desse posicionamento estratégico, a análise identificou ausência de participação significativa de empresas, universidades ou institutos de pesquisa nacionais no patenteamento relacionado a SAF. As patentes depositadas no Brasil são majoritariamente de origem estrangeira, ligadas a empresas com presença comercial ou industrial no país, mas sem evidência de pesquisa e desenvolvimento locais. Esse achado evidencia uma lacuna atual em termos de capacidades domésticas de inovação, mas também pode ser interpretado como janela de oportunidade. Considerando que o setor ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento, existe espaço para a entrada de novos agentes — tanto empresariais quanto institucionais.

Para o Brasil, cuja trajetória histórica em biocombustíveis e energias renováveis é reconhecida, assumir protagonismo no desenvolvimento de SAF representa uma progressão natural. Para alcançar esse papel, entretanto, será necessário o estabelecimento de políticas públicas direcionadas, o aumento dos investimentos estratégicos empresariais e a implementação de uma agenda coordenada de inovação, capaz de explorar as vantagens competitivas do país. O fortalecimento das capacidades de P&D e a formação de parcerias com líderes internacionais constituem passos essenciais para que o Brasil não apenas participe do mercado global de SAF, mas também possa exercer influência em sua configuração tecnológica e comercial futura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro concedido, o qual possibilitou a execução e desenvolvimento desta pesquisa e a consequente elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] ICAO, “Sustainable Aviation Fuels (SAF)”. Acessado: 22 de junho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx>
- [2] US DEPARTMENT OF ENERGY, “Alternative Fuels Data Center: Sustainable Aviation Fuel”. Acessado: 22 de junho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel>
- [3] V. Oltra e M. Saint Jean, “Variety of technological trajectories in low emission vehicles (LEVs): A patent data analysis”, *J Clean Prod*, vol. 17, no 2, p. 201–213, 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2008.04.023.
- [4] F. L. Barassa, Edgar, Consoni, “THE EVOLUTION OF ELECTRIC VEHICLE IN 21 CENTURY : PATENT DATA AS INDICATORS OF TECHNOLOGICAL Edgar Barassa”, 2015.
- [5] WIPO, “What is Intellectual Property?” Acessado: 30 de julho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.wipo.int/en/web/about-ip>
- [6] WIPO, “Patents What is a patent?” Acessado: 30 de julho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.wipo.int/en/web/patents>
- [7] I. N. da P. I. INPI, “O que é uma patente?” Acessado: 1o de junho de 2019. [Online]. Disponível em: <http://www.inpi.gov.br/servicos/perguntas-frequentes-paginas-internas/perguntas-frequentes-patente#patente>
- [8] G. Schmitt, J. Scott, A. Davis, e T. Utz, “Patents and progress; intellectual property showing the future of electric vehicles”, Montréal, Québec, Canada, EVS29 Symposium, 2016, p. 635–645.
- [9] B. L. Basberg, “Patents and the measurement of technological change: A survey of the literature”, *Res Policy*, vol. 16, no 2–4, p. 131–141, ago. 1987, doi: 10.1016/0048-7333(87)90027-8.
- [10] K. Pavitt, “Uses and Abuses of Patent Statistics”, em *Handbook of Quantitative Studies of Science and Technology*, A. F. J. van Raan, Org., Elsevier, 1988, p. 509–536.
- [11] M. N. de Oliveira et al., “Tracking Biofuel Innovation: A Graph-Based Analysis of Sustainable Aviation Fuel Patents”, *Energies (Basel)*, vol. 17, no 15, ago. 2024, doi: 10.3390/en17153683.
- [12] Organisation for Economic Co-operation and Development, *OECD Patent Statistics Manual*. 2009. doi: 10.1787/9789264056442-en.
- [13] Questel, “Orbit Intelligence”, 2025, Paris. Acessado: 30 de julho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.orbit.com/>



**Copel.
Energia de
sobra pra
acelerar o
seu negócio.**

Até **35%** de redução
na conta de luz da sua empresa.



Acesse o QRCode e saiba mais



COPEL
Pura Energia



A INDÚSTRIA REPRESENTA O MELHOR DE NÓS

Transformar o Paraná no melhor lugar para
a indústria é o propósito do Sistema Fiep.

A indústria vai muito além da produção.

É inclusão, inovação, educação e saúde.

É o orgulho de quem trabalha, a esperança de
quem aprende, o progresso de quem acredita.

A indústria representa o melhor de nós.

E o Sistema Fiep representa a indústria em todo o Paraná.



ACESSE
SISTEMAFIEP.COM.BR/REPRESENTA
E SAIBA MAIS!

**Sistema
Fiep**

FIEP
SESI
SENAI
IEL