

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL
INSTITUTO BRASILEIRO BIOENERGIA BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL**



**REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA
BIOGÁS BIOMETANO CO2 INDUSTRIAL
ABIB BRASIL 2026/ABRIL/MAIO/01**

REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA

BIOGÁS BIOMETANO CO2 INDUSTRIAL

REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA BIOGÁS BIOMETANO Publicação técnica e industrial desenvolvido pela Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro Bioenergia com o apoio técnico da Brasil Biomassa e Energia Renovável envolvendo uma matéria especial e artigos nacionais e internacionais sobre Biogás Biometano e CO2 industrial.

Editada pelo Comitê de Estudos da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro de Bioenergia e Desenvolvida pela equipe técnica e de consultoria da Brasil Biomassa e Energia Renovável

Editor Responsável Celso Oliveira

Copyright by Celso Marcelo de Oliveira

Conteúdo das publicações Revista: 1. Crise Climática e Energética e a Transição Energética Combustíveis Fósseis para Energia Renovável 2. Biomassa e Biogás para Reduções Emissões GEE 3. Transição Economia Competitiva, Circular, Resiliente e Neutra em Carbono 4. Análise dos tipos de biomassa como matéria-prima para a produção de Biogás e Biometano no Brasil 5. Análise detalhada do mercado de produção e consumo de Biogás e Biometano 6. Requisitos ambientais, certificações e permissões 7. Biogás e Biometano e

Crédito de Carbono 8. Avanços e Desafios recentes na Produção de Biogás e Biometano 9. Conversão Biogás e Biometano partir da Biomassa 10. Tecnologia de Produção de Biogás e Biometano 11 Mercado Internacional Biogás e Biometano 13. Artigos internacionais

Catalogação na Fonte Brasil e Portugal.

II. Título. CDU 621.3(81)"2030" : 338.28 CDU 620.95(81) CDD333.95 (1ed.)

Todos os direitos reservados a ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável

Nenhuma parte deste estudo pode ser reproduzida ou transmitida de qualquer forma ou meio, incluindo fotocópia, gravação ou informação, ou por meio eletrônico, sem a permissão ou autorização por escrito do autor. Lei 9.610, de 19 fevereiro 1998.

Edição eletrônica no Brasil e Portugal em versão eletrônica

© 2026 ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável

Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações internacionais são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.

Tradução dos artigos internacionais pelo Comitê de Estudos da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro de Bioenergia e Desenvolvida pela equipe técnica e de consultoria da Brasil Biomassa e Energia Renovável

Proibida a reprodução com ou sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio impresso e eletrônico.

Edição Bimensal Abril/Maio 2026 Total 459 páginas

Associação Brasileira das Indústrias Biomassa e Energia Renovável

Brasil Biomassa e Energia Renovável

Av. Candido Hartmann, 570 24 andar Conj. 243 Curitiba Paraná

Fone (41) 30406777 Whats Brasil Biomassa (41) 998173023

Plataforma digital Brasil Biomassa <https://www.brasilbiomassa.com/>

Editora Brasil Biomassa <https://www.editorabrasilbiomassa.com/>

E-mails diretoriabrasilbiomassa@gmail.com

REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA

BIOGÁS BIOMETANO CO₂ INDUSTRIAL

SUMÁRIO EXECUTIVO

APRESENTAÇÃO.....11

BIOREFINARIA BIOGÁS BIOMETANO BIOMASSA CANA-DE-AÇÚCAR....44

Estratégia Global Renovável

Setor sucroenergético brasileiro

Biomassa da Cana-de-açúcar

Biomassa de bagaço de cana-de-açúcar: composição e características

Composição Química e Características Estruturais

Visão geral das estratégias de pré-tratamento para a valorização do bagaço de cana-de-açúcar

Métodos físicos e termoquímicos

Métodos de pré-tratamento biológico

Deslignificação e Hidrólise Enzimáticas

Fermentação fúngica em estado sólido

Consórcios Microbianos e Fermentação Adaptativa

Abordagens de pré-tratamento integradas e combinadas

Pré-tratamento com água quente líquida (LHW) + solvente eutético profundo

Pré-tratamento com micro-ondas + DES ou líquidos iônicos

Pré-tratamento ácido + Sacarificação enzimática + Desintoxicação

Pré-tratamento Híbrido Biológico-Químico

Processos de fermentação aplicados ao bagaço

Sacarificação e Fermentação Simultâneas

Sacarificação e cofermentação simultâneas

Otimização do processo e integração com o pré-tratamento

Inovações Tecnológicas e Integração de Processos

Integração da produção de etanol de primeira e segunda geração

Estratégias de Coprodutos e Recuperação de Energia

Biorefinaria Cana-de-açúcar

Biopolímeros

Bioetanol Segunda Geração

Biogás, Biometano, Biofertilizantes, CO₂ industrial, Amônia e Hidrogênio baixo carbono

Gaseificação de Biomassa da Cana-de-açúcar

Biocarbono e Biochar

Hidrogênio verde

Tecnologia de aproveitamento da palha da cana-de-açúcar para a produção de Biochar (extrato pirolenhoso e vinagre da madeira) para sequestro de carbono, fertilizante ecológico e para agricultura regenerativa

Tecnologia de aproveitamento da vinhaça e da torta de filtro da cana-de-açúcar para a produção de Biometano

Tecnologia de aproveitamento palha e bagaço da cana-de-açúcar para a produção de Biopellets

Tecnologia Bioenergia da Cana-de-açúcar com Captura e Armazenamento de Carbono

Tecnologia Biocarvão/Biocarbono Bio-óleo e Gás sintético com uso da biomassa da cana-de-açúcar

Tecnologia de Hidrogênio Verde com uso do bagaço da cana-de-açúcar

BIOGÁS BIOMETANO SUBSTITUTO GÁS NATURAL.....95

Introdução

Biomassa como fonte de energia

Biogás e Biometano X Gás Natural

Vantagens da Energia de biomassa, biogás e biometano

Tecnologias de conversão de biomassa

Processo de conversão de biomassa

Combustão direta	
Processo termoquímico	
Processo bioquímico	
Produção Biogás com Substratos de Biomassa	
Processo de biometanização	
Limpeza de biogás	
Atualização de biogás	
Oportunidades para uma economia de base biológica gás natural verde	
Livros Biogás Biometano	116

ARTIGOS INTERNACIONAL

Tecnologias de purificação e engarrafamento de biogás: análise crítica..	117
Resumo	
Introdução	
Tipos de tecnologias de purificação de biogás	
Os principais desafios na otimização do desempenho de uma planta de purificação de biogás.	
Comparação de tecnologias de biogás	
Engarrafamento de biogás	
Conclusões	
Referências	

Integração utilização de biogás em sistemas aquecimento urbano.....171

Resumo

Introdução

Métodos e Metodologia

Resultados

Discussão/Conclusões

Referências

Biogás à base de resíduos animais rumo ao fechamento do ciclo nos países da União Europeia.....205

Resumo

Introdução

Biomassa animal na economia circular

A situação na União Europeia

Materiais e métodos

Resultados

Discussão

Conclusões

Referências

Estado atual e perspectivas da produção e utilização de biometano — uma revisão sistemática.....	251

Resumo

Introdução

Materiais e métodos

Métodos de produção de biometano e sua aplicação prática

Alternativas para aplicações do biometano

Evolução e Perspectivas do Mercado de Biometano

Benefícios do biometano e barreiras ao seu desenvolvimento

Conclusões

Referências

Avaliação do potencial de produção de biometano na Espanha: uma análise regional de resíduos agrícolas, resíduos urbanos e lodo de esgoto para 2030 e 2050.....	361

Resumo

Introdução

Materiais e métodos

Resultados

Discussão

REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA BIOGÁS BIOMETANO CO2 INDUSTRIAL APRESENTAÇÃO



Em nome da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e Brasil Biomassa e Energia Renovável e dos numerosos colaboradores que consolidaram no desenvolvimento da primeira Revista Brasileira Bioenergia Biogás Biometano e CO2 Industrial que tem por objetivo uma avaliação pormenorizada dos estudos técnicos e projetos e do potencial de produção de Biogás e Biometano para um futuro de baixo carbono nos setores industriais mais intensivos em calor no Brasil.

As alterações climáticas apresentam-se como um dos maiores desafios para a humanidade neste século. Vivemos numa época onde somos sobrecarregados com informações sobre o impacto dos combustíveis fósseis no nosso planeta, que podem ter consequências negativas sobre a atividade humana, ao nível social, económico e ambiental.

O aumento populacional aumentou a demanda energética e, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), até 2030, a demanda energética poderá aumentar em 50% globalmente.

As fontes de energia mais exploradas no mundo são os combustíveis fósseis e seus derivados . O uso excessivo desses combustíveis aumenta os gases de efeito estufa (GEE), como o CO₂, que, por sua vez, têm um efeito notável no aquecimento global e nas mudanças climáticas.

Para lidar com esta questão, a substituição de fontes de energia convencionais por fontes de energia amigas do ambiente é crucial. A substituição a longo prazo de combustíveis fósseis pode ser conseguida através do uso melhorado de opções de energia sustentável no mix energético.

Nos últimos anos, um número crescente de países se comprometeu a atingir emissões líquidas zero. Até abril de 2022, 131 países cobrindo 88% das emissões globais de gases de efeito estufa anunciaram metas líquidas zero.

As emissões antropogênicas já levaram a um aumento da temperatura global de 1,1 °C em comparação aos níveis pré-industriais.

Há um amplo entendimento de que o zero líquido até 2050 é fundamental para aumentar as chances de manter esse aumento de temperatura dentro de 1,5 °C. Esse foco renovado significa que as emissões de todos os usos finais de energia precisam ser mitigadas.

A energia desempenha um papel fundamental tanto na vida dos seres humanos quanto no desenvolvimento das economias. Nas últimas décadas, o progresso tecnológico determinou uma mudança relevante nos estilos de vida das pessoas. Além disso, o aumento da população humana, bem como o desenvolvimento industrial em geral, levaram a um aumento exponencial na demanda global de energia.

Particularmente, as reservas de energia se esgotarão nas próximas décadas devido ao aumento da demanda energética. Portanto, os setores energéticos mundiais precisam identificar novas fontes alternativas de energia para substituir os combustíveis fósseis. Isso também é fundamental do ponto de vista ambiental. De fato, está bem documentado que os combustíveis fósseis são as fontes mais importantes de poluição e aquecimento global, causados principalmente pela produção de CO₂ e compostos de enxofre.

No entanto, os combustíveis fósseis (por exemplo, carvão, petróleo, gás) ainda são utilizados em todo o mundo devido aos avanços tecnológicos, econômicos e sociais relevantes. As recentes crises energéticas e a perspectiva do quase esgotamento das reservas de combustíveis fósseis ou não renováveis levaram os países industrializados a promover a produção de energia renovável, a geração distribuída e intervenções de eficiência energética.

Atualmente, uma prioridade global para o desenvolvimento sustentável é o acesso à energia renovável e outras questões energéticas (por exemplo, a eficiência energética).

A transição para sistemas energéticos mais eficientes requer ações que envolvam todos os níveis políticos, do local ao global.

O biogás é uma mistura de metano, CO_2 e pequenas quantidades de outros gases, produzida pela digestão anaeróbica da matéria orgânica em um ambiente sem oxigênio. A composição precisa do biogás depende do tipo de matéria-prima e do método de produção; estes incluem as seguintes tecnologias principais:

Biodigestores : São sistemas herméticos (por exemplo, recipientes ou tanques) nos quais a matéria orgânica, diluída em água, é decomposta por microrganismos naturais. Contaminantes e umidade são geralmente removidos antes do uso do biogás.

Sistemas de recuperação de biogás de aterro : A decomposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) em condições anaeróbicas em aterros sanitários produz biogás. Este pode ser capturado utilizando tubulações e poços de extração, juntamente com compressores, para induzir o fluxo até um ponto de coleta central.

Estações de tratamento de águas residuais: Essas estações podem ser equipadas para recuperar matéria orgânica, sólidos e nutrientes como nitrogênio e fósforo do lodo de esgoto.

Com tratamento adicional, o lodo de esgoto pode ser utilizado como insumo para a produção de biogás em um digestor anaeróbio.

O teor de metano no biogás varia tipicamente de 45% a 75% em volume, sendo a maior parte do restante CO_2 . Essa variação significa que o conteúdo energético do biogás pode variar; o poder calorífico inferior (PCI) situa-se entre 16 megajoules por metro cúbico (MJ/m^3) e 28 MJ/m^3 .

O biogás pode ser usado diretamente para produzir eletricidade e calor ou como fonte de energia para cozinhar.

O biometano (também conhecido como “gás natural renovável”) é uma fonte quase pura de metano produzida por meio do “aprimoramento” do biogás (um processo que remove o CO_2 e outros contaminantes presentes no biogás) ou pela gaseificação da biomassa sólida seguida de metanação:

Aprimoramento do biogás : Este processo representa cerca de 90% do biometano produzido mundialmente hoje. As tecnologias de aprimoramento utilizam as diferentes propriedades dos vários gases contidos no biogás para separá-los, sendo a lavagem com água e a separação por membrana responsáveis por quase 60% da produção global de biometano atualmente (Cedigaz, 2019).

Gaseificação térmica de biomassa sólida seguida de metanação : A biomassa lenhosa é inicialmente decomposta a alta temperatura (entre $700\text{--}800^\circ\text{C}$) e alta pressão em um ambiente com baixo teor de oxigênio.

Nessas condições, a biomassa é convertida em uma mistura de gases, principalmente monóxido de carbono, hidrogênio e metano (às vezes chamada coletivamente de gás de síntese). Para produzir um fluxo puro de biometano, esse gás de síntese é purificado para remover quaisquer componentes ácidos e corrosivos. O processo de metanação utiliza um catalisador para promover a reação entre o hidrogênio e o monóxido de carbono ou CO_2 para produzir metano. Qualquer CO_2 ou água remanescente é removido ao final desse processo.

O biometano tem um poder calorífico inferior (PCI) de cerca de 36 MJ/m^3 . É indistinguível do gás natural e, portanto, pode ser usado sem a necessidade de quaisquer alterações na infraestrutura de transmissão e distribuição ou nos equipamentos do usuário final, sendo totalmente compatível com o uso em veículos movidos a gás natural. Uma grande variedade de matérias-primas pode ser usada para produzir biogás. Para este relatório, os diferentes tipos de resíduos ou rejeitos foram agrupados em quatro categorias principais de matérias-primas: resíduos agrícolas; esterco animal; a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, incluindo resíduos industriais; e lodo de esgoto.

Resíduos de colheita: Resíduos da colheita de trigo, milho, arroz, outros cereais de grãos grossos, beterraba sacarina, cana-de-açúcar, soja e outras oleaginosas. Este relatório incluiu culturas sequenciais, cultivadas entre duas colheitas como uma solução de manejo do solo que ajuda a preservar a fertilidade do solo, reter carbono no solo e evitar a erosão; estas não competem por terras agrícolas com culturas destinadas à alimentação humana ou animal.

Esterco animal: proveniente de animais de criação, incluindo bovinos, suínos, aves e ovinos.

Fração orgânica dos RSU: Resíduos alimentares e vegetais (ex.: folhas e relva), papel e cartão e madeira que não seja reaproveitada (ex.: para compostagem ou reciclagem). RSU1 Inclui também alguns resíduos industriais da indústria de processamento de alimentos.

Lodo de esgoto: Matéria orgânica semissólida recuperada na forma de gás de esgoto em estações de tratamento de esgoto municipais.

Culturas energéticas específicas, ou seja, culturas de baixo custo e baixa manutenção cultivadas exclusivamente para a produção de energia em vez de alimentos, desempenharam um papel importante no aumento da produção de biogás em algumas partes do mundo, principalmente na Alemanha. No entanto, elas também geraram um debate acirrado sobre os potenciais impactos no uso da terra, portanto, não são consideradas na avaliação do potencial de fornecimento sustentável deste relatório.

A utilização de resíduos como matéria-prima evita os problemas de uso da terra associados às culturas energéticas. Estas, por sua vez, requerem fertilizantes (normalmente produzidos a partir de combustíveis fósseis), o que precisa ser levado em consideração na avaliação das emissões do ciclo de vida de diferentes vias de produção de biogás. A utilização de resíduos como matéria-prima permite capturar o metano que, de outra forma, escaparia para a atmosfera durante a decomposição.

A maior parte da produção de biometano provém do aprimoramento do biogás, portanto, as matérias-primas são as mesmas descritas anteriormente. No entanto, a rota de gaseificação para a produção de biometano pode utilizar biomassa lenhosa (além de resíduos sólidos urbanos e resíduos agrícolas) como matéria-prima, que consiste em resíduos da gestão florestal e do processamento da madeira.

O desenvolvimento do biogás tem sido desigual em todo o mundo, pois depende não apenas da disponibilidade de matérias-primas, mas também de políticas que incentivem sua produção e uso. A Europa, a República Popular da China (doravante, “China”) e os Estados Unidos respondem por 90% da produção mundial.

A reforma da política energética e a subsequente legislação e regulamentação a nível nacional têm proporcionado um forte incentivo ao desenvolvimento de tecnologias de geração de energia renovável cada vez mais competitivas. A União Europeia, de fato, estabeleceu uma série de regulamentações para atingir o seu objetivo de alcançar “zero emissões líquidas de gases com efeito de estufa até 2050”.

A transição de combustíveis fósseis sem carbono em setores chave, como a indústria, os transportes, a agricultura e outros, será apoiada pelo plano de investimento do Pacto Ecológico Europeu. Com esta nova iniciativa da Comissão Europeia, a União Europeia pretende ser o primeiro continente neutro em termos climáticos até 2050.

Nessa perspectiva, a cooperação entre a Comissão Europeia, os países membros da UE e as partes interessadas permitirá alcançar a neutralidade climática.

A transição para energias renováveis, juntamente com um setor industrial descarbonizado, pode ser concluída antes de 2050, se os investimentos a partir de 2030 forem sustentáveis e a eletricidade da rede for totalmente descarbonizada.

Infelizmente, o meio ambiente sofre atualmente com problemas como diversas crises energéticas, esgotamento dos recursos de combustíveis fósseis, altos custos e poluição ambiental. Particularmente, a crise energética é uma das questões que impôs muitas mudanças no desenvolvimento de várias tecnologias em todo o mundo e exige políticas e governança sobre os recursos energéticos. A cada ano, a renovação dessas crises tem levado vários países a recorrer a fontes alternativas, como as energias renováveis.

Além disso, eventos recentes, como a guerra na Ucrânia, evidenciaram o problema da autossuficiência nacional no fornecimento de energia para alguns países. Por vezes, a sociedade, de fato, não consegue gerir os efeitos decrescentes e controláveis das grandes atividades industriais sobre as necessidades energéticas.

A economia circular e a bioeconomia são perspectivas para abordar esses desafios e alcançar metas ambientais e socioeconômicas em todo o mundo.

Assim, a geração de energia a partir de fontes alternativas contribuirá para a mitigação das mudanças climáticas e a minimização dos riscos ao meio ambiente, proporcionando, de modo a, um ambiente limpo e sustentável para a nossa sociedade moderna. Recentemente, a comunidade científica tem se dedicado significativamente a este tema, que se tornou uma questão de grande preocupação.

De fato, as perspectivas para o biogás e o biometano, bem como seus métodos de geração, aumentaram exponencialmente, sempre visando o desenvolvimento de energia sustentável em apoio à transição verde.

Esta Revista tem como objetivo examinar o potencial da “energia renovável”, destacando as tendências e abordagens atuais dos processos de produção de biogás e biometano. A Revista também se concentra no potencial para alcançar objetivos definidos para o desenvolvimento sustentável, de forma a atender às necessidades ambientais, sociais e econômicas.

Além disso, a revisão fornece uma visão geral abrangente dos processos de produção de biogás e biometano, avaliando as diferentes opções de substrato que resultam em rendimento rentável, a fim de fornecer uma base para futuras investigações. Embora a eficiência energética, a eletrificação e as energias renováveis possam atingir 70% da mitigação necessária, o Biogás e Biometano será necessário para descarbonizar os usos finais onde outras opções são menos maduras ou mais caras, como indústria pesada, transporte de longa distância e armazenamento sazonal de energia.

Considerando essas aplicações, o hidrogênio pode contribuir com 10% da mitigação necessária para atingir o Cenário de 1,5 °C e 12% da demanda final de energia .

Espera-se que o mercado de biogás registre um CAGR de mais de 4,5% durante o período 2025-2027. Com potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 18-20% da atual emissão de gases de efeito estufa de 4.360 Mt CO₂ e com potencial para atender 19% da demanda global de eletricidade até 2050.

A previsão é do relatório divulgado pela Fortune Business Insights, que estima que o mercado global das usinas de biogás deverá representar US\$ 7,71 bilhões em 2027.

O volume potencial de 458 milhões de MMBTu (milhão de BTUs) seria equivalente a cerca de 25% a 30% da demanda de gás natural até 2030.

Com expansão registrada em vários países, por conta de sua viabilidade econômica como combustível renovável, há hoje no mundo 1.020 plantas de biometano, segundo estudo de mercado da Associação Internacional de Gás Natural (Cedigaz). Embora a maior parte da produção esteja centralizada na Europa, com 2 bilhões de m³ de biometano, há tendência de globalização no gás natural renovável.

A Europa é atualmente a maior produtora de biogás. A Alemanha é, de longe, o maior mercado, abrigando dois terços da capacidade instalada de usinas de biogás na Europa.

As culturas energéticas foram a principal matéria-prima que sustentou o crescimento da indústria de biogás na Alemanha, mas as políticas recentes têm se voltado mais para o uso de resíduos agrícolas, cultivos sequenciais, dejetos animais e a captura de metano em aterros sanitários. Outros países, como Dinamarca, França, Itália e Holanda, têm promovido ativamente a produção de biogás.

Na China , políticas têm apoiado a instalação de biodigestores domésticos em áreas rurais com o objetivo de aumentar o acesso à energia moderna e a combustíveis limpos para cozinhar; esses biodigestores representam cerca de 70% da capacidade instalada de biogás atualmente.

Diferentes programas foram anunciados para apoiar a instalação de usinas de cogeração em larga escala (ou seja, usinas que produzem calor e energia). Além disso, a Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma da China publicou um documento de orientação especificamente sobre a industrialização do biogás e seu aprimoramento para biometano, apoiando também o uso de biometano no setor de transportes.

Nos Estados Unidos , a principal via de produção de biogás tem sido a coleta de gás em aterros sanitários, que hoje responde por quase 90% da produção nacional. Há também um crescente interesse na produção de biogás a partir de resíduos agrícolas, visto que o mercado interno de gado é responsável por quase um terço das emissões de metano nos Estados Unidos (USDA, 2016). Os Estados Unidos também lideram globalmente o uso de biometano no setor de transportes, graças ao apoio tanto estadual quanto federal.

Cerca de metade da produção restante provém de países em desenvolvimento da Ásia, principalmente da Tailândia e da Índia . A remuneração através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) foi um fator chave para esse crescimento, especialmente entre 2007 e 2011. O desenvolvimento de novos projetos de biogás caiu drasticamente após 2011, à medida que o valor dos créditos de redução de emissões concedidos pelo MDL diminuiu. A Tailândia produz biogás a partir dos resíduos do setor de fécula de mandioca, da indústria de biocombustíveis e da criação de suínos. A Índia pretende desenvolver cerca de 5.000 novas usinas de biogás comprimido nos próximos cinco anos (GMI, 2019).

A Argentina e o Brasil também têm apoiado o biogás por meio de leilões; no Brasil, a maior parte da produção provém de aterros sanitários, mas também existe potencial na vinhaça, um subproduto da indústria do etanol.

A falta de dados dificulta a obtenção de um panorama claro do consumo atual de biogás na África , mas seu uso tem se concentrado em países com programas de apoio específicos. Alguns governos, como Benin, Burkina Faso e Etiópia, oferecem subsídios que podem cobrir de metade a todo o investimento, enquanto inúmeros projetos promovidos por organizações não governamentais fornecem conhecimento prático e subsídios para reduzir o custo líquido do investimento. Além desses subsídios, as linhas de crédito têm avançado em alguns países, notadamente um recente acordo de arrendamento com opção de compra no Quênia, que financiou quase metade das instalações de biodigestores.

Quase dois terços da produção de biogás foram utilizados para gerar eletricidade e calor (com uma divisão aproximadamente igual entre instalações de geração exclusiva de eletricidade e instalações de cogeração).

Cerca de 30% foram consumidos em edifícios, principalmente no setor residencial para cozinhar e aquecer, e o restante foi transformado em biometano e misturado às redes de gás ou utilizado como combustível para transporte.

Atualmente, existem cerca de 18 GW de capacidade instalada de geração de energia a partir de biogás em todo o mundo, a maior parte localizada na Alemanha, nos Estados Unidos e no Reino Unido.

Essa capacidade cresceu, em média, 4% ao ano entre 2010 e 2018. Nos últimos anos, a implantação nos Estados Unidos e em alguns países europeus diminuiu, principalmente devido a mudanças nas políticas de incentivo, embora o crescimento tenha começado a se recuperar em outros mercados, como a China e a Turquia.

O custo nivelado da geração de eletricidade a partir de biogás varia de acordo com as matérias-primas utilizadas e a sofisticação da usina, oscilando entre US\$ 50 por megawatt-hora (MWh) e US\$ 190/MWh.

Uma parte substancial dessa faixa de valores é superior ao custo de geração a partir de energia eólica e solar fotovoltaica (FV) em escala de utilidade pública, cujos custos diminuam acentuadamente nos últimos anos.

Os custos relativamente elevados da geração de energia a partir de biogás significam que a transição de tarifas de incentivo para estruturas de leilão de eletricidade renovável tecnologicamente neutras (como os contratos de compra de energia) em muitos países pode limitar as perspectivas futuras de usinas de biogás voltadas exclusivamente para a geração de eletricidade.

No entanto, ao contrário da energia eólica e solar fotovoltaica, as usinas de biogás podem operar de forma flexível e, assim, fornecer serviços de balanceamento e outros serviços auxiliares à rede elétrica. Reconhecer o valor desses serviços ajudaria a impulsionar as perspectivas de implantação futura de usinas de biogás.

Onde houver disponibilidade de aproveitamento local do calor, a viabilidade econômica da cogeração de biogás é mais forte do que a de uma usina exclusivamente elétrica.

Isso ocorre porque a cogeração pode proporcionar um nível mais elevado de eficiência energética, com cerca de 35% da energia do biogás utilizada para gerar eletricidade e outros 40 a 50% do calor residual sendo aproveitados de forma produtiva.

Certos subsetores industriais, como o de alimentos e bebidas e o de produtos químicos, produzem resíduos úmidos com alto teor orgânico, que constituem matéria-prima adequada para a digestão anaeróbica. Nesses setores, a produção de biogás pode ainda oferecer o benefício adicional de tratar os resíduos e, ao mesmo tempo, fornecer calor e eletricidade no local.

Por ora, uma parcela relativamente pequena, mas crescente, do biogás produzido mundialmente é transformada em biometano. Essa área possui um potencial significativo de crescimento, embora – como detalhado nas seções subsequentes deste relatório – isso dependa fortemente da robustez e da concepção de políticas voltadas à descarbonização do fornecimento de gás em diferentes partes do mundo.

A indústria do biometano é atualmente muito pequena, embora esteja gerando crescente interesse em diversos países devido ao seu potencial para fornecer energia limpa a uma ampla gama de usuários finais, especialmente quando isso pode ser feito utilizando a infraestrutura existente. Atualmente, são produzidos cerca de 3,5 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) de biometano em todo o mundo. A grande maioria da produção concentra-se nos mercados europeu e norte-americano, com alguns países, como a Dinamarca e a Suécia, detendo mais de 10% da participação do biogás/biometano no total das vendas de gás.

O biometano representa cerca de 0,1% da demanda de gás natural atualmente; no entanto, um número crescente de políticas governamentais apoia sua injeção nas redes de gás natural e sua utilização para a descarbonização do transporte. Por exemplo, Alemanha, Itália, Holanda e Reino Unido já implementaram medidas de apoio ao biometano no setor de transportes. O programa RenovaBio, no Brasil, tem como meta reduzir a intensidade de carbono dos combustíveis no setor de transportes em 10% até 2028.

Iniciativas subnacionais também estão surgindo, como os padrões de combustíveis de baixo carbono no estado da Califórnia, nos EUA, e na Colúmbia Britânica, no Canadá.

A porcentagem de biogás produzido que é purificado varia bastante entre as regiões: na América do Norte, gira em torno de 15%, enquanto na América do Sul é superior a 35%; na Europa, região que mais produz biogás e biometano, cerca de 10% da produção de biogás é purificada (embora em países como Dinamarca e Suécia as porcentagens sejam muito maiores); na Ásia, o índice é de 2%.

O principal coproduto do aprimoramento do biogás é o CO_2 , que é produzido em forma relativamente concentrada e, portanto, pode ser usado para fins industriais ou agrícolas, ou combinado com hidrogênio para gerar um fluxo adicional de metano. Outra opção seria armazená-lo no subsolo, caso em que o biometano seria uma fonte de energia com emissão negativa de CO_2 .

Como mencionado anteriormente, o método alternativo para produzir biometano é a gaseificação térmica da biomassa.

Existem diversas usinas de gaseificação de biomassa em operação atualmente, mas a maioria delas está em escala de demonstração, produzindo volumes relativamente pequenos. Algumas dessas usinas têm enfrentado dificuldades para alcançar uma operação estável, devido à qualidade e quantidade variáveis da matéria-prima.

Por ser uma tecnologia menos madura que a digestão anaeróbica, a gaseificação térmica oferece, sem dúvida, maior potencial para inovação tecnológica e redução de custos. As perspectivas seriam ainda melhores se as empresas produtoras de gás já estabelecidas investissem recursos em seu desenvolvimento, visto que essa tecnologia parece mais adequada ao seu conhecimento e expertise técnica.

O crescente interesse no biometano significa que o número de usinas em operação no mundo (tanto de purificação de biogás quanto de gaseificação de biomassa) deverá ultrapassar 1.000 ao longo de 2020. Cerca de 60% das usinas atualmente em operação e em desenvolvimento injetam biometano na rede de distribuição de gás, com outros 20% fornecendo combustível para veículos. O restante fornece metano para uma variedade de usos finais locais.

A bioenergia representa cerca de 10% da demanda mundial de energia primária atualmente. Ela pode ser consumida em forma sólida, líquida ou gasosa, sendo que o uso mais comum da bioenergia hoje em dia é a biomassa sólida (cerca de 90%).

O uso de biomassa sólida é geralmente categorizado como “tradicional” ou “moderno”, e atualmente a demanda está dividida quase igualmente entre os dois.

A biomassa moderna depende de tecnologias mais avançadas, principalmente na geração de eletricidade e em aplicações industriais, que utilizam combustíveis aprimorados, como lascas e pellets de madeira.

O uso tradicional refere-se à queima de biomassa sólida, como madeira, carvão vegetal, resíduos agrícolas e esterco animal, para cozinhar ou aquecer, utilizando tecnologias básicas, como fogões de três pedras. Com baixas taxas de conversão e impactos negativos significativos na saúde devido à poluição do ar em ambientes fechados, muitas economias em desenvolvimento estão tentando mudar o consumo, afastando-o do uso tradicional.

A diferenciação entre tradicional e moderno não se aplica à bioenergia líquida e gasosa, visto que ambas são produzidas utilizando tecnologias avançadas. Os biocombustíveis líquidos representam cerca de 7% da demanda total de bioenergia atualmente.

Os biocombustíveis são a principal fonte de energia renovável utilizada diretamente no setor de transportes, com um consumo de aproximadamente 90 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe), ou quase 2 milhões de barris de petróleo equivalente por dia, em 2018.

Cerca de 70% dos biocombustíveis consumidos hoje são bioetanol, que geralmente é misturado à gasolina; a maior parte do restante é biodiesel.

Atualmente, o biogás e o biometano representam menos de 3% da demanda total de bioenergia e uma parcela ainda menor, de 0,3%, do total da energia primária.

No entanto, há razões para acreditar que esses gases de baixo carbono poderão ganhar uma posição mais sólida no futuro.

Eles podem proporcionar os benefícios sistêmicos do gás natural (armazenamento, flexibilidade, aquecimento em alta temperatura) sem emissões líquidas de carbono. À medida que as economias se descarbonizam, esse se torna um atributo crucial.

O biogás fornece um suprimento sustentável de calor e energia que pode atender comunidades que buscam fontes de energia locais e descentralizadas, além de ser um combustível valioso para cozinhar em países em desenvolvimento.

O benefício da redução de gases de efeito estufa é amplificado pelo processamento e uso do metano (um potente gás de efeito estufa) que, de outra forma, poderia ser liberado na atmosfera pela decomposição de subprodutos orgânicos e resíduos.

O biogás e o biometano também podem desempenhar um papel importante na gestão de resíduos, melhorando a eficiência geral dos recursos.

Nos casos em que substitui o gás transportado ou importado por longas distâncias, o biogás e o biometano também proporcionam benefícios em termos de segurança energética.

Há também considerações mais amplas, não relacionadas à energia, como a reciclagem de nutrientes, a criação de empregos rurais ou a redução do tempo gasto em comunidades de baixa renda coletando lenha. Tanto o biogás quanto o biometano podem ser desenvolvidos em larga escala por meio de parcerias entre os setores de energia e agricultura.

Ao transformar uma variedade de resíduos orgânicos em produtos de maior valor agregado, o biogás e o biometano se encaixam bem no conceito de economia circular.

A energia renovável permite reduzir as emissões e retardar o esgotamento dos combustíveis fósseis. Além disso, a pesquisa contínua, juntamente com os desenvolvimentos tecnológicos neste campo, ajudou o investimento e a implantação de tecnologias de energia limpa a crescer em todo o mundo. Uma opção plausível e estabelecida de conversão de resíduos em energia que tem sido amplamente adotada é a produção de biogás a partir de fluxos de resíduos ricos em orgânicos (biomassa da cana-de-açúcar como a vinhaça).

Por meio de processo ou tecnologia de digestão anaeróbica e convertê-lo em biogás contendo CH₄.

O biogás contém 40–75% CH₄ e 15–60% CO₂ (por volume), com pequenas quantidades de hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), oxigênio (O₂), e água (H₂O).

O biogás tem uma ampla variedade de aplicações, incluindo como substituto do gás natural e óleo de aquecimento, uma atualização para utilização como combustível de transporte e uso na produção de calor e eletricidade usando a tecnologia combinada de calor e energia.

A produção de biogás é uma tecnologia bem estabelecida principalmente para a geração de energia renovável e também para a valorização de resíduos orgânicos como a vinhaça da cana-de-açúcar.

O biogás é o produto final de um processo mediado por via biológica, a chamada digestão anaeróbia, em que diferentes microrganismos seguem diversas vias metabólicas para decompor a matéria orgânica.

A digestão anaeróbia de culturas energéticas como da cana-de-açúcar é de interesse crescente para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e facilitar o desenvolvimento sustentável do fornecimento de energia.

O tratamento anaeróbico (fermentação) minimiza a sobrevivência de patógenos, o que é importante para usar o resíduo digerido como um fertilizante. Valioso (amônia) devido ao aumento da disponibilidade de nitrogênio e ao melhor efeito de fertilização a curto prazo.

Atualmente, o setor de biogás está crescendo rapidamente e novas conquistas criam a base para a constituição de usinas de biogás como fábricas avançadas de bioenergia.

Nesse contexto, as usinas de biogás são a base de um conceito de economia circular voltado para a reciclagem de nutrientes, redução de emissões de gases de efeito estufa e para fins de biorrefinaria. A produção de biometano fornece uma fonte de energia renovável, pois o metano pode ser usado para substituir combustíveis fósseis na geração de calor e energia e como combustível veicular.

Acredita-se que o biogás (biometano) criado através da biomassa da cana-de-açúcar seja a base do futuro fornecimento de energia. O biogás e o biometano podem substituir os combustíveis tradicionais para fornecer calor e eletricidade.

O biogás e o biometano são utilizados em diversas áreas, incluindo aplicações automotivas, geração de energia e fabricação de produtos químicos e materiais.

Além disso, os resíduos secundários, que são um subproduto deste processo, são um fertilizante agrícola de alto valor, amônia verde, hidrogênio e gás carbônico industrial.

A geração de biogás usando digestão anaeróbica (AD) tem benefícios substanciais em relação a outros métodos de produção de bioenergia.

Importante destacar o exemplo de sustentabilidade da planta de biogás da Raízen que consolida portfólio de energias renováveis. Com capacidade instalada de 21 MW, unidade no interior de São Paulo produzirá energia elétrica por meio de vinhaça e torta de filtro, subprodutos da cana-de-açúcar

A unidade em Guariba é fruto da joint venture entre a Raízen e a Geo Energética, a Raízen Geo Biogás S.A., com foco na produção de biogás a partir de resíduos agrícolas. Construída junto à usina Bonfim, unidade da Raízen com uma moagem de mais de 5 milhões de toneladas de cana por ano que gera elevado volume de vinhaça e torta de filtro e atendem às necessidades de um projeto de biogás em escala comercial, a vinhaça será operada na safra e a torta, ao longo do ano inteiro. A expectativa é que essa combinação chegará em uma produção na ordem de 138 mil MWh. A planta de 363.000 m² (36,3 hectares) e 153.1000 m² de área construída, contou com investimento de R\$ 153 milhões.

O projeto representa uma revolução no tratamento dos resíduos agroindustriais, consolidando a prática de economia circular adotada em seus processos produtivos.

Recentemente, a unidade recebeu autorização da CPFL e ANEEL para comercializar energia. Com a autorização, a planta passou a fornecer a energia gerada ao grid. Dos 138 mil MWh por ano de capacidade instalada, 96 mil MWh serão vendidos dentro de um contrato negociado em leilão em 2016 do qual a Raízen foi a vencedora. O valor excedente de energia poderá ser negociado no mercado livre ou outros contratos.

A energia gerada por biogás pode ser produzida durante o ano inteiro, o que oferece estabilidade energética para o sistema elétrico nacional e impacta o desenvolvimento econômico do País de maneira sustentável. da indústria para sustentabilidade em seu núcleo.

Com expansão registrada em vários países, por conta de sua viabilidade econômica como combustível renovável, há hoje no mundo 1.020 plantas de biometano, segundo estudo de mercado da Associação Internacional de Gás Natural (Cedigaz). Embora a maior parte da produção esteja centralizada na Europa, com 2 bilhões de m³ de biometano, há tendência de globalização no gás natural renovável. Nesse ponto, o destaque fica por conta dos Estados Unidos, que expande o uso do biometano para uso veicular, e os planos em ação de China, Índia e Brasil, que criam regulamentações e metas de uso do combustível renovável.

A onda das biorrefinarias e da economia circular trouxe um novo impulso para integrar o processamento de vinhaça nas destilarias autônomas existentes ou anexas.

Esta tendência também se alinha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, mais diretamente com o ODS7 (Energia Limpa e Acessível) e o ODS 13 (Ação Climática), com potencial para aumentar a recuperação de energia verde armazenada na cana-de-açúcar.

A produção de etanol de cana-de-açúcar gera cerca de 360 bilhões de litros de vinhaça, um efluente líquido com demanda química média de oxigênio de 46 mil mg/L. A vinhaça ainda contém cerca de 11% da energia original do caldo da cana, mas essa energia química é diluída. Esse resíduo, geralmente descartado ou aplicado na fertirrigação, é um substrato adequado para digestão anaeróbia. Com potencial de biometano variando de 215 a 324 L de metano produzido por quilograma de matéria orgânica na vinhaça.

A digestão anaeróbica é um processo natural e onipresente onde uma comunidade microbiana trabalha sinergicamente, convertendo o carbono orgânico disponível em metano e dióxido de carbono. Este processo pode ser explicado em quatro etapas: hidrólise , acidogênese , acetogênese e metanogênese. A mistura gasosa produzida é comumente denominada biogás , contendo 60–70% de metano e 30–40% de dióxido de carbono.

Gases residuais, como hidrogênio e sulfeto de hidrogênio, também podem ser encontrados em pequenas quantidades.

A fração purificada, após absorção de CO₂ e, portanto, com maior concentração de metano, é denominada biometano . Esta fração pode ser pura o suficiente para ser alimentada em gasodutos de gás natural.

Dados da ABiogás indicam potencial de produção de biogás (biometano) do setor sucroenergético de 39,8 bilhões de Nm³ por ano, considerando vinhaça, torta de filtro, bagaço e palha. Atualmente são gerados 135 milhões de Nm³ de biogás por ano, considerando quatro usinas em operação no país, ou seja, é aproveitado 0,3% do potencial nacional (considerando vinhaça, torta de filtro, bagaço e palha). Isso mostra que ainda há muito espaço para o aproveitamento dos resíduos derivados do setor.

O produtor de biogás e biometano do setor sucroenergético pode encontrar uma importante fonte de energia para a descarbonização de suas operações e tratamento adequado de dois importantes resíduos, especialmente vinhaça e torta de filtro. As unidades industriais deste setor possuem grande conexão com os principais negócios de energia: mobilidade e geração de energia elétrica.

Em ambos os casos, o setor sucroenergético se posiciona como conectado à agenda de redução de emissões de carbono. Os produtos à base de biometano têm grande potencial para participar da grande maioria dos negócios das usinas do setor.

Estima-se que mais de 230 milhões de toneladas (Mt) de CO₂ sejam utilizadas todos os anos em todo o mundo.

A indústria de fertilizantes é a maior consumidora, com 130 Mt de CO₂ utilizados na produção de ureia, seguida pelo petróleo e gás, que consome 70 a 80 Mt de CO₂ para recuperação melhorada de petróleo.

Muitas indústrias dependem do CO₂ para as suas operações e produção quotidianas, como as cervejarias, a alimentação e bebidas e a agricultura, para citar apenas algumas.

Nos últimos anos, o biogás ganhou popularidade como combustível “verde”. Trata-se do metano produzido pela digestão anaeróbica, que pode ser utilizado para substituir o gás natural convencional em aterros sanitários ou “digestores” que convertem estrume animal ou resíduos alimentares.

O biogás normalmente contém 60% de biometano, que é um combustível renovável, e 34% de CO₂, que é um produto residual natural. Em vez de desperdiçar e emitir este CO₂ residual que pode ser recuperado e reciclado, melhorando a sustentabilidade da instalação e as credenciais de economia circular. Acredita-se que o CO₂ verde criado a partir do biogás tenha maior confiabilidade de fornecimento e seja um produto mais sustentável do que o CO₂ normal derivado de combustíveis fósseis.

O biogás também ajuda a reduzir as emissões de metano provenientes da vinhaça que, de outra forma, poderiam escapar. Ao transformar este metano em CO₂, que é até 34 vezes menos potente como gás com efeito de estufa, a sua utilização como combustível minimiza significativamente o seu impacto climático.

O CO₂ derivado da usina de biogás, que pode ser valorizado e inserido no mercado, considerando-se as possibilidades de utilização e a demanda existente no Brasil.

O CO₂ pode ser utilizado em diversos setores industriais para diferentes finalidades, deixando de ser classificado como um resíduo e tornando-se um recurso, um produto valorizado. A fiabilidade da produção de CO₂ a partir de centrais de biogás é um argumento convincente para as empresas considerarem a transição das fontes tradicionais de CO₂.

A disponibilidade de CO₂ durante todo o ano, com paralisações limitadas, proporciona um fornecimento estável, essencial para as indústrias que dependem deste recurso. A indústria de alimentos e bebidas, a agricultura em estufas e as aplicações médicas e farmacêuticas podem se beneficiar enormemente com esse fornecimento consistente.

Além disso, as vantagens ambientais associadas às centrais de biogás, incluindo a redução das emissões de carbono e a geração de energia sustentável, tornam-nas num investimento valioso para um futuro mais sustentável. A decisão de adotar o biogás como fonte confiável de CO₂ pode envolver alguns riscos, mas os benefícios potenciais fazem com que valha a pena correr esse risco.

A taxa de crescimento esperada do consumo global total de todos os produtos agrícolas é igual à produção, e a produção mundial em 2050 poderá ser 60% maior do que em 2023. Isto representa um aumento de 77% nos países em desenvolvimento.

Como resultado, a utilização global de fertilizantes poderá aumentar de 166 milhões de toneladas em 2023 para 263 milhões de toneladas em 2050. Em particular, até 2050, os países em desenvolvimento serão responsáveis por mais de 70% da utilização global de fertilizantes.

Assim, o fertilizante orgânico produzido a partir de fontes renováveis (por exemplo, biogás) é amigo do ambiente e de baixo custo. Assim, tem potencial para atender às necessidades de fertilizantes para melhorar a produção e produtividade agrícola.

O biofertilizante, por sua vez, poderá ser aproveitado como fertilizante natural para realizar adubações das lavouras, pois se trata de um produto de excelente qualidade que, quando utilizado corretamente, praticamente não polui o ambiente, além de possuir características minerais, adequadas para o desenvolvimento das plantas.

O biofertilizante gerado a partir da tecnologia do biogás tem o potencial de melhorar a produção agrícola e a produtividade para uma agricultura sustentável a um baixo custo.

A digestão anaeróbica tem potencial para produzir fertilizante orgânico com excelentes condições nutricionais, com níveis suficientes de Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio, Manganês, Ferro e Zinco.

Além disso, o fertilizante orgânico reduz a poluição do ambiente (fontes de água, solo) e a perda de microrganismos decompositores que são vitais para a melhoria da fertilidade do solo.

Com a redução do consumo de fertilizantes químicos, as lavouras e a pecuária têm vantagens, como a maior disponibilidade de potássio e nutrientes como o nitrogênio, além de corrigir o pH do solo . O biofertilizante também funciona como defensivo agrícola, no combate a pragas e doenças.

Não poluente, favorece a multiplicação de microrganismos, fortalecendo o solo e melhorando a penetração do ar na terra. Utilizado com controle, respeitando os limites definidos pela legislação ambiental para aplicação no solo, as características de cada produto agrícola e avaliando a disponibilidade de nutrientes no digerido, não há risco de agredir o solo e causar desequilíbrios.

Assim, os biofertilizantes a partir do biogás têm potencial para aumentar o rendimento da cultura de 15% para 25%. A geração de adubo orgânico sustentável a partir da biomassa da cana-de-açúcar é uma forma potencial de alcançar uma economia circular e também pode proporcionar um ambiente saudável e mais limpo.

Além disso, quando comparado com outras opções de tratamento de resíduos, tem potencial para reduzir poluentes e emissões de gases com efeito de estufa.

Também auxilia na redução do aquecimento global e na melhoria e manutenção da saúde do solo.

O mercado global de amônia verde (com biomassa) pode valer US\$ 1,4 trilhões até 2050, impulsionados por investimentos em tecnologias que produzem amônia usando energia renovável, de acordo com um relatório da Agência Internacional de Energia (IEA).

A Amônia Verde é produzida através do tradicional processo de síntese de Haber-Bosch, da combinação entre o Hidrogênio Verde e o nitrogênio capturado do ar. É a principal matéria-prima para a produção de fertilizantes nitrogenados, como nitrato de amônio e ureia.

A amônia (NH_3) é um dos produtos químicos inorgânicos mais importantes e amplamente produzidos no mundo, que pode ser usado para produzir fertilizantes agrícolas como nitrato de amônio, fosfato de amônio e ureia, como agente de captura em processos de remoção de gases ácidos.

Para refrigeração e ar condicionado em grande escala para edifícios e processos industriais, para fabricar materiais explosivos, fibras, plásticos, polímeros, papéis e ácidos e como combustível potencial para motores de combustão interna devido a uma alta taxa de octanas de células de combustível (por exemplo, células de combustível de óxido sólido) para geração de energia. A produção global de amônia tem crescido constantemente nas últimas décadas.

O biogás também pode se tornar um componente importante da produção de amônia verde. Atualmente, 80% da produção de amônia é utilizada para fertilizantes. No entanto, a amônia também é considerada um combustível de emissão zero. A maior parte da amônia é produzida pelo processo Haber-Bosch por reforma a vapor do metano.

A participação do gás natural na produção global de amônia foi de aproximadamente 68%. Além disso, foi relatado que o gás natural contribui com 70-85% dos custos de produção de amônia.

Alcançar os objetivos da transformação verde exige enfrentar o desafio da produção de amoníaco sem combustíveis fósseis. A produção de amônia geralmente pode ser alcançada de duas maneiras. A via convencional utiliza gás natural ou carvão gaseificado. A amônia produzida não pode ser considerada verde, pois é produzida a partir de componentes com emissões diferentes de zero.

Por sua vez, o caminho verde requer fonte de energia com emissão zero (elétrica ou térmica) para produzir hidrogênio e nitrogênio verdes que podem ser convertidos em amônia.

A via verde alternativa é a substituição do gás natural pelo biometano. Esta abordagem alternativa verde pode ajudar a atender à crescente demanda por amônia verde. Além disso, a amônia também pode ser recuperada do digerido durante a digestão anaeróbica, que é um método promissor para promover o ciclo do nitrogênio, economia de energia e redução de emissões de GEE.

Reduzir a quantidade de dióxido de carbono produzido durante o processo de fabricação de amônia é fundamental para atingir as metas de zero emissões líquidas até 2050.

A melhor maneira de reduzir as emissões de carbono ao produzir amônia é através do biogás com substrato da cana-de-açúcar com baixo teor de carbono.

Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável





BIOREFINARIA BIOGÁS BIOMETANO BIOMASSA CANA-DE-AÇÚCAR



Estratégia Global Renovável. A mudança global em direção à energia sustentável e à recuperação de recursos intensificou o interesse na biomassa lignocelulósica como matéria-prima renovável para produtos de base biológica. Entre os diversos resíduos agroindustriais, o bagaço de cana-de-açúcar destaca-se devido à sua abundância, baixo custo e rico teor de carboidratos. Como subproduto da extração de açúcar, o bagaço compreende aproximadamente 30% da massa total da cana-de-açúcar e é composto principalmente de celulose, hemicelulose e lignina.

Essas propriedades tornam o bagaço de cana-de-açúcar um candidato promissor para bioconversão em combustíveis, produtos químicos e produtos químicos de alto valor agregado. Com milhões de toneladas geradas anualmente, particularmente em países com extenso cultivo de cana-de-açúcar, como o Brasil e a Índia, o desafio evoluiu da gestão de resíduos para a busca de aplicações que agreguem valor a essa biomassa. Os recentes avanços em estratégias integradas de pré-tratamento e fermentação intensificaram o interesse na valorização do bagaço para bioetanol e outros produtos de base biológica.

A importância da valorização do bagaço é multifacetada: não só minimiza o desperdício e serve como alternativa aos combustíveis fósseis, como também estimula as economias locais e apoia práticas agrícolas sustentáveis.

O esforço para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo que se atende à demanda global de energia, acelerou a pesquisa em biocombustíveis renováveis, com o bagaço emergindo como uma matéria-prima promissora. As abordagens de conversão para a utilização do bagaço têm se concentrado principalmente na combustão para geração de energia ou na compostagem rudimentar, ambas com retornos econômicos e ambientais limitados.

Estudos indicam que o bagaço pode servir como um substrato de baixo custo para a produção de bioetanol, especialmente se os processos de pré-tratamento e fermentação forem integrados de forma otimizada.

A integração de tecnologias emergentes de pré-tratamento com técnicas avançadas de fermentação, juntamente com a modelagem e simulação utilizando ferramentas, aprimorou ainda mais a eficiência do processo e a viabilidade econômica. Vale ressaltar que o pré-tratamento do bagaço é uma etapa crítica que interrompe a integridade estrutural da matriz lignocelulósica, aumentando a acessibilidade enzimática e os rendimentos da hidrólise.

Esses avanços são particularmente relevantes no contexto da produção de bioetanol, onde sistemas integrados alcançaram rendimentos superiores a 0,2 g/g. Além do etanol, os hidrolisados derivados do bagaço estão sendo explorados para a biossíntese de uma variedade de produtos químicos, como xilitol, ácido lático e ácido succínico, ampliando o potencial econômico da biomassa do bagaço.

A cogeração e a produção de eletricidade são práticas comuns, em que o bagaço alimenta caldeiras e turbinas a vapor em usinas de açúcar/etanol, frequentemente produzindo excedente de eletricidade que pode ser vendido à rede (uma prática bem documentada no Brasil). O bagaço é uma matéria-prima principal para o etanol celulósico de segunda geração e está sendo avaliado para a produção de outros biocombustíveis e produtos químicos de plataforma, como furfural e xilitol. A pirólise, a torrefação e a peletização são investigadas como processos para converter biomassa em produtos termoquímicos, como bio-óleo, biochar e combustíveis transportáveis aprimorados.

O bagaço de cana-de-açúcar também é utilizado como matéria-prima para celulose, papel e nanocelulose, suas cinzas servem como material cimentício suplementar na construção, é parcialmente utilizado na alimentação animal e em corretivos de solo, e suas fibras tratadas e biochars são aplicados em adsorventes, compósitos, cerâmicas e materiais especiais.

Setor sucroenergético brasileiro. A cana-de-açúcar, uma importante cultura comercial no Brasil, desempenha um papel crucial no fornecimento não apenas de açúcar, mas também de etanol.

Os subprodutos da cana-de-açúcar encontram utilidade como ração animal em vários países. O cultivo da cana-de-açúcar se expandiu para regiões com climas quentes em todo o mundo.

O maior contribuinte para a produção global de cana-de-açúcar é o continente americano, incluindo países como Brasil, México, EUA respondendo por cerca de 51% da produção total, seguido pela Ásia (41,6%), África (5%) e Oceania (1,7%).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma produção impressionante na safra 2025/26 estimada pela Conab em 668,8 milhões de toneladas em um levantamento, representando uma atualização de 663,4 milhões de toneladas em um levantamento anterior.

O maior desafio do setor sucroenergético é o aproveitamento dos tipos de biomassa residual gerado desde a colheita até o processamento nas usinas. A cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos.

A agroindústria sucroalcooleira nacional, diferentemente do que ocorre nos demais países, opera numa conjuntura positiva e sustentável. Pelo conceito de bagaço entende-se apenas o caule macerado, não incluindo a palhada e os ponteiros, que representam 55% da energia acumulada no canavial.

Este potencial fabuloso de palha é pouco aproveitado, sendo, na maioria dos casos, queimado no campo.

Nas últimas décadas, houve um aumento notável na produção de cana-de-açúcar, impulsionado pela crescente demanda por açúcar, etanol derivados dessa cultura versátil. Consequentemente, a indústria açucareira gera uma quantidade significativa de resíduos agrícolas.

Biomassa da Cana-de-açúcar. Existem recursos potenciais inexplorados associados à colheita e ao processamento da cana-de-açúcar, a biomassa sem uso comercial e energético (folhas, pontas e palhiço) deixado no campo e o bagaço da cana-de-açúcar como excedente das usinas, principalmente naquelas que não utilizam para cogeração.

A queima de lixo (biomassa sem uso) da palha da cana-de-açúcar no campo tem sido alvo de escrutínio nos últimos anos devido à invasão urbana e preocupações com a qualidade do ar e o excesso de lixo (folhas, pontas e palhiço) deixado no campo também pode reduzir a produtividade da cultura da soca devido às temperaturas mais baixas do solo e à maior umidade do solo.

As usinas de cana-de-açúcar também detêm um excesso (não uso em cogeração) de bagaço. Sem a utilização adequada, o bagaço é comumente descartado como resíduo sólido ou utilizado como fonte de combustível para o processo de moagem. Para cada tonelada de cana-de-açúcar, aproximadamente 280 kg de bagaço úmido são produzidos, destacando a quantidade substancial desse resíduo.

A biomassa do bagaço da cana-de-açúcar tem o potencial de ser transformada em energia, materiais e produtos químicos finos. As pontas e folhas da cana-de-açúcar que costumam ser deixadas no campo podem representar até 30% da biomassa total (FAO, 2006), considerando o volume total de biomassa produzida por unidade de área plantada.

A quantidade de resíduos decorrente da colheita da cana-de-açúcar depende de variados fatores, entre os quais: o sistema com ou sem queima da cana na pré-colheita, a altura dos ponteiros, a variedade plantada, a idade da cultura e seu estágio de corte.

O clima, o solo, o uso ou não de vinhoto na fertirrigação do campo, entre outros, que exercem influência importante nas características, quantidade e qualidade da palha. O valor médio da produção de matéria seca que estima os resíduos secos potenciais da cana-de-açúcar, denominados palha, é de 140 kg por tonelada de cana colhida, com 50% de umidade, considerando as diversas variedades de cana-de-açúcar plantadas.

A produtividade média de cana-de-açúcar no Brasil é de 85 toneladas por hectare, sendo que para cada tonelada de cana processada são gerados cerca de 140 kg de palha e 140 kg de bagaço em base seca, ou seja, 12 toneladas de palha e 12 toneladas de bagaço. A palha de cana-de-açúcar representa 15% do peso dos colmos da cana madura, ou 12% quando seca.

A Brasil Biomassa desenvolveu uma série de projetos e plantas industriais para o aproveitamento da biomassa da cana-de-açúcar. Temos um quantitativo de disponibilidade de resíduos de 327.855.000 ton./ano da palha e bagaço um poder calorífico 13,4 MJ/kg que podem ser utilizados na produção do biochar.

Essas duas matérias-primas orgânicas (palhiço e bagaço) podem ser convertidas termoquimicamente em biochars, biocarbono e biopellets e briquetes como produtos energéticos para captura e armazenamento de carbono, a capacidade de retenção de água e melhorar a produtividade da cana-de-açúcar.

Os benefícios são esperados tanto para os produtores de cana-de-açúcar quanto para os usineiros por meio da produção de subprodutos valiosos da pirólise de resíduos de bagaço e do palhiço da cana-de-açúcar, bem como o papel da indústria da cana-de-açúcar nos mercados de energia renovável.

Uma extensa pesquisa desenvolvida revelou uma via promissora para melhorar a recuperação de energia por meio da conversão de resíduos da cana-de-açúcar em novos produtos energéticos.

Essa transformação é obtida empregando técnicas termoquímicas e bioquímicas após o processo de desvolatilização da biomassa. Esses métodos inovadores oferecem uma oportunidade atraente para aproveitar maior potencial energético de sobras da cana-de-açúcar, abrindo caminho para a utilização sustentável e eficiente de recursos.

A versatilidade do bagaço de cana-de-açúcar abre inúmeras possibilidades para sua aplicação em vários setores, fornecendo alternativas sustentáveis e ecologicamente corretas em várias indústrias.

O desafio do setor agroindustrial vai exigir uma enorme quantidade de adubos e fertilizantes e o biochar e a amônia verde pode ser uma solução ao setor. Uma solução sustentável e multifuncional para mudanças climáticas pode ajudar a construir resiliência em comunidades locais de alto risco e sensíveis ao impacto das mudanças climáticas.

Esta utilização faz-se não só para fins energéticos mas também, e cada vez mais, para a obtenção de bioprodutos. O aperfeiçoamento da conversão da variedade de recursos vegetais em produtos químicos e energia é a chave (bioeconomia) para que a economia mundial utilize de forma intensa a biomassa sustentável (cana-de-açúcar) renovável.

A valorização da biomassa cana-de-açúcar em biorrefinaria, tem uma relevância crescente, pois integra processos de conversão de biomassa para a obtenção de energia, materiais e produtos químicos, nomeadamente de valor acrescentado tornando-se unidades geradoras de emprego e riqueza.

Trabalhamos na implementação de uma biorrefinaria para promover a gestão sustentável através da produção de produtos de valor acrescentado.

Biomassa de bagaço de cana-de-açúcar: composição e características. O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto gerado durante a extração do caldo dos talos da cana-de-açúcar.

Sua composição típica inclui celulose (32–44%), hemicelulose (27–32%) e lignina (19–24%), tornando-o uma biomassa lignocelulósica rica, adequada para conversão em biocombustíveis e bioprodutos de alto valor agregado. A matriz fibrosa, com sua estrutura rígida e complexa, apresenta desafios significativos para a hidrólise enzimática e a fermentação. No entanto, essa recalcitrância inerente também torna o bagaço um excelente candidato para estratégias pré-tratamento destinadas fracionamento de seus componentes.

Composição Química e Características Estruturais. A estrutura inerente do bagaço é um conjunto hierárquico de fibras de celulose, matrizes de hemicelulose e uma rede protetora de lignina.

Existe uma ligação entre a celulose e a lignina; essa estrutura não só confere resistência mecânica ao colmo da cana-de-açúcar, como também limita a acessibilidade das enzimas necessárias durante a sacarificação e a fermentação subsequente.

Na estrutura do bagaço da cana-de-açúcar, as cadeias lineares de celulose são mantidas unidas por fortes ligações de hidrogênio inter e intramoleculares, fazendo com que se agreguem em microfibrilas rígidas, semelhantes a fios.

Essas microfibrilas possuem regiões cristalinas altamente ordenadas e regiões amorfas menos ordenadas. A hemicelulose é caracterizada como um polissacarídeo complexo, ramificado e amorfo, composto por vários monômeros de açúcar, como xilose, glicose e arabinose.

É evidente que, no bagaço da cana-de-açúcar, a xilose é o principal componente. As cadeias de hemicelulose são mais curtas e menos cristalinas do que as de celulose. Elas se ligam à superfície das microfibrilas de celulose por meio de ligações de hidrogênio e estão covalentemente ligadas à lignina, atuando como uma matriz de ligação.

A lignina, por sua vez, é um polímero fenólico tridimensional, amorfo e altamente ramificado, sintetizado a partir de monômeros precursores de fenilpropano. A lignina funciona como uma “cola” natural que envolve e une a celulose e a hemicelulose. Essa rede proporciona rigidez mecânica, integridade estrutural e resistência à degradação química e biológica.

A composição química do bagaço de cana-de-açúcar reflete a arquitetura fundamental das paredes celulares lignocelulósicas das plantas, onde as microfibrilas de celulose fornecem resistência estrutural, a hemicelulose atua como um polímero matricial.

Conectando celulose e lignina, e a lignina serve como um agente de ligação rígido que fornece integridade estrutural e proteção.

No entanto, o componente lignina cria desafios significativos de processamento, pois “dificulta a sacarificação, o que leva a baixos rendimentos de produtos de valor agregado”. Consequentemente, essa composição exige estratégias de pré-tratamento para reduzir a “recalcitrância da biomassa, ou seja, a cristalinidade da celulose, a complexidade estrutural da parede celular e a lignificação”. Considerando a natureza altamente interconectada desses componentes, métodos de pré-tratamento eficazes são necessários para romper as barreiras da lignina e expor as frações de celulose e hemicelulose para posterior conversão enzimática.

Visão geral das estratégias de pré-tratamento para a valorização do bagaço de cana-de-açúcar. O pré-tratamento é uma etapa crucial na conversão de biomassa lignocelulósica, como o bagaço de cana-de-açúcar.

Seu objetivo é romper a matriz compacta, remover ou modificar a lignina e reduzir a cristalinidade da celulose, aumentando assim a susceptibilidade da biomassa à hidrólise enzimática. Estudos recentes desenvolveram diversas técnicas inovadoras de pré-tratamento que podem ser amplamente classificadas em abordagens físicas, químicas, biológicas e integradas.

Métodos físicos e termoquímicos. Os métodos de pré-tratamento físico focam na redução do tamanho das partículas de biomassa e no aumento da área superficial. Técnicas como moagem, irradiação e extrusão são amplamente utilizadas. Inovações recentes para o tratamento físico do bagaço envolvem a técnica de moagem em moinho e ultrassom demonstrou reduzir a cristalinidade e melhorar significativamente a digestibilidade enzimática.

Também foi relatado que a moagem em moinho, em particular, rompe a rede de ligações de hidrogênio na celulose, aumentando sua reatividade.

A explosão a vapor é um dos métodos de pré-tratamento mais amplamente adotados para a biomassa da cana-de-açúcar. Nesse processo, o bagaço é submetido a vapor de alta pressão, seguido de rápida decomposição. Esse processo causa a solubilização da hemicelulose e a ruptura parcial da lignina, melhorando o acesso enzimático.

O uso da explosão a vapor aumenta o rendimento de açúcares e reduz a formação de inibidores sob temperatura e tempo de residência otimizados. O pré-tratamento assistido por micro-ondas é uma das técnicas de pré-tratamento emergentes. A irradiação por micro-ondas induz aquecimento rápido e aumento da pressão interna, levando à ruptura da parede celular. Quando combinado com agentes químicos suaves, esse método aumenta a deslignificação e a recuperação de açúcares, minimizando o consumo de energia. É importante notar que esses métodos são frequentemente usados em conjunto com tratamentos químicos para maximizar a eficiência, especialmente em sistemas integrados de biorrefinaria.

Os métodos termoquímicos combinam calor e agentes químicos para degradar a matriz lignocelulósica. Essas abordagens são particularmente eficazes na solubilização da hemicelulose e na ruptura das estruturas da lignina, melhorando assim o rendimento de açúcares fermentáveis. Na aplicação do tratamento alcalino, o hidróxido de sódio e o hidróxido de cálcio são comumente usados para clivar as ligações éster na lignina e na hemicelulose. O bagaço tratado com álcali apresenta porosidade melhorada e teor de lignina reduzido, facilitando a fermentação microbiana.

As fibras de bagaço tratadas com álcali e incorporadas em matrizes termofixas apresentaram propriedades mecânicas e térmicas superiores devido à maior adesão fibra-matriz.

O uso da hidrólise ácida como técnica de tratamento requer o uso de ácido sulfúrico ou clorídrico diluído na hidrólise da hemicelulose em xilose e arabinose. Sistemas integrados de ácido e micro-ondas demonstraram potencial no equilíbrio entre o rendimento de açúcar e a supressão de inibidores.

Métodos emergentes, como o pré-tratamento organossolv, utilizam solventes orgânicos, como etanol e acetona, para extrair seletivamente a lignina. Agentes oxidantes como peróxido de hidrogênio ou ozônio também estão sendo explorados por sua capacidade de despolimerizar a lignina em condições brandas. Esses métodos oferecem frações de lignina mais puras e melhor acesso à celulose, a recuperação do solvente representa um desafio.

Um desenvolvimento interessante é a integração do pré-tratamento organossolv com catalisadores inovadores, como combinações de carbonato de sódio e oxigênio, para alcançar condições de processamento moderadas e altos rendimentos de açúcar. Esses métodos são economicamente atraentes, pois frequentemente produzem “lignina verde” como subproduto, que pode ser posteriormente valorizada na produção de produtos químicos e materiais de alto valor agregado.

Tendências recentes enfatizam a integração de métodos físicos e termoquímicos para criar efeitos sinérgicos. Por exemplo, a combinação de explosão a vapor com tratamento alcalino resultou em maior recuperação de açúcar e menor teor de lignina em comparação com métodos isolados.

Estratégias de intensificação de processos, como hidrólise alcalina assistida por micro-ondas e tratamento ácido aprimorado por ultrassom, estão sendo exploradas para reduzir o consumo de energia e melhorar a produtividade.

Métodos de pré-tratamento biológico. Os métodos de pré-tratamento biológico surgiram como uma alternativa sustentável e ambientalmente amigável para a valorização do bagaço de cana-de-açúcar, particularmente no contexto da produção de biocombustíveis. O pré-tratamento biológico emprega microrganismos ou enzimas para degradar seletivamente a lignina e a hemicelulose sem a necessidade de reagentes químicos agressivos.

Inovações recentes em engenharia microbiana, otimização enzimática e fermentação em estado sólido avançaram significativamente a eficiência e a aplicabilidade das estratégias de pré-tratamento biológico.

Deslignificação e Hidrólise Enzimáticas. Um dos desenvolvimentos mais promissores no tratamento biológico é o uso de enzimas ligninolíticas, como lacases, peroxidases de manganês e peroxidases de lignina. Essas enzimas, frequentemente derivadas de fungos e actinomicetos, facilitam a degradação seletiva da lignina sem gerar subprodutos químicos agressivos.

O tratamento otimizado alcançou uma remoção de 31,2% de lignina quando a siringaldazina foi usada como mediador, resultando em um aumento de 56% na eficiência da hidrólise enzimática e um rendimento de bioetanol de 67,3% a partir do hidrolisado.

A integração do pré-tratamento enzimático com a sacarificação subsequente também se mostrou bastante promissora. Misturas enzimáticas personalizadas para a composição do bagaço de cana-de-açúcar, incluindo celulasas, xilanases e β -glucosidases, foram otimizadas para melhorar a liberação de açúcares, minimizando a quantidade de enzimas necessária.

Avanços na imobilização e reciclagem de enzimas aprimoram ainda mais a economia e a escalabilidade do processo.

Fermentação fúngica em estado sólido. A fermentação em estado sólido (FES) utilizando fungos ligninolíticos tem ganhado destaque como um método de baixo custo e eficaz para o pré-tratamento biológico. Fungos de podridão branca, como *Pleurotus ostreatus*, *Agaricus bisporus* e *Calocybe indica*, demonstraram forte capacidade de degradação da lignina, preservando a integridade da celulose. Após 56 dias de fermentação, a digestibilidade *in vitro* da matéria seca e a produção total de gás aumentaram acentuadamente, indicando maior acessibilidade microbiana e menor recalcitrância.

O pré-tratamento fúngico, especialmente com fungos de podridão branca ou enzimas lacase, tem apresentado resultados promissores nessa área.

Por exemplo, um estudo relatou 84% de deslignificação do bambu utilizando lacase de *Pleurotus* sp. a 400 UI/mL em um período de tratamento de 8 horas.

Embora os métodos biológicos geralmente exijam tempos de processamento mais longos, eles são ambientalmente benignos e reduzem a formação de compostos inibidores que podem afetar negativamente a fermentação.

Consórcios Microbianos e Fermentação Adaptativa. Estudos recentes exploraram o uso de consórcios microbianos sinérgicos com comunidades de bactérias e fungos para aumentar a degradação de substratos lignocelulósicos complexos. Esses consórcios podem se adaptar a diferentes composições de matéria-prima e condições ambientais, oferecendo robustez e flexibilidade no bioprocessamento.

Cepas geneticamente modificadas de *Clostridium thermocellum* , *Trichoderma reesei* e *Bacillus subtilis* foram incorporadas em culturas mistas para melhorar a hidrólise da celulose e reduzir a formação de inibidores. Estratégias de fermentação adaptativa, incluindo técnicas de fermentação alimentada e inoculação sequencial, foram empregadas para manter a atividade microbiana e otimizar a produção de metabólitos.

Esses sistemas são particularmente eficazes na minimização do acúmulo de intermediários tóxicos, como furfural e ácido acético, que podem inibir o crescimento microbiano e reduzir o rendimento do produto.

Apesar desses avanços, o tratamento biológico do bagaço de cana-de-açúcar enfrenta diversos desafios. A variabilidade na composição do bagaço, devido a fatores sazonais e geográficos, pode afetar o desempenho microbiano e a consistência do processo. Além disso, a cinética lenta da degradação biológica, em comparação com os métodos químicos, exige tempos de residência mais longos e um controle rigoroso do processo.

A principal vantagem do pré-tratamento biológico reside na sua capacidade de operar em temperaturas e pressões moderadas, gerando fluxos mínimos de resíduos. Com os avanços na engenharia microbiana e na tecnologia enzimática, os métodos de pré-tratamento biológico estão prestes a se tornar um aspecto integral das estratégias sustentáveis de valorização da biomassa.

Abordagens de pré-tratamento integradas e combinadas. Métodos de pré-tratamento isolados frequentemente não conseguem alcançar o fracionamento completo dos componentes do bagaço de cana-de-açúcar ou manter a sustentabilidade do processo. Por exemplo, embora a hidrólise ácida solubilize eficazmente a hemicelulose, ela pode gerar inibidores de fermentação, como furfural e hidroximetilfurfural. Da mesma forma, os tratamentos alcalinos são eficientes na remoção da lignina, mas podem exigir lavagem e neutralização extensivas. Abordagens integradas de pré-tratamento visam combinar os pontos fortes de métodos individuais, mitigando suas limitações, melhorando assim a eficiência geral do processo e a recuperação do produto.

Abordagens integradas que combinam métodos físicos, químicos e biológicos têm demonstrado efeitos sinérgicos. Por exemplo, uma combinação de pré-tratamento com ácido diluído e sacarificação enzimática subsequente pode resultar em uma recuperação significativamente maior de açúcares monoméricos, o que é essencial para a produção de bioetanol de alto rendimento. Abordagens emergentes de pré-tratamento integradas ou combinadas são discutidas nas subseções subsequentes.

Pré-tratamento com água quente líquida (LHW) + solvente eutético profundo. Uma das estratégias integradas mais promissoras envolve a combinação de água quente líquida (AQL) e solventes eutéticos profundos (SEP).

O pré-tratamento com AQL rompe a matriz de hemicelulose-lignina por meio de autohidrólise, enquanto o SEP solubiliza seletivamente a lignina em condições brandas. Um estudo recente demonstrou que essa abordagem combinada aumentou significativamente a sacarificação enzimática do bagaço de cana-de-açúcar, produzindo mais de 85 g/L de açúcares fermentáveis totais (glicose e xilose) e 34,3 g/L de bioetanol após a fermentação. A sinergia entre os mecanismos térmicos e baseados em solventes facilitou o fracionamento eficiente dos componentes da biomassa e minimizou a formação de inibidores, tornando esse método altamente atraente para aplicações em biorrefinarias.

Pré-tratamento com micro-ondas + DES ou líquidos iônicos. O aquecimento por micro-ondas proporciona aquecimento rápido e seletivo, especialmente para solventes polares e componentes da biomassa, reduzindo a duração do tratamento ao produzir vias de reação alternativas em relação ao aquecimento condutivo convencional. Quando combinada com líquidos iônicos (LIs)/DES, essa tecnologia pode acelerar a solubilização da lignina e a hidrólise da hemicelulose, além de melhorar a acessibilidade da celulose a um custo de energia menor do que o aquecimento convencional.

Em um sistema típico de pré-tratamento com micro-ondas + solvente (DES/LI), os ânions e doadores de ligações de hidrogênio rompem as ligações de hidrogênio inter e intramoleculares da celulose e solvatam os fragmentos de hemicelulose da lignina, facilitando o fracionamento.

Por outro lado, os efeitos das micro-ondas incluem o rápido aquecimento dipolar do solvente, forçando os componentes polares da biomassa a aumentarem suas temperaturas locais, o que, conseqüentemente, acelera a penetração do solvente e a transferência de massa. Os efeitos das micro-ondas promovem a clivagem seletiva das ligações éter na lignina e das ligações glicosídicas/acetil na hemicelulose. A aplicação de micro-ondas também reduz as limitações da camada limite nas superfícies das partículas.

O pré-tratamento assistido por ultrassom, oferece diversas vantagens em relação aos processos que utilizam apenas solventes na valorização da biomassa lignocelulósica.

Estudos relatam consistentemente uma deslignificação mais rápida e maiores rendimentos de açúcares enzimáticos quando o ultrassom é integrado aos pré-tratamentos com DES ou IL, devido ao aprimoramento sinérgico dos mecanismos físicos e químicos. O processo normalmente opera em condições mais brandas, pois o ultrassom permite a ruptura eficaz da lignina e da hemicelulose em temperaturas mais baixas ou tempos de reação mais curtos, sem comprometer a eficiência.

Pré-tratamento ácido + Sacarificação enzimática + Desintoxicação. Outra abordagem integrada envolve hidrólise ácida sequencial, sacarificação enzimática e desintoxicação. O pré-tratamento com ácido sulfúrico diluído remove eficazmente o xilano e libera hidrolisados ricos em xilose. No entanto, a presença de ácido acético e outros produtos de degradação exige desintoxicação antes da fermentação.

A sacarificação enzimática subsequente rendeu até 47,4% de açúcares redutores, demonstrando a viabilidade dessa abordagem integrada de química verde para a produção de açúcar limpo.

Pré-tratamento Híbrido Biológico-Químico. A integração de pré-tratamentos biológicos e químicos está ganhando força como uma alternativa de baixo consumo energético.

Por exemplo, o tratamento com álcali suave seguido de fermentação fúngica em estado sólido com fungos de podridão branca aumenta a degradação da lignina, preservando a celulose. Essa abordagem híbrida aproveita a seletividade dos sistemas biológicos e a eficiência da ruptura química.

Estratégias integradas de pré-tratamento estão alinhadas aos princípios da química verde e da bioeconomia circular. Ao reduzir o uso de produtos químicos, o consumo de energia e a geração de resíduos, esses métodos oferecem um caminho mais sustentável para a valorização do bagaço de cana-de-açúcar.

Além disso, a capacidade de recuperar múltiplos produtos, incluindo açúcares fermentáveis, derivados de lignina e ácidos orgânicos, aumenta a viabilidade econômica das biorrefinarias. No entanto, ainda existem desafios em termos de integração de processos, compatibilidade de equipamentos e purificação a jusante.

Processos de fermentação aplicados ao bagaço. Após um pré-tratamento bem-sucedido, a etapa subsequente de fermentação é crucial para converter os açúcares liberados em bioetanol ou outros biocombustíveis.

Os avanços na tecnologia de fermentação têm se concentrado em aumentar a eficiência da conversão de açúcares, reduzir o tempo do processo e integrar a fermentação ao pré-tratamento para otimizar a produção.

Sacarificação e Fermentação Simultâneas. No processo de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF), a hidrólise enzimática do bagaço pré-tratado e a fermentação ocorrem em um único reator operado sob condições que favorecem tanto a atividade enzimática quanto a fermentação microbiana. Esse processo integrado reduz o tempo total do processo e minimiza a inibição das enzimas pelos açúcares acumulados. Pesquisas indicam que parâmetros operacionais, como carga de substrato, pH, temperatura e dosagem de enzimas, devem ser cuidadosamente otimizados para atingir a máxima produtividade de etanol em sistemas SSF.

Sacarificação e cofermentação simultâneas (SSCF). O processo SSCF amplia o conceito SSF incorporando microrganismos que podem fermentar simultaneamente açúcares hexoses e pentoses. Isso é particularmente importante para o bagaço, onde a hidrólise da hemicelulose libera xilose e arabinose, além de açúcares hexoses como a glicose.

Estudos conduzidos em resíduos de polpa de bagaço usando pré-tratamento por explosão catalítica a vapor com amônia (AE) demonstraram que o SSCF pode atingir rendimentos de etanol de até 67,5% do máximo teórico, com melhorias de produtividade observadas em cargas de sólidos mais elevadas (por exemplo, 8% p / v)

Otimização do processo e integração com o pré-tratamento. O sucesso dos processos de fermentação depende fortemente da qualidade do hidrolisado gerado durante o pré-tratamento.

Esses estudos de simulação avaliam vários parâmetros, incluindo rendimento de açúcar, inibição enzimática e cinética de fermentação, e fornecem dados valiosos para análises técnico econômicas e de exergia.

Inovações tecnológicas recentes introduziram medidas como a integração de processos e a recuperação de energia a partir de subprodutos da fermentação. A produção combinada de bioetanol e outros coprodutos (por exemplo, produtos químicos derivados da lignina e levedura para ração animal) está a emergir como uma estratégia promissora para melhorar a economia global do processo. Estas biorrefinarias integradas não só produzem bioetanol de alta pureza, como também permitem a valorização de subprodutos, criando assim fluxos de receita adicionais.

Inovações Tecnológicas e Integração de Processos. A integração das etapas de pré-tratamento e fermentação em um fluxo de processo contínuo ou semicontínuo é fundamental para os recentes avanços tecnológicos na valorização do bagaço. Novos esquemas de processo combinam técnicas avançadas de desintegração com estratégias otimizadas de conversão biológica, em que o controle e a simulação do processo desempenham papéis cruciais para garantir a eficiência econômica e operacional.

Integração da produção de etanol de primeira e segunda geração. Pesquisas recentes demonstraram que a integração da produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço lignocelulósico com processos de primeira geração (que normalmente utilizam caldo de cana) pode gerar benefícios ambientais e econômicos substanciais. Essa integração minimiza o consumo de energia e maximiza a utilização de recursos, aproveitando tanto os açúcares facilmente fermentáveis do caldo quanto aqueles gerados pela hidrólise enzimática do bagaço.

Estratégias de Coprodutos e Recuperação de Energia. Além da produção de bioetanol, as biorrefinarias integradas estão cada vez mais focadas na valorização de coprodutos como a lignina, que pode ser processada em produtos químicos de alto valor agregado ou utilizada como matéria-prima para a produção de carvão ativado.

Por exemplo, estudos sobre a valorização do bagaço demonstraram que a combinação do pré-tratamento organossolv com a fermentação não só aumenta o rendimento de etanol, como também produz “lignina verde” com integridade estrutural aprimorada, que pode ser aplicada em materiais avançados. Além disso, o excesso de energia gerado durante o processo pode ser recuperado por meio de sistemas de cogeração que fornecem calor ao processo e geram eletricidade excedente, aumentando ainda mais a viabilidade econômica.

Biorrefinaria Cana-de-açúcar Numa biorrefinaria cana-de-açúcar lignocelulósica, onde a biomassa bruta é primeiro limpa, pré-tratada para melhorar a acessibilidade de açúcares para processamento subsequente e, em seguida, decomposta em seus constituintes primários (celulose, hemicelulose e lignina) por meio de rotas bioquímicas (enzimática) ou químicas (ácida). A celulose e a hemicelulose são convertidas em açúcares monoméricos. A glicose obtida da hidrólise da celulose é posteriormente convertida em produtos valiosos, como bioetanol, ácido acético, acetona, butanol e ácido succínico, por meio da fermentação.

Neste sentido estamos implantando dois projetos de formação de biorrefinaria cana-de-açúcar avançada com a matéria-prima da palha, bagaço e a vinhaça envolvendo diferentes materiais (resíduos do cultivo e do processamento da cana-de-açúcar) de biomassa renovável sem valor comercial.

Uma alternativa sustentável e energética com a geração de recursos aos produtores da cana-de-açúcar.

As operações do setor sucroenergético geram subprodutos que são frequentemente deixados em decomposição (palha), liberando dióxido de carbono e metano na atmosfera.

O uso dos resíduos da cana-de-açúcar como matéria-prima energética pode mitigar essas emissões, ao mesmo tempo em que fornece uma fonte de energia sustentável.

Seus usos não só oferecem uma oportunidade de utilização da biomassa para fins comerciais, como também contribuem para o armazenamento de carbono a longo prazo, reduzindo potencialmente a pegada de carbono geral em comparação com a combustão. Tecnologias avançadas, como pirólise e gaseificação, tornaram viável a conversão desses materiais em biocombustíveis de alta energia.

Trabalhamos no desenvolvimento da plataforma para a implantação da biorrefinaria, com uma avaliação técnica (mapeamento e suprimento) para o aproveitamento integral dos resíduos (matérias-primas) de origem da cana-de-açúcar, na performance da engenharia e tecnologia de conversão térmica e no desenvolvimento dos bioprodutos energéticos.

Trabalhamos no planejamento da etapa de “sourcing, preparação” na cadeia de suprimento (sustentabilidade) da matéria-prima (disponibilidade potencial da lignina, celulose e dos compostos alvo).

Com amplo conhecimento da variabilidade da biomassa (avaliação laboratorial da composição da biomassa, carbono e extrativos) para interagir na aplicação da melhor tecnologia (pirólise, hidrólise ou auto-hidrólise para recuperação de antioxidantes e celulose, digestão anaeróbica, torrefação e gaseificação). Assim estamos trabalhando no desenvolvimento inovador de implantação de duas biorrefinarias florestais avançadas e sustentáveis.

Utilizando matérias-primas naturais (florestal) para a produção de bioquímicos (produtos à base de lignina e de fibras da celulose e de bioetanol ou etanol de baixa emissão) ecologicamente corretos que podem substituir produtos à base de petróleo.

Nossas soluções energéticas e sustentáveis podem desempenhar um papel importante no enfrentamento de alguns dos maiores desafios do mundo: o crescimento populacional e as mudanças climáticas.

A utilização de matérias-primas (desenvolvemos uma avaliação do ciclo de vida da biomassa de origem sustentável até os produtos finais) renováveis (cana-de-açúcar) em produtos que substituem alternativas (melhor desempenho ambiental) à base de petróleo (bioetanol) e que resultam em baixa pegada de carbono. (ambiental na cadeia de valor).

PRIMEIRO PROJETO EM DESENVOLVIMENTO DE IMPLANTAÇÃO BIORREFINARIA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESPÍRITO SANTO. O PROJETO ENVOLVERÁ A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E DE MAPEAMENTO E DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA PARA APROVEITAMENTO DA BIOMASSA DA PALHA, DO BAGAÇO PARA A PRODUÇÃO DE NOVOS PRODUTOS.

Biopolímeros. Utilizando todos os componentes dos resíduos da biomassa (cana-de-açúcar), a empresa pretende produzir biopolímeros à (agentes ligantes e dispersantes de lignina) e vanilina, fibras e bioetanol avançado.

Estamos avaliando as potencialidades da biomassa da cana-de-açúcar, em diferentes etapas: (1) componente biopolímero em misturas de polímeros termoplásticos; (2) melhorias nas propriedades interfaciais por modificação química que fornecem melhor compatibilidade com polímeros sintéticos; e (3) pode ser despolimerizada para ser convertida em produtos químicos de plataforma para a síntese de vários polímeros.

A valorização eficiente da biomassa é crucial para substituir a matéria-prima atual à base de petróleo e estabelecer biorrefinarias da cana-de-açúcar mais sustentáveis e competitivas.

Temos um recurso industrial de grande volume e baixo custo para a produção de produtos químicos aromáticos renováveis sendo um importante subproduto da indústria da cana-de-açúcar etanol.

A valorização da biomassa da cana-de-açúcar tem o potencial de melhorar tanto a viabilidade econômica quanto o desempenho ambiental das usinas.

Entre os diferentes métodos de despolimerização, a despolimerização oxidativa é geralmente atrativa devido às condições operacionais relativamente brandas e à sua capacidade de produzir produtos específicos com múltiplas funcionalidades.

A despolimerização oxidativa pode ser usada para produzir produtos químicos valiosos, como aldeídos e ácidos aromáticos, bem como ácidos carboxílicos alifáticos.

A biomassa da cana-de-açúcar em biorrefinarias pode ser utilizada química e bioquimicamente para produzir fenólicos essenciais de valor agregado verde, ou seja, vanilina, aldeídos fenólicos, compósitos, fibras de carbono de alto desempenho adesivos, eletrodos de bateria de grafeno, resinas, cargas, pigmentos, aditivos na indústria de cimento, adsorventes e preparações de corantes.

Os biopolímeros são utilizados em uma ampla gama de aplicações no mercado final, como químicos, baterias, ligantes industriais e construção civil. A vanilina (base biomassa florestal) será fornecida para empresas de aromas e fragrâncias, bem como para a indústria de alimentos e bebidas.

Também a biorrefinaria estará produzindo a celulose especial de alta pureza, principalmente para uso como matéria-prima na produção de éteres e acetato de celulose e ainda de fibras para aplicações industriais.

Bioetanol Segunda Geração. A biorrefinaria também vai trabalhar na produção de produtos químicos como o bioetanol de segunda geração (altamente sustentável de origem da cana-de-açúcar com as emissões de aproximadamente um décimo do etanol sintético) e intermediários químicos finos para agentes de contraste com uma variedade de aplicações em setores como agricultura, construção civil e cimentos, produtos químicos, farmacêuticos e cosméticos, alimentos, baterias e biocombustíveis.

Biogás, Biometano, Biofertilizantes, CO₂ industrial, Amônia e Hidrogênio baixo carbono Numa segunda fase a biorrefinaria vai desenvolver novos produtos energéticos utilizando o palhiço e a vinhaça e a torta de filtro como substrato de matéria-prima para a produção de biogás, biometano, biofertilizantes, CO₂ industrial, amônia e hidrogênio baixo carbono. Em particular, os resíduos da cana-de-açúcar são reconhecidos como matéria-prima atraente para biorrefinarias devido aos efeitos que podem ser obtidos ao mesmo tempo em que previnem a poluição ambiental.

Desenvolvemos uma série de testes de fermentação da palha, vinhaça e torta para explorar os melhores parâmetros de processo e características para a produção de biogás e biometano.

Os resultados mostraram que um pré-tratamento biológico e químico combinado melhorou efetivamente a produtividade de biogás e do biometano da cana-de-açúcar como substratos de fermentação.

Os tipos de biomassa da cana-de-açúcar são abundantes e amplamente disponíveis, portanto, têm sido consideradas um substrato para fermentação anaeróbica. O pré-tratamento é uma solução promissora para melhorar a biodegradabilidade e atingir uma maior produção de biogás e biometano de materiais lignocelulósicos.

O biometano pode substituir diretamente o gás natural ou, de outra forma, servir como substituto de outros combustíveis fósseis, dependendo da aplicação final.

A vantagem de produzir biometano a partir dos resíduos da cana-de-açúcar é que ele pode ser usado nos setores de energia, construção e indústria e, portanto, pode gerar mais economia de custos para a sociedade. Ajudaria na descarbonização da aviação e do transporte marítimo que necessitam de combustíveis líquidos renováveis.

Isso significa que pode fazer sentido usar uma grande parte dos resíduos disponíveis para produzir biocombustíveis e principalmente para descarbonizar totalmente o transporte no Brasil, seja na forma de biometano, hidrogênio verde ou combustível líquido.

Como o biometano produzido localmente reduz a necessidade de importação de gás natural, ele pode melhorar diretamente a independência e a segurança energética e proteger contra a exposição à volatilidade dos preços do gás natural.

O aproveitamento da palha, torta e da vinhaça como matéria-prima para a produção de biogás/biometano representa uma oportunidade para reduzir a demanda por combustíveis fósseis e a importação de eletricidade na matriz energética de áreas urbanas.

O valor do biogás e do biometano é reforçado como o Cenário de Desenvolvimento Sustentável (EDS) da AIE, que atende integralmente às metas globais de combate às mudanças climáticas, melhoria da qualidade do ar e acesso à energia moderna.

Estamos também avaliando a possibilidade de utilização dos resíduos da cana-de-açúcar como uma matéria-prima significativa para a produção de hidrogênio devido ao seu alto teor de celulose, abundância e teor mínimo de enxofre.

Essas características as tornam adequadas para diversas tecnologias de produção de hidrogênio, incluindo biohidrogênio e processos de reforma líquida derivados de biomassa, contribuindo para a produção sustentável de energia. Uma estratégia é a reforma a vapor de metano, mais econômica e com alta capacidade de produção.

Bem como uma avaliação da fermentação anaeróbica por microrganismos pode produzir hidrogênio diretamente a partir de biomassa da cana-de-açúcar, oferecendo um método energeticamente eficiente que utiliza resíduos orgânicos para a produção de bioprodutos.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU destacam o potencial do uso de folhas para a produção de hidrogênio. Acompanha o progresso global em direção ao ODS7, que visa garantir energia confiável, acessível, sustentável e moderna para todos.

O hidrogênio verde (catalisador para a sustentabilidade ambiental, o crescimento econômico e o progresso social), uma fonte promissora de energia limpa, desempenha um papel vital na descarbonização e na obtenção de emissões líquidas zero até 2050 (produz energia limpa e gestão eficiente de resíduos).

SEGUNDO PROJETO EM DESENVOLVIMENTO PARA IMPLANTAÇÃO DE BIORREFINARIA CANA-DE-AÇÚCAR NO MATO GROSSO COM INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE PIRÓLISE (PRODUÇÃO DE BIOCARBONO, BIOÓLEO E GÁS DE SÍNTESE) OU BIOCHAR (EXTRATO PIROLENHSO E VINAGRE DE MADEIRA) E DE GASEIFICAÇÃO (PRODIÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE COM USO DA BIOMASSA CANA-DE-AÇÚCAR.

Gaseificação de Biomassa da Cana-de-açúcar. A gaseificação de biomassa é uma integração de inúmeras etapas sobrepostas, o que impossibilita o controle e a otimização dessas diferentes etapas de forma distinta em um gaseificador de estágio único.

Uma estratégia de gaseificação atípica separa a pirólise e a gaseificação de biomassa em estágios separados com controle individual, que são então posteriormente integrados, ou seja , uma gaseificação em vários estágios.

Biocarbono e Biochar. Ela evita a mistura de voláteis produzidos e biocarvão (biocarbono ou biochar). Assim temos uma maior pureza do gás de saída, taxa de transformação de biocarvão e eficiência, juntamente com baixos níveis de formação de alcatrão, podem ser alcançados ao empregar esta estratégia.

A pirólise é a decomposição térmica da biomassa que ocorre na ausência de oxigênio com faixas de temperatura de operação de 350 a 550 °C que podem chegar a até 700 °C. O processo de pirólise decompõe materiais orgânicos em misturas sólidas, líquidas e gasosas.

Os produtos de pirólise são transportados para uma unidade central de gaseificação de biomassa, melhorando assim a densidade energética do vetor de energia transportado e, portanto, a economia da cadeia de suprimentos.

A densidade energética é significativamente aumentada quando a biomassa é transformada em óleos pirolíticos ou biocarbono/biochar (densidade onde o cavacos de madeira é de 8 GJ m⁻³ e o bio-óleo e o biocarbono/biochar aumentam para 30 GJ m⁻³ e 26 GJ m⁻³).

Desenvolvemos uma gaseificação multi estágio onde pirólise (aumento da quantidade de carbono orgânico no solo - método de sequestro de carbono) e a gaseificação são realizadas em zonas divididas dentro de um gaseificador. Isso permitiu a conversão de biomassa da cana-de-açúcar em produtos utilizáveis em configurações operacionais otimizadas para cada etapa individual.

O principal objetivo deste conceito foi obter um gás de síntese limpo (gás combustível para geração de calor) e de alta qualidade com baixo teor de alcatrão. O biochar é conhecido por recircular o carbono orgânico de volta ao solo e auxiliar na adsorção iônica, evitando assim a lixiviação de nutrientes e minerais vitais para as águas subterrâneas.

Além disso, a capacidade de retenção de água é aprimorada quando o biochar é misturado a solos arenosos (alternativa neutra em carbono para a produção de fertilizante ecológico).

O biochar pode ser fonte de energia, misturado com fertilizantes para remediação do solo ou usado como redutor para aplicações metalúrgicas (biocarbono), catalisadores ou adsorventes.

Hidrogênio verde. Na segunda fase estaremos desenvolvendo um modelo de gaseificação integrada com reatores de deslocamento de água-gás e uma unidade de recuperação de produto para produção de hidrogênio. A gaseificação de biomassa da cana-de-açúcar é um tratamento térmico que resulta em alta produção de produtos gasosos.

A reforma do vapor de hidrocarbonetos (oxidação parcial de resíduos e do vapor selecionada de compostos aromáticos e a gaseificação) para produzir uma mistura de H_2 e CO_2 (gás de síntese), seguida pela conversão por deslocamento de água-gás para produzir H_2 e CO_2 .

O gás hidrogênio será produzido pela gaseificação de vapor de resíduos carbonizados. A energia necessária para o processo de carbonização pode ser minimizada por meio da economia parcial de energia do reator de gaseificação.

A biomassa (cana-de-açúcar) pode ser considerada a melhor opção e tem o maior potencial, atendendo às necessidades energéticas para garantir o fornecimento de combustível zero carbono (produção de hidrogênio de forma sustentável).

A gaseificação da biomassa (cana-de-açúcar) oferece a rota mais rápida e econômica para a produção de hidrogênio renovável. O hidrogênio é um combustível limpo, sem emissões de CO₂, e pode ser facilmente utilizado em células de combustível para geração de eletricidade.

Além disso, o hidrogênio apresenta um alto rendimento energético de 122 kJ/g, 2,75 vezes maior que os combustíveis de hidrocarbonetos.

O uso do hidrogênio como combustível para transporte e aplicações estacionárias está recebendo muita atenção favorável.

O gás hidrogênio está sendo explorado para uso em motores de combustão e veículos elétricos a célula de combustível e poderá ser utilizado em transporte de caminhões, aeronaves e navios.

Espera-se que a geração sustentável de biocombustíveis a partir de biomassa residual da cana-de-açúcar seja uma parte importante da estratégia de gestão energética para este século. A biomassa, em todas as suas formas, é atualmente considerada a quarta maior fonte primária de energia e um substituto viável, num futuro não muito distante, para aplicações atualmente dependentes de combustíveis fósseis.

Uma maneira promissora de reduzir o impacto da produção de biomassa da cana-de-açúcar é a aplicação plena dos princípios da (bio)economia circular: o uso circular de madeira e subprodutos e a priorização do uso de resíduos que são de vital importância para a produção de biocombustíveis energéticos e na busca de uma transição energética zero carbono.

A descarbonização industrial no Brasil poderá ocorrer de forma diferente em diferentes setores industriais, dependendo das características locais, da viabilidade das opções de descarbonização pode ser fortemente influenciada pelo preço e disponibilidade de biomassa da cana-de-açúcar, eletricidade renovável e locais de armazenamento de carbono.

Portanto, diferentes estratégias e caminhos para reduzir as emissões em todos os setores devem ser explorados. E avaliamos os tipos de biomassa da cana-de-açúcar.

Finalmente, avaliamos as principais tecnologia para aproveitamento da biomassa da colheita e do processamento da cana-de-açúcar. Enumeramos as tecnologias:.

1. Tecnologia de aproveitamento da palha da cana-de-açúcar para a produção de Biochar (extrato pirolenhoso e vinagre da madeira) para sequestro de carbono, fertilizante ecológico e para agricultura regenerativa. A alta demanda por fornecimento de energia em uma população mundial crescente requer o uso de alternativas não fósseis como chave fundamental para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e limitar o aquecimento global. A produção de biocombustíveis líquidos é uma ação importante para conter o aquecimento global, pois representa uma tecnologia madura, escalável e bem desenvolvida, com comprovada baixa pegada de carbono.

Nas últimas décadas, a colheita pré-queima foi quase abolida, e o sistema mecanizado verde foi adotado em quase 97% das áreas de cana-de-açúcar no centro-sul do Brasil.

Como consequência, grandes quantidades de palha, variando de 10 a 20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, foram depositadas nos canaviais, disponibilizando aproximadamente 80 milhões de toneladas de palha por ano. A manutenção da palha na superfície do solo promove mudanças substanciais no sistema de produção de cana-de-açúcar, como melhorias na qualidade do solo e nos estoques de carbono (C), e aumento das emissões de N₂O do solo.

Assim, além de gerar diversos benefícios ao sistema solo-planta-atmosfera, a manutenção da palha na superfície do solo também representa uma valiosa matéria-prima que pode ser convertida em biocombustíveis avançados, uma questão de interesse de várias empresas.

Uma das rotas potenciais para produzir biocombustíveis avançados usando biomassa lignocelulósica é a pirólise, através da qual a biomassa é exposta a altas temperaturas em níveis baixos ou nulos de oxigênio para ser convertida em bio-óleo, biogás e biochar. O bio-óleo pode ser usado na produção de biocombustíveis avançados (ou seja, combustíveis de aviação sustentáveis), o biogás é usado no fornecimento de energia e o biochar é aplicado principalmente em solos agrícolas.

O biochar é um material carbonizado rico em C aromático que tem sido usado como um corretivo do solo em campos agrícolas para fornecer vários serviços ecossistêmicos.

Um impacto ambiental positivo dessa prática é a redução potencial das emissões de N_2O , um gás traço emitido em baixas quantidades, mas com um potencial de aquecimento global 273 vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2).

A palha de cana-de-açúcar tem sido considerada uma matéria-prima promissora e econômica para a produção de bioenergia por meio da pirólise.

O biochar à base de palha é um subproduto da pirólise de biomassa que tem o potencial de mitigar as emissões de óxido nitroso.

2. Tecnologia de aproveitamento da vinhaça e da torta de filtro da cana-de-açúcar para a produção de Biometano. A produção de etanol de cana-de-açúcar gera cerca de 360 bilhões de litros de vinhaça, um efluente líquido com uma demanda química média de oxigênio de 46.000 mg/L.

A vinhaça ainda contém cerca de 11% da energia original do caldo de cana, mas essa energia química é diluída. Esse resíduo, geralmente descartado ou aplicado na fertirrigação, é um substrato adequado para digestão anaeróbica.

Com um potencial de biometano variando de 215 a 324 L de metano produzido por quilo de matéria orgânica na vinhaça, a DA poderia melhorar a produção de energia das biorrefinarias de cana-de-açúcar.

A vinhaça é um coproduto necessário da destilação, gerado em grandes quantidades (10–15 L por litro de etanol). É rico em resíduos orgânicos e minerais, levando a um tremendo problema ambiental, e também a muitas oportunidades de processamento.

O aumento da circularidade em direção a biorrefinarias de desperdício zero torna diferentes aplicações de vinhaça cada vez mais atraentes, como fertilizante, ração animal ou fonte de energia por meio de DA.

Este último é cada vez mais importante, com pesquisa ativa e implementação recente em larga escala.

A vinhaça da cana-de-açúcar é um subproduto da indústria da cana-de-açúcar e pode ser usada para geração de biometano.

Esse processo envolve microrganismos quebrando a matéria orgânica na vinhaça na ausência de oxigênio, produzindo metano e dióxido de carbono, bem como um resíduo rico em nutrientes que pode ser usado como fertilizante.

O biometano pode ser usado como uma fonte renovável de energia para eletricidade e transporte.

3. Tecnologia de aproveitamento do palhiço e do bagaço da cana-de-açúcar para a produção de Biopellets. A crescente valorização de matérias-primas lignocelulósicas renováveis e econômicas representa uma abordagem viável, sustentável e ecologicamente correta para a produção de biopellets como fontes alternativas de energia. A biomassa da cana-de-açúcar tem o potencial de ser uma fonte de energia alternativa sustentável, acessível, renovável e ecologicamente correta. Devido a várias desvantagens, incluindo sua facilidade de absorção e liberação de água, alto teor de umidade e baixo valor calorífico, a biomassa da palha da cana-de-açúcar deve ser pré-tratada por meio de moagem ou secagem.

Um dos problemas com que o setor energético está lidando atualmente é o armazenamento de grandes quantidades de combustível de biomassa da cana-de-açúcar. Para resolver esse problema, a biomassa da cana-de-açúcar (palha bagaço) é convertida em combustíveis sólidos, como biopellets, para facilitar o manuseio, o transporte e o armazenamento. Além disso, os biopellets da cana-de-açúcar são uma maneira rápida e fácil de gerar energia de biomassa zero carbono, que é eficiente e renovável.

4. Tecnologia Bioenergia da Cana-de-açúcar com Captura e Armazenamento de Carbono é uma tecnologia essencial para reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE).

No relatório avaliamos os detalhes desta tecnologia como uma cadeia de suprimentos multifacetada que tem a vantagem de permitir emissões negativas enquanto gera energia.

Sua versatilidade é ilustrada pela possibilidade de usar toda a gama de matérias-primas de biomassa da cana-de-açúcar e muitas vias de conversão. É uma tecnologia altamente adaptável, pois pode ser aplicada a uma variedade de indústrias como a do setor sucroenergético.. Uma vez que o dióxido de carbono (CO₂) tenha sido capturado, ele deve ser transportado e armazenado, ou mesmo reutilizado.

No entanto, a reutilização pode às vezes resultar em nenhuma emissão negativa, pois o CO₂ é liberado na atmosfera em curto prazo.

Num contexto em que limitar o aquecimento global se tornou uma questão urgente, os projetos de captura de carbono ao setor sucroenergético precisam de ser encorajados e apoiados para garantir que podem continuar a enfrentar os desafios do futuro. A captura pós-combustão opera em baixas pressões e é adequada para gases de combustão de baixas concentrações de CO₂, mostrando altas eficiências de laboratório a escala comercial.

Essa tecnologia pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ das usinas de cana-de-açúcar. O projeto está focado na tecnologia de captura baseada para determinar a viabilidade de capturar gases de combustão diretamente versus a necessidade de concentrar o CO₂ para melhor captura. Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono, o Beccs consiste em uma tecnologia que combina a geração de energia.

A partir de recursos renováveis – como a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar – com a captura de gás carbônico gerado no processo, que é tratado e depois armazenado em uma formação geológica.

Assim, enquanto as iniciativas tradicionais de captura e armazenamento de carbono (CCS) estão associadas à queima de combustíveis fósseis – como o gás natural –, os sistemas Beccs vão um passo além ao contribuir para emissões negativas de gases de efeito estufa, ou seja, liberando a menor quantidade possível desses gases e reabsorvendo as emissões restantes

5. Tecnologia Biocarvão/Biocarbono Bio-óleo e Gás sintético com uso da biomassa da cana-de-açúcar. O biocarvão ou biocarbono recentemente ganhou atenção como um substituto potencial para o carvão em processos siderúrgicos e alumínio devido ao seu potencial de captura de carbono.

Os biocombustíveis produzidos a partir de biomassa residual da cana-de-açúcar, como biocarvão, bio-óleo ou gás de síntese, podem ser uma substituição propícia para combustíveis fósseis.

O biocarvão recebeu muito interesse como um substituto potencial devido à sua alta combustibilidade, alto conteúdo energético, melhor manuseabilidade e capacidade reduzida. Além disso, a principal vantagem de usar biomassa ou biocarvão como combustível é sua neutralidade de carbono. No relatório avaliamos os detalhes de produção de biocarvão/biocarbono, bio-óleo e gás sintético da biomassa (palha e bagaço) da cana-de-açúcar.

6. Tecnologia de Hidrogênio Verde com uso do bagaço da cana-de-açúcar. Combustíveis alternativos de baixas ou zero emissões de CO₂ como a biomassa da cana-de-açúcar são uma solução viável para substituir combustíveis fósseis. A combustão de Hidrogênio é responsável por zero emissões de CO₂. O Hidrogênio verde é um substituto ao gás natural como retratamos no relatório. O etanol de segunda geração pode ser uma excelente matéria-prima para produzir hidrogênio verde, uma vez que é produzido a partir da fermentação da biomassa da cana-de-açúcar e é um método de emissão zero.

Pesquisas sobre a utilização efetiva do bagaço e da palha da cana-de-açúcar demonstraram avanços significativos na produção de biohidrogênio. A integração de estratégias inovadoras de pré-tratamento, como hidrólise ácida, tratamentos oxidativos e sacarificação enzimática, provou ser essencial para recuperação de açúcar e a eficiência dos processos de fermentação.

Estudos sobre a produção sequencial de hidrogênio e metano, bem como o uso da dinâmica microbiana para otimizar a fermentação, ressaltam ainda mais a versatilidade da cana-de-açúcar como matéria-prima de biohidrogênio. A mudança global em direção ao biohidrogênio representa uma oportunidade para o Brasil alavancar sua extensa infraestrutura de cana-de-açúcar. No entanto, concretizar esse potencial requer abordar barreiras tecnológicas e logísticas, incluindo a otimização de cadeias de suprimentos, desenvolvimento de tecnologias avançadas de conversão e expansão de colaborações de pesquisa.

Ao investir nessas áreas, o Brasil pode fortalecer seu papel na formação do futuro da produção de biohidrogênio

Depois dos combustíveis fósseis, a biomassa e a energia solar são consideradas a fonte de longo prazo para a produção de energia de hidrogênio.

Usando biomassa da cana-de-açúcar como alimentação, a produção de hidrogênio verde pode ser feita por tecnologia de gaseificação para o desenvolvimento de energia sustentável.

A biomassa da cana-de-açúcar é a melhor maneira de produzir hidrogênio verde, que é mais limpo e econômico, e é considerado uma das maneiras sustentáveis . Utilizamos em teste industrial o bagaço de cana-de-açúcar como biomassa para a produção de hidrogênio. Desenvolvemos três modelos de processos de gaseificação de biomassa: fluidizado, leito fixo integrado e processo de água supercrítica. Eles são mais eficazes em matérias-primas ricas em lignina e produzem alta produção de gás de síntese.

Hidrogênio desempenha um papel cada vez maior na economia verde. Estima-se que esta transição reduza as emissões de CO₂ em até 30% até 2030. Essas opções variam do aumento da eficiência energética e do uso da biomassa da cana-de-açúcar como fonte de geração de energia térmica (aquecimento, calor e vapor) ao desenvolvimento e implantação de novas tecnologias de emissões negativas ou zero carbono.

A coalimentação de hidrogênio junto com biomassa da cana-de-açúcar para aquecimento industrial é uma abordagem emergente que está sendo explorada por várias indústrias como parte dos esforços para reduzir as emissões de carbono e fazer a transição para fontes de energia mais sustentáveis. O hidrogênio poderia teoricamente ser usado como um agente redutor.

Isso permite a redução sem a produção de quaisquer gases de efeito estufa.

Uma grande quantidade de hidrogênio precisa ser adicionada à reação a uma taxa estável, enquanto a água produzida pela reação deve ser constantemente removida.

Altas temperaturas são necessárias para a reação, no mesmo o ponto de fusão.

Ampliamos o leque de opções de uso energético da biomassa da cana-de-açúcar com as tecnologia de produção de biocarvão/biocarbono, bio-óleo e gás de síntese como um substituto do carvão, óleo diesel e o gás natural.

Bem como a utilização do biometano e do hidrogênio verde como um substituto do gás natural.

Esforços estão em andamento para desenvolver e implementar processos de baixo carbono e neutros em carbono, aumentar o uso de fontes de energia renováveis, avançar na pesquisa de novos materiais e tecnologias e envolver as partes interessadas para impulsionar iniciativas de sustentabilidade com uso da biomassa residual da cana-de-açúcar.

AUTOR DO ARTIGO

Este artigo foi desenvolvido por Celso Oliveira. Consultor especializado em desenvolvimento de projetos industriais sustentáveis zero carbono e na área de biomassa, biogás, biocarbono, pellets e bioenergia. Formação em contencioso jurídico e direito empresarial internacional no Brasil e especialização em Energias renováveis pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Lisboa Portugal. Autor de mais 150 livros na área de Energia Renovável, Biomassa e Pellets e do Atlas Brasileiro Biomassa e Bioenergia.. Diretor Executivo da Brasil Biomassa e Energia Renovável com 205 projetos industriais de produção de biomassa e pellets e em 120 Estudo de mercado e mapeamento dos tipos de biomassa. , Conferencista com mais de cento e cinco palestras em Congressos nacionais e Internacionais com destaque All About Energy, Biomass Investing Brazil, Energy Summit e América Pulp & Paper Outlook Conference. Diretor Executivo da European Energy SRL. Coordenador do Congresso Brasileiro de Biomassa e Bioenergia. Convidado pelo Governo Federal para a participação da Missão Brasil Holanda Acordo Bilateral de Bioenergia e Biomassa. Presidente da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e Diretor Executivo do Instituto Brasileiro Bioenergia

Todos os direitos do artigo técnico reservados a Associação Brasileiras das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e para Brasil Biomassa e Energia Renovável

© 2026 ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável Copyright by Celso Marcelo de Oliveira Todos os direitos reservados a Brasil Biomassa e Energia Renovável

Copyright by Celso Marcelo de Oliveira Tradução e reprodução proibidas sem a autorização expressa do autor (contato autor diretoriabrasilbiomassa@gmail.com ou Whats(41) 998173023)

Tradução e reprodução proibidas sem a autorização expressa do autor. Nenhuma parte deste artigo pode ser reproduzida ou transmitida de qualquer forma ou meio, incluindo fotocópia, gravação ou informação, ou por meio eletrônico, sem a permissão ou autorização por escrito do autor. Lei 9.610, de 19 de fevereiro de 1998. Edição eletrônica no Brasil em versão eletrônica

Proibida a reprodução com ou sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio impresso e eletrônico. Quando avaliar este artigo técnico você deve reconhecer que nossas informações, materiais e/ou serviços são apenas para seu uso interno, e não para qualquer uso externo e/ou disseminação, ou publicação geral e/ou divulgação a terceiros.

Toda e qualquer informação e/ou material fornecido é baseado em estudos e pesquisa científica de mercado e/ou pesquisa secundária e, portanto, está sujeito a flutuação e variação.

Associação Brasileira das Indústrias Biomassa e Energia Renovável - Brasil Biomassa
Consultoria Engenharia Tecnologia - Instituto Brasileiro Bioenergia

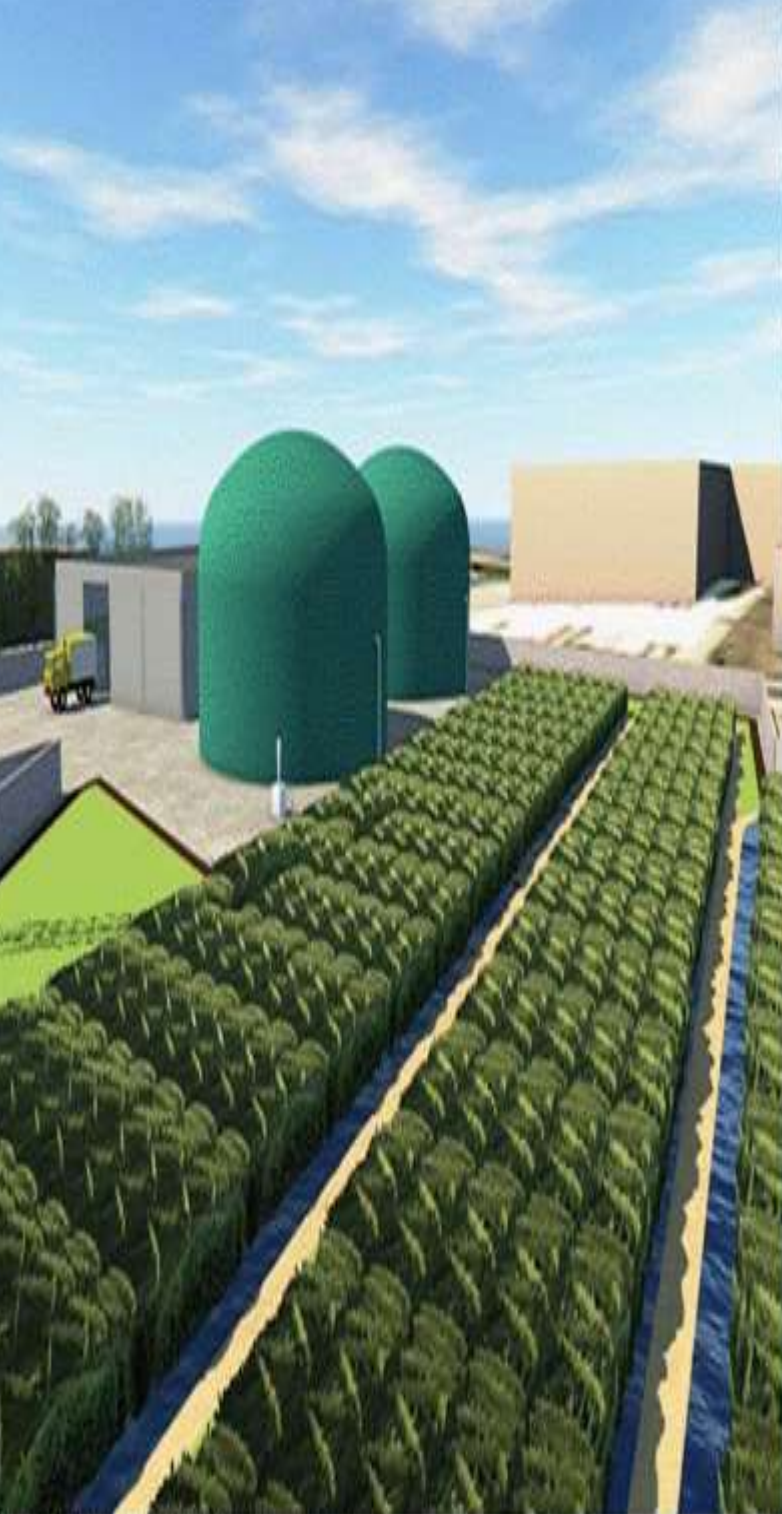
Av. Candido Hartmann, 570 24 andar Conj. 243 Curitiba Paraná

Fone (41) 30406777 Whats Brasil Biomassa (41) 998173023

Plataforma digital Editora Brasil Biomassa <https://www.editorabrasilbiomassa.com/>

Plataforma digital Brasil Biomassa <https://www.brasilbiomassa.com/>

E-mails diretoriabrasilbiomassa@gmail.com ou diretoria@editorabrasilbiomassa.com





BIOGÁS E BIOMETANO SUBSTITUTO GÁS NATURAL



Introdução. Hoje em dia, o impacto das alterações climáticas em todo o mundo é inegável. A maior parte dos problemas ambientais, sociais e económicos que todas as sociedades enfrentam estão associados ao consumo de energia. O petróleo bruto e o gás natural são utilizados há décadas, sendo a principal fonte de energia nas principais economias. No entanto, está provado que a maior parte das emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa (GEE) são responsáveis pelo consumo destes combustíveis fósseis, aumentando o aquecimento global.

A preocupação não é apenas com os impactos negativos no meio ambiente; é também a diminuição das reservas de combustíveis fósseis.

Esta situação é inquietante e tem focado a atenção mundial na busca e adoção de fontes alternativas de energia. Uma delas é a produção de biogás, biometano e gás carbônico industrial com uso dos resíduos da biomassa.

O biogás, biometano e o gás carbônico são biocombustíveis na forma gasosa produzidos a partir de fontes biológicas e traz uma opção de compartilhamento da demanda energética por meio do tratamento de alguns resíduos de biomassa.

Nesta perspectiva, avaliamos a produção de biogás através da utilização de biomassa com a adoção de tecnologias biológicas como uma forma promissora de contribuir para o fornecimento de energia segura e sustentável, fornecendo calor, eletricidade, gás carbônico industrial e biometano (semelhante ao gás natural).

Biomassa como fonte de energia. A energia se manifesta por calor ou eletricidade derivada de combustíveis fósseis.

Em alguns países, não só os combustíveis fósseis podem ser utilizados para este objetivo; existem outros elementos como algumas plantas, resíduos agrícolas e resíduos orgânicos municipais que também podem fornecê-lo.

Assim temos que a energia não pode ser criada nem destruída; só pode ser transformado de uma forma para outra.

Por exemplo, a energia química armazenada em alguns resíduos orgânicos pode ser convertida em outras formas de energia. É exatamente isso que a bioenergia busca: o aproveitamento da energia armazenada em materiais orgânicos. É aqui que o conceito de biomassa é introduzido como uma matéria-prima orgânica que pode ser tratada para gerar calor e energia a partir de biocombustíveis líquidos, sólidos ou gasosos.

A este respeito, os recursos de biomassa representam uma fonte de produção de biogás. É também um dos recursos mais abundantes e compreende todos os materiais biológicos, incluindo organismos vivos ou recentemente vivos, e é considerado um recurso orgânico renovável.

Os recursos de biomassa retiram a sua energia do sol, tal como a maioria das outras fontes de energia renováveis. Por exemplo, a energia fotovoltaica capta a radiação solar de forma direta por meio de equipamentos especializados que fornecem energia. Além disso, a energia solar que é transferida pelo espaço provoca a movimentação das massas de ar por meio do aquecimento, resultando no vento, que pode ser aproveitado por meio de turbinas e gerar eletricidade. A energia também é transferida para os fluxos de água. A precipitação do vapor d'água devido à combinação do vento e do calor da energia solar provoca a chuva, que aciona os rios. A força do fluxo de água também pode ser explorada para produzir energia hidrelétrica.

A energia proveniente da biomassa não é exceção. A chamada bioenergia pode aproveitar a energia solar armazenada em diversos recursos de biomassa.

As plantas, por exemplo, utilizam a energia solar para converter compostos inorgânicos assimilados em compostos orgânicos.

Um animal que come plantas aproveita a energia armazenada nestas e gera biomassa. A biomassa funciona como uma espécie de armazenamento (bateria) de energia solar transferida de um nível trófico para outro. A transferência de energia é evidente em todos os processos dos seres vivos.

Em todo o mundo, existem diferentes fontes de biomassa que podem ser utilizadas para a sua conversão em energia, o que inclui materiais de origem biológica, como plantas e animais vivos e resíduos resultantes, resíduos agrícolas e florestais, algas marinhas, resíduos agro-industriais, esgotos e resíduos sólidos urbanos. A maioria destes recursos de biomassa representam um problema ambiental se não forem geridos, transportados ou eliminados de forma adequada. Consequentemente, se a energia for gerada pela utilização deles, podemos contribuir para a redução da poluição ambiental. Além disso, esta fonte de energia tem a vantagem de não liberar CO₂ na atmosfera devido à captura e armazenamento de carbono, servindo como um eficaz sumidouro de carbono. Além disso, a biomassa pode ser multiplicada em diferentes formas de energia, ou seja, calor proveniente da madeira e de resíduos florestais, energia química proveniente do hidrogénio e de alguns biocombustíveis como o biocarbono, e energia elétrica proveniente da utilização de biogás e biometano.

Biogás e Biometano X Gás Natural. O gás natural provém da decomposição de matéria orgânica em condições anaeróbicas, mas foi exposto a intenso calor e pressão, num processo ocorrido há cerca de 150 milhões de anos, que permite o aprisionamento do gás entre os espaços porosos das rochas (sistemas porosos). O gás produzido durante este período está localizado vários metros abaixo da superfície da Terra.

Não é considerado um recurso renovável. O processo de produção de gás natural considera principalmente a extração do subsolo, coleta, tratamento, transporte e serviços de distribuição.

Por outro lado, biogás é o termo empregado para se referir ao gás obtido em curto espaço de tempo (considerando a escala humana) pela digestão anaeróbica de recursos de biomassa. O processo ocorre às vezes de forma espontânea, contínua ou indutora, mas sempre é muito sensível ao processo biológico. Na verdade, microrganismos específicos, num processo de quatro etapas (hidrólise, acidificação, acetogênese e metanogênese), conseguem a digestão anaeróbica do material orgânico. Para tanto, determinados parâmetros físico-químicos como temperatura, pH, carga orgânica diária, nutrientes disponíveis, tempo de retenção, agitação e outros fatores inibitórios devem ser adequados ou ajustados para a geração de biogás.

A principal diferença entre o gás natural e o biogás está relacionada ao teor de dióxido de carbono. Este último está contido em 25–45% da composição total do biogás, enquanto o gás natural contém menos de 1%. Além disso, o gás natural contém outros hidrocarbonetos em vez de metano.

O teor de metano influencia fortemente o poder calorífico destes gases. O conteúdo energético do biogás semelhante ao do gás natural pode ser obtido se o dióxido de carbono do biogás for removido em um processo de atualização.

A presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S) no biogás deve ser purificada ou transformada em metano, a fim de diversificar o uso final do biogás de diversas maneiras.

Reservas de gás natural e fontes de biogás. O gás natural é um combustível fóssil frequentemente encontrado sob os oceanos, perto de depósitos de petróleo, preso entre os espaços dos poros das rochas e abaixo da superfície da Terra. À semelhança da exploração de petróleo, existem reservatórios de gás natural em todo o planeta. Um reservatório é um local onde grandes volumes de metano podem ficar presos no subsolo da Terra. A este respeito, as reservas provadas de gás natural são quantidades estimadas que análises de dados geológicos e de engenharia demonstraram ser economicamente recuperáveis de reservatórios conhecidos no futuro.

De acordo com as Estatísticas Energéticas Internacionais, existiam 6.973 reservas provadas em todo o mundo, nas quais os países do Médio Oriente e da Eurásia representam a grande maioria. Embora o gás natural tenha se tornado um dos combustíveis mais utilizados em todo o mundo e as tendências apontam para um aumento no número de reservas provadas devido à aplicação de novas tecnologias, a população mundial continuará a crescer e ainda exigirá mais energia.

Portanto a quantidade dos combustíveis fósseis não é um recurso suficiente para todos os países. Bem como, o contínuo aumento dos preços dos recursos fósseis e os impactos visíveis no aquecimento global.

Nesse cenário, um combustível versátil proveniente de uma ampla variedade de biomassa é o biogás. Pode fornecer uma fonte renovável de energia e pode levar à redução dos impactos da poluição através da eliminação inadequada de resíduos.

Embora os recursos não descobertos e tecnicamente recuperáveis de gás natural continuem a aumentar, também está a ser gerada uma grande quantidade de resíduos sólidos. A maioria dos países do mundo lida com os seus resíduos; representam um problema socioambiental pela falta de gestão.

Esta biomassa pode ser um aproveitamento do potencial da natureza para produzir energia. A este respeito, o futuro papel do biogás no mundo está relacionado com a disponibilidade de diferentes tipos de matérias-primas orgânicas que dependem de uma série de fatores económicos, sociais, tecnológicos, ambientais e regulamentares. Prevê-se que, até 2028, as energias renováveis representarão 19% da matriz energético total da UE, no qual a biomassa representa 59% dos 280 milhões de toneladas de equivalentes de petróleo (Mtep). Tal como a procura de biomassa, a procura de biogás tem vários setores de utilizadores finais, que apresentam características diferentes em termos de aplicação, valor económico acrescentado, clientes, benefícios sociais e impacto ambiental.

Se o biogás for condicionado ou limpo (produção de biometano e gás carbônico industrial), será uma excelente solução para uma variedade de aplicações comumente conhecidas para o gás natural, além da versatilidade de seus usos finais.

Alguns exemplos incluem: combustível para motores, eletricidade, calor, combinados e, recentemente, substituição de compostos de carbono em produtos plásticos e também a geração de subprodutos que podem ser usados como fertilizante orgânico e amônia verde.

Vantagens da energia de biomassa, biogás e biometano.. Há uma importante vantagem ambiental da utilização da biomassa em termos de redução do esgotamento dos recursos naturais neutros em carbono em seu ciclo de vida e sistemas de energia sustentáveis .

Estima-se que, até 2025, 50% do atual consumo de gás na União Europeia poderá ser coberto por biometano proveniente de matérias-primas digeridas, contribuindo para a captura de gases com efeito de estufa, como o metano.

Além disso, o processo de fermentação é uma alternativa para o tratamento de resíduos brutos de base úmida e, principalmente, a digestão anaeróbica devido ao custo-benefício.

O biogás pode ser queimado diretamente na caldeira para aquecimento e/ou motor para cogeração, enquanto o biogás atualizado (biometano) pode ser injetado na rede de gás natural e usado diretamente no consumidor em caldeiras e pequena cogeração de calor e energia.

Tecnologias de conversão de biomassa. Desde o século passado (1897), alguns países asiáticos, como China e Índia, iniciaram os primeiros testes de utilização de biogás, através de um processo de estabilização que permite a utilização em aplicações domésticas e agrícolas. Da mesma forma, a Inglaterra relatou usá-lo na década de 1930 para iluminar ruas. Em ambos os casos, a principal fonte de biomassa para a produção de biogás foi retirada do esgoto, a fim de fornecer combustível para cozinhar e iluminar. Num breve contexto, a utilização da biomassa para fornecer energia tem sido fundamental para o desenvolvimento das sociedades.

Hoje em dia, a procura de energia e o impacto nas alterações climáticas têm levado a apelos ao aumento da utilização do biogás de diferentes formas.

Vejamos as principais tecnologias de processo ou conversão empregadas para a biomassa com relação específica.

Processo de conversão de biomassa. As tecnologias de conversão de biomassa estão intimamente relacionadas ao tipo de biomassa, à quantidade, à disponibilidade, à relação custo-benefício e às necessidades do usuário final do biocombustível. A seleção da tecnologia depende do interesse principal do “produtor”. Para todos os casos, os principais tratamentos de biomassa que podem ser aplicados estão englobados em quatro tecnologias de conversão: combustão direta, termoquímica, bioquímica e biotecnológica e nanotecnologia.

É importante notar que é necessário um pré-tratamento da biomassa antes de aplicar uma tecnologia de conversão. Em alguns casos, a biomassa deve ser colhida, coletada, transportada ou armazenada.

Além disso, a disponibilidade de recursos varia de região para região, de acordo com as condições climáticas, tipo de solo, geografia, densidade populacional e atividades produtivas, o que torna mais complexa a escolha da tecnologia de processamento.

Combustão direta. Um dos usos mais antigos em que a biomassa tem sido aproveitada para energia no mundo é através da queima de madeira (combustão). Esta ação representa uma utilização tradicional da biomassa, especialmente nas zonas rurais. É considerado um recurso essencial ao desenvolvimento económico das sociedades. Porém, quando a lenha é queimada em fogão aberto, perde-se cerca de 80% de energia. Recentemente, as tecnologias sugerem a utilização de fogões de eficiência energética, que não só apresentam uma melhor eficiência térmica como também evitam a poluição do ar interior.

Outros equipamentos especializados envolvem fornos, caldeiras, turbinas a vapor e turbogeradores. A combustão da biomassa permite a recuperação da energia química armazenada. Em geral, os processos de combustão envolvem a oxidação direta da matéria no ar, isto é, a ignição ou queima da matéria orgânica em uma atmosfera de ar suficiente para reagir com o oxigênio combustível.

Processo termoquímico. O processo termoquímico, assim como a combustão direta, tem um eixo central, a temperatura. Uma das principais diferenças é uma atmosfera induzida na qual ocorreu a conversão da biomassa. Este processo de oxidação pode ocorrer na presença ou ausência de um meio gaseificante.

A conversão da biomassa depende de variáveis de temperatura e pressão. Por exemplo, se o substrato a transformar estiver na presença de um gás como oxigênio, vapor de água ou hidrogênio, a produção de combustível é realizada através de gaseificação. Se, entretanto, a degradação do material ocorre na ausência de oxigênio, ou seja, nitrogênio, sob pressão e temperatura controladas, então o processo é denominado pirólise.

Processo bioquímico. O tratamento bioquímico, diferentemente do processo termoquímico, consegue a geração de energia por meio da transformação biológica de compostos orgânicos, empregando digestão anaeróbica ou fermentação de biomassa.

A fermentação é geralmente usada para produzir biocombustíveis, como etanol, a partir de culturas da cana-de-açúcar e milho. Porém, existe outra via, na qual é feita a conversão da biomassa, a digestão anaeróbica.

Entre as informações gerais sobre tecnologias de conversão, a digestão anaeróbica é o foco principal devido à produção direta de biogás. O processo anaeróbico é análogo ao processo de digestão dos ruminantes.

A biomassa é degradada por um consórcio de bactérias em um ambiente anaeróbico, produzindo um produto principal, o gás. Este gás, denominado biogás, representa uma tecnologia comprovada e a sua utilização está amplamente difundida no mundo.

Produção Biogás com Substratos de Biomassa. Para a produção de biogás, existem alguns tipos de biomassa que são mais precisas, como aqueles com alto teor de umidade em resíduos orgânicos (80-90%) ou resíduos de biomassa úmida como esterco, resíduos sólidos orgânicos municipais e lodo de esgoto. O processo de digestão anaeróbica geralmente ocorre em reatores ou tanques em um processo único e de múltiplos estágios ou digestão a seco.

O digestor anaeróbico pode ser categorizado, projetado e operado por diferentes configurações: batelada ou contínua, temperatura (mesofílica ou termofílica), conteúdo de sólidos (alto ou baixo teor de sólidos) e complexidade (estágio único ou multiestágio).

Outra configuração específica considerando a carga de taxa orgânica, o digestor, é dividido em sistemas passivos (lagoas cobertas), sistemas de baixa taxa (reator de mistura completa, fluxo tampão e fluxo tampão misto) e sistemas de alta taxa (estabilização de contato, filme fixo, suspensão média e lote de sequenciamento). Todos esses tipos de reatores realizam a digestão anaeróbica, mas cada um opera para características salientes com uma variedade de aplicações dos produtos finais.

Uma experiência no setor pecuário no México utilizando reator de digestão anaeróbica de lagoa coberta mostra benefícios no uso do biogás não apenas nos aspectos ambientais como a melhoria da qualidade das águas residuais, mas também economicamente devido ao evitar penalidades pelas descargas de água e a aceitação social de a atividade pecuária na região.

Neste exemplo, os diferentes benefícios da produção de biogás no setor pecuário destacaram a utilização do biogás na geração de energia. Contra outras fontes de energia, neste caso, o biogás produzido pode ser utilizado por um motor de combustão a gás.

O calor gerado pelos motores pode ser utilizado para aquecimento do reator ou secagem de grãos. O biogás tem a qualidade que não precisa ser consumido no momento da produção. A produção desse biocombustível também impacta em aspectos macro e microeconômicos, pela geração de novas fontes de empregos e acesso à energia em local remoto.

Além disso, o empresário pode vender um fertilizante orgânico e amônia obtido a partir de digerido de alta qualidade obtido na produção de biogás.

Além disso, consegue a redução do odor e a remoção de organismos patogênicos nos resíduos do gado. A emissão de metano dos adubos é capturada, reduzindo a liberação de metano para a atmosfera.

O metano (CH_4) é considerado um dos maiores contribuintes para as emissões de GEE do setor pecuário, com um potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2).

Em geral, as tecnologias de conversão de biomassa mencionadas acima podem ser integradas no conceito de biorrefinaria. Análogo ao processo petrolífero, as diferentes matérias-primas de biomassa oferecem uma vasta gama de produtos que podem ser utilizados como combustível, incluindo gás, substituto do coque ou produtos químicos, oferecendo maior possibilidade de utilização de sistemas de cogeração e instalações de abastecimento no setor dos transportes (biometano).

Processo de biometanização. Quando o principal produto final em uma planta de biogás é o metano, semelhante ao gás natural, esse gás atualizado é chamado de biometano. O teor de metano determina o valor energético do biogás.

A este respeito, uma das principais razões para atualizar o biogás para um nível equivalente ao do gás natural é injetar na rede de distribuição de gás e, assim, diversificar algumas fontes de gás natural.

O processo de biometanização abre novos caminhos para atingir esse objetivo: primeiro, porque o armazenamento de gás de forma ampliada permite a injeção em um sistema de distribuição e, segundo, devido à variedade de utilização do combustível em estações de transporte, principalmente.

As principais utilizações do biogás nos países em desenvolvimento são a iluminação, a cozinha e ainda mais em turbinas a gás.

Nos países industrializados, o biogás é produzido em digestores de grande escala (usinas de biogás) com interesse na concentração do metano do biogás para cumprir os padrões do gás natural. Dependendo da utilização final, são necessários diferentes tratamentos de biogás (limpeza ou valorização).

Por exemplo, o combustível de gás para veículos requer um biogás de qualidade semelhante à do gás natural, pelo que é necessário um processo de atualização do biogás. Em outras palavras, a biometanização permite que o biogás seja contido, controlado e distribuível.

Limpeza de biogás. Existem alguns componentes indesejáveis no biogás que promovem a corrosão em muitos materiais e motores: H_2S , oxigênio, nitrogênio, água, siloxanos e vestígios de partículas. Estas impurezas podem induzir ou promover corrosão em muitas partes do sistema de biogás ou equipamento em que o biogás é utilizado. No geral, esses componentes devem ser removidos para permitir a concentração de metano no biogás.

O conteúdo de água no biogás pode causar corrosão em tubulações devido à formação de ácido carbônico em uma reação derivada de água e dióxido de carbono. Felizmente, ele pode ser removido por resfriamento, compressão, absorção ou adsorção (carvão ativado, peneiras ou SiO_2). O sulfeto de hidrogênio (H_2S), outro componente indesejado do biogás, é de natureza corrosiva, causando danos a motores, tubulações, etc.

É um gás altamente tóxico que tenta destruir a saúde humana. A remoção do sulfeto de hidrogênio pode ser feita por precipitação, adsorção em carvão ativo para remoção de H₂S. Os siloxanos também constituem uma impureza no biogás. Pode afetar equipamentos de combustão, como motores a gás, através da formação de óxido de silício. Os métodos mais comuns para remoção de componentes de siloxano são a adsorção em carvão ativado, alumínio ativado ou sílica gel.

Após o processo de dessulfuração e secagem do biogás, ele pode gerar eletricidade e calor em sistemas de cogeração, combinação de calor e energia (CHP), ou pode ser transformado em produtos energéticos de maior valor, densidade e poder calorífico.

Atualização de biogás. Dependendo da utilização final do biogás, sua composição deve ser ajustada de acordo. É necessário purificar e refinar o biogás quando se deseja produzir biometano. A purificação e o refino geralmente são realizados separadamente, mas, às vezes, são feitos simultaneamente para a remoção de certos poluentes.

O H₂S é formado durante a redução microbiológica de compostos que contêm enxofre e pode levar a problemas de corrosão. Os métodos existentes para a remoção de H₂S são os seguintes: precipitação in situ, adsorção (usando óxidos/hidróxidos de ferro ou carvão ativado), absorção física e química, separação por membrana (SM), biofiltração, remoção microaeróbica in situ, remoção baseada em microalgas e o método biológico combinado.

Oxigênio e nitrogênio não são detectados em um processo de digestão anaeróbia (DA) conduzido adequadamente. As proporções de impurezas variam, dependendo do substrato e das condições de digestão, e são removidas por adsorção ou espectrometria de massas. Água e amônia são removidas por resfriamento do gás, compressão, adsorção ou absorção. Siloxanos e metilsiloxanos voláteis (VMSs) são removidos por meio de técnicas comercialmente disponíveis, como adsorção, absorção ou separação criogênica (SC), enquanto os métodos biológicos estão em fase preliminar de pesquisa.

Partículas podem ser removidas do biogás por meio de filtros mecânicos (instalados na saída de biogás do digestor e antes que o biogás entre na unidade de purificação).

No entanto, devido ao teor de umidade do biogás, sistemas de despoeiramento úmido, como precipitadores eletrostáticos e lavadores úmidos, são empregados principalmente para a remoção de partículas. Os compostos halogenados são geralmente removidos simultaneamente com o CO₂.

O aprimoramento do biogás envolve o refinamento do biogás por meio da redução ou remoção do CO₂ (embora outros compostos também possam ser separados) para obter biometano com a qualidade necessária para sua utilização como substituto renovável do gás natural. As tecnologias existentes para o aprimoramento do biogás são divididas em tecnologias desenvolvidas, comercialmente disponíveis e estabelecidas, e tecnologias emergentes, que ainda estão em escala laboratorial ou piloto.

Os processos utilizados para o aprimoramento do biogás podem ser classificados de acordo com os métodos de separação: adição de fase, agente sólido, barreira, criação de fase e campo de força ou gradiente.

Em todo o mundo, o número de usinas de biogás modernizadas aumentou, chamando a atenção mundial devido ao aumento dos preços do petróleo e do gás natural. O biogás obtido durante a digestão anaeróbica da biomassa contém quantidades importantes de dióxido de carbono que resultam em menor conteúdo energético.

Para melhorar esta característica, é solicitada a separação do dióxido de carbono através de um processo de melhoramento. É recomendável limpar o gás antes da atualização.

Em comparação com os usos comuns do biogás, a modernização do biogás traz diversas vantagens relacionadas ao transporte do gás e oferece a oportunidade de aumentar a eficiência geral da utilização do gás.

Nesta parte é importante esclarecer que a limpeza do biogás refere-se à separação de impurezas, enquanto a melhoria refere-se à separação do CO₂.

Atualmente, existem diversas tecnologias para limpeza e atualização de biogás, disponíveis comercialmente, como adsorção por oscilação de pressão (PSA), lavagem com água, lavagem física orgânica e lavagem química. A maioria deles é uma combinação ou um ou dois processos para limpeza ou atualização de biogás.

Se o biogás for transformado em biometano com aproximadamente 98% de teor de metano no biogás, ele pode ter as mesmas propriedades do gás natural. De acordo com estas normas, o biometano pode ser alimentado na rede de gás disponível ou utilizado para qualquer finalidade para a qual o gás natural seja utilizado.

Os benefícios ambientais globais da utilização do biogás são, no entanto, mais elevados quando o biogás é utilizado como combustível para veículos, substituindo o petróleo ou a gasolina e o óleo diesel.

Na verdade, a seleção da tecnologia ideal para a valorização do biogás depende da qualidade e da quantidade do biogás bruto a ser melhorado, da qualidade desejada do biometano e da utilização final do biogás, do sistema de digestão anaeróbica, da continuidade da biomassa, bem como bem como as circunstâncias locais.

Oportunidades para uma economia de base biológica (gás natural verde). O atual líder na implantação da tecnologia de biogás é a Alemanha. Na última década, o número de plantas digestoras aumentou dez vezes. O regime alemão é um exemplo claro de promoção da tecnologia do biogás; destaca o emprego de instrumentos-chave para ajudar a difundir a tecnologia, ou seja, incentivos económicos. Em termos gerais, a produção de biogás em diferentes países ainda depende de subsídios para atrair investidores, produtores e grupos de I&D e promover a sua escalabilidade. Os sistemas de certificação, as tarifas feed-in e o apoio ao investimento são exemplos de medidas amplamente aplicadas.

Conclusão. A maioria dos países ao redor do mundo ainda depende do fornecimento de energia, principalmente de combustíveis fósseis.

As sociedades precisam de garantir a procura de energia, através da igualdade social e da mitigação do impacto ambiental.

Neste sentido, a produção de biogás com base na biomassa não é apenas um caminho promissor, mas é atualmente uma das tecnologias mais renováveis capazes de oferecer energia, como o combustível fóssil.

O biogás pode desempenhar um papel central nos sistemas de energia renovável e sustentável num futuro próximo devido à sua versatilidade, disponibilidade, capacidade de armazenamento e valor energético.

Neste contexto, ainda são necessárias políticas públicas adequadas (regulação) para a promoção de condições económicas, sociais e culturais para a produção de biogás.

Embora a tecnologia tenha sido adotada pelo Brasil, ainda há necessidade de desenvolvimento e aplicação de tecnologia mais adequada para limpeza e transformação do biogás em biometano em locais onde o uso é limitado (injeção em rede), o que está se tornando um desafio. A promoção dos benefícios do biogás e do biometano é necessária para superar a confiabilidade do processo anaeróbico e o uso dos subprodutos, aumentar a capacidade das empresas de satisfazer as necessidades do mercado e envolver o governo, o público, o setor privado que são os atores na importante tarefa para alcançar um sistema energético sustentável.

AUTOR DO ARTIGO

Este artigo foi desenvolvido por Celso Oliveira. Consultor especializado em desenvolvimento de projetos industriais sustentáveis zero carbono e na área de biomassa, biogás, biocarbono, pellets e bioenergia. Formação em contencioso jurídico e direito empresarial internacional no Brasil e especialização em Energias renováveis pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Lisboa Portugal. Autor de mais 150 livros na área de Energia Renovável, Biomassa e Pellets e do Atlas Brasileiro Biomassa e Bioenergia.. Diretor Executivo da Brasil Biomassa e Energia Renovável com 205 projetos industriais de produção de biomassa e pellets e em 125 Estudo de mercado e mapeamento dos tipos de biomassa. , Conferencista com mais de cento e cinco palestras em Congressos nacionais e Internacionais com destaque All About Energy, Biomass Investing Brazil, Energy Summit e América Pulp & Paper Outlook Conference. Diretor Executivo da European Energy SRL. Coordenador do Congresso Brasileiro de Biomassa e Bioenergia. Convidado pelo Governo Federal para a participação da Missão Brasil Holanda Acordo Bilateral de Bioenergia e Biomassa. Presidente da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e Diretor Executivo do Instituto Brasileiro Bioenergia

Todos os direitos do artigo técnico reservados a Associação Brasileiras das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e para Brasil Biomassa e Energia Renovável

© 2026 ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável Copyright by Celso Marcelo de Oliveira Todos os direitos reservados a Brasil Biomassa e Energia Renovável

Copyright by Celso Marcelo de Oliveira Tradução e reprodução proibidas sem a autorização expressa do autor (contato autor diretoriabrasilbiomassa@gmail.com ou Whats(41) 998173023)

Tradução e reprodução proibidas sem a autorização expressa do autor. Nenhuma parte deste artigo pode ser reproduzida ou transmitida de qualquer forma ou meio, incluindo fotocópia, gravação ou informação, ou por meio eletrônico, sem a permissão ou autorização por escrito do autor. Lei 9.610, de 19 de fevereiro de 1998. Edição eletrônica no Brasil em versão eletrônica

Proibida a reprodução com ou sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio impresso e eletrônico. Quando avaliar este artigo técnico você deve reconhecer que nossas informações, materiais e/ou serviços são apenas para seu uso interno, e não para qualquer uso externo e/ou disseminação, ou publicação geral e/ou divulgação a terceiros.

Toda e qualquer informação e/ou material fornecido é baseado em estudos e pesquisa científica de mercado e/ou pesquisa secundária e, portanto, está sujeito a flutuação e variação.

Associação Brasileira das Indústrias Biomassa e Energia Renovável - Brasil Biomassa
Consultoria Engenharia Tecnologia - Instituto Brasileiro Bioenergia

Av. Candido Hartmann, 570 24 andar Conj. 243 Curitiba Paraná

Fone (41) 30406777 Whats Brasil Biomassa (41) 998173023

Plataforma digital Editora Brasil Biomassa <https://www.editorabrasilbiomassa.com/>

Plataforma digital Brasil Biomassa <https://www.brasilbiomassa.com/>

E-mails diretoriabrasilbiomassa@gmail.com ou diretoria@editorabrasilbiomassa.com





ARTIGO INTERNACIONAL

Tecnologias de purificação e engarrafamento de biogás: uma análise crítica.

Yolanda Mapantsela * e Patrick Mukumba Departamento de Física, Faculdade de Ciências e Agricultura, Universidade de Fort Hare, Dikeni 5700, África do Sul

Resumo

O aprimoramento e o engarrafamento do biogás representam processos essenciais na transformação do biogás bruto, produzido pela digestão anaeróbica de resíduos orgânicos, em biometano de alta pureza ($\geq 95\% \text{CH}_4$), uma fonte de energia renovável adequada para aplicações em culinária, transporte e geração de eletricidade. Tecnologias de aprimoramento, como separação por membrana, adsorção por oscilação de pressão (PSA), lavagem com água e produtos químicos, e métodos emergentes, como destilação criogênica e separação supersônica, desempenham um papel fundamental na remoção de impurezas como CO_2 , H_2S e umidade. Sistemas de membrana e híbridos demonstram alta recuperação de metano ($>99,5\%$) com baixo consumo de energia, enquanto a lavagem química oferece pureza superior do gás, mas é limitada pela alta complexidade operacional e custo. Desafios persistem em relação à seleção de materiais, normas de segurança, limitações de infraestrutura e impactos ambientais, particularmente em contextos rurais e isolados da rede elétrica.

O biogás engarrafado, também conhecido como gás natural comprimido (GNC), apresenta-se como uma alternativa limpa e portátil aos combustíveis fósseis, contribuindo para a equidade energética, a redução de gases de efeito estufa (GEE) e o desenvolvimento rural. O principal objetivo desta pesquisa é analisar criticamente o estado atual dos sistemas de purificação e engarrafamento de biogás, avaliar sua maturidade tecnológica, identificar desafios para a otimização de desempenho e avaliar sua viabilidade econômica e ambiental. A lacuna de pesquisa identificada neste estudo demonstra a ausência de uma comparação abrangente das tecnologias de purificação de biogás em termos de eficiência energética, preço, escalabilidade e impacto ambiental. Poucos estudos comparam diretamente essas tecnologias em diferentes contextos operacionais (por exemplo, rural versus urbano, pequena versus grande escala). Além disso, a revisão apresenta perspectivas sobre como o biogás pode substituir os combustíveis fósseis no transporte, na culinária e na geração de eletricidade, contribuindo para as metas de descarbonização. Devem ser promovidas soluções que reduzam as emissões de metano, diminuam os custos operacionais e otimizem o uso de recursos, em consonância com as metas climáticas. Esta síntese destaca a diversidade tecnológica, as principais barreiras à escalabilidade e a necessidade de mecanismos políticos robustos para acelerar a implementação de soluções de purificação de biogás como componente central de um futuro energético descentralizado e de baixo carbono.

Palavras-chave: Aprimoramento de biogás ; digestão anaeróbica ; separação por membrana ; PSA ; lavagem com água ; lavagem química ; destilação criogênica ; separação supersônica ; engarrafamento de biogás

1. Introdução. Os sistemas de melhoramento e engarrafamento de biogás convertem o biogás bruto (de resíduos orgânicos) em biometano purificado ($\geq 95\% \text{ CH}_4$) para armazenamento em cilindros de alta pressão. Este processo permite a distribuição de energia renovável para cozinhar, transporte ou injeções na rede, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e diminuindo as emissões de metano [1].

O desempenho dos biodigestores, particularmente quando integrados com sistemas de purificação eficazes, é uma área crítica de pesquisa na busca por soluções energéticas sustentáveis [2]. Os biodigestores convertem resíduos orgânicos em biogás por meio de digestão anaeróbica, um processo que não só reduz o desperdício, mas também produz energia renovável na forma de metano [3]. No entanto, o biogás bruto produzido frequentemente contém impurezas, principalmente dióxido de carbono (CO_2), que devem ser removidas para produzir biometano de alta qualidade adequado para diversas aplicações, incluindo a injeção em redes de gás natural e seu uso como combustível veicular [4].

O biogás aprimorado deve ser comprimido e engarrafado para facilitar a distribuição, o armazenamento e a comercialização [5]. Apesar do crescente interesse e dos avanços nos métodos de aprimoramento do biogás, incluindo separação por membrana, absorção química, lavagem com água e adsorção por oscilação de pressão (PSA), ainda existem diversos obstáculos significativos. Uma comparação completa da eficiência energética, da relação custo-benefício, da escalabilidade e do impacto ambiental dessas tecnologias ainda é escassa na literatura [6].

Além disso, pouca atenção acadêmica tem sido dada ao processo de engarrafamento, que é essencial para a implementação de sistemas de energia descentralizados, especialmente quando se trata de incorporar biogás aprimorado em mercados de energia isolados ou rurais [7].

Por exemplo, as modernas tecnologias de membrana podem atingir uma recuperação de metano superior a 99,5%, garantindo que o potencial energético do biogás seja totalmente aproveitado. Além disso, a otimização dos parâmetros operacionais desses sistemas de purificação pode levar a economias substanciais de custos e à redução das emissões de gases de efeito estufa, aumentando ainda mais os benefícios ambientais da produção de biogás [8]. A integração de biodigestores com sistemas de purificação representa um avanço crucial na busca por soluções energéticas sustentáveis.

À medida que a demanda global por energia aumenta e as preocupações ambientais se intensificam, a necessidade de tecnologias eficientes de conversão de resíduos em energia nunca foi tão premente.

Ao analisar criticamente os sistemas de purificação e engarrafamento de biogás mais avançados em uso atualmente, avaliando sua maturidade tecnológica e identificando áreas que requerem mais pesquisa, esta revisão busca preencher essas lacunas de conhecimento.

Este estudo apresenta uma revisão abrangente dos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais da purificação e engarrafamento de biogás, combinando resultados de diversos estudos e operações práticas.

O objetivo é orientar os esforços futuros de pesquisa e desenvolvimento neste campo em rápida evolução, informando pesquisadores, formuladores de políticas e representantes da indústria sobre as promessas e limitações das soluções existentes. As descobertas contribuirão para uma compreensão mais profunda do papel da tecnologia do biogás na geração de energia renovável e seu potencial impacto na redução da dependência de combustíveis fósseis.

2. Tipos de Tecnologias de Aprimoramento do Biogás

Os sistemas de purificação de biogás são essenciais para melhorar a qualidade do biogás, eliminando impurezas e aumentando o teor de metano, produzindo assim gás natural renovável (GNR) ou biometano. Diversas tecnologias são comumente empregadas na purificação de biogás, cada uma com mecanismos e vantagens distintas.

2.1. Separação por Membrana

A tecnologia de separação por membrana utiliza membranas seletivas para separar o metano (CH_4) do dióxido de carbono (CO_2) e de outras impurezas. Este método caracteriza-se pela alta eficiência, atingindo taxas de recuperação de metano superiores a 99,5%. As membranas permitem a passagem do CO_2 enquanto retêm o metano. Esta tecnologia é compacta, facilmente integrada em sistemas existentes e adequada para diversas fontes de biogás [9].

A Figura 1 abaixo mostra um diagrama esquemático do processo de separação por membrana.

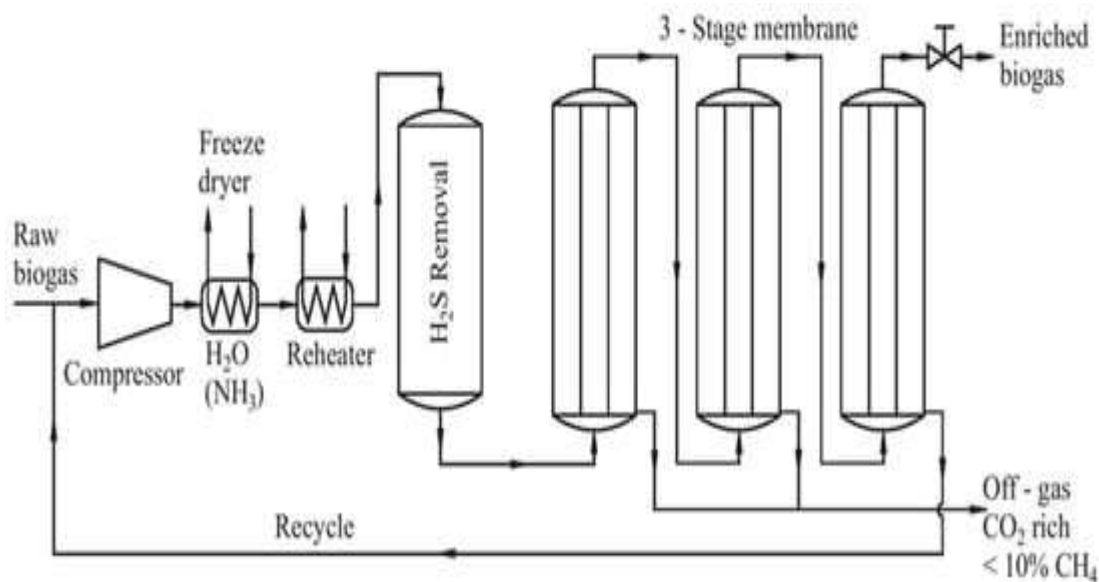


Figura 1. Representação esquemática do método de purificação de biogás por membrana [10].

2.2. Adsorção por Oscilação de Pressão (PSA)

A PSA é outra tecnologia de purificação que separa gases de acordo com o tamanho de suas moléculas e propriedades de adsorção. Nesse procedimento, o biogás passa por materiais adsorventes que capturam seletivamente o CO₂ e outras impurezas sob alta pressão.

Quando a pressão é reduzida, os gases adsorvidos são liberados, permitindo a recuperação do biometano purificado. Os sistemas PSA também podem remover nitrogênio e oxigênio, tornando-os versáteis para diferentes composições gasosas [11]. O processo PSA é mostrado na Figura 2 .

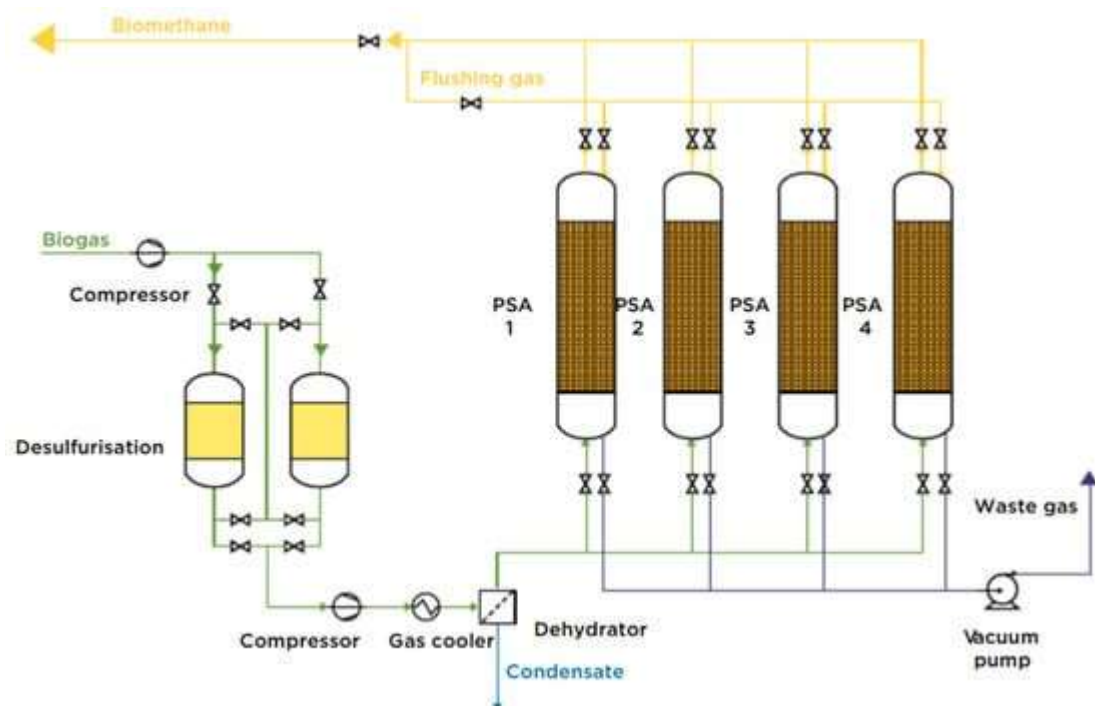


Figura 2. Representação visual do processo PSA [12].

2.3. Aprimoramento do biogás à base de solventes

2.3.1. Lavagem com água

A lavagem com água utiliza água para dissolver o CO_2 do biogás, permitindo a passagem do metano. O processo remove eficazmente a umidade e certos contaminantes, mas pode exigir uma secagem adicional do biometano antes de ser utilizado ou inserido na rede de gás. Os sistemas de lavagem com água são conhecidos pela sua simplicidade e eficácia no tratamento do biogás com concentrações mais baixas de impurezas [13]. O processo de lavagem com água é demonstrado na Figura 3 .

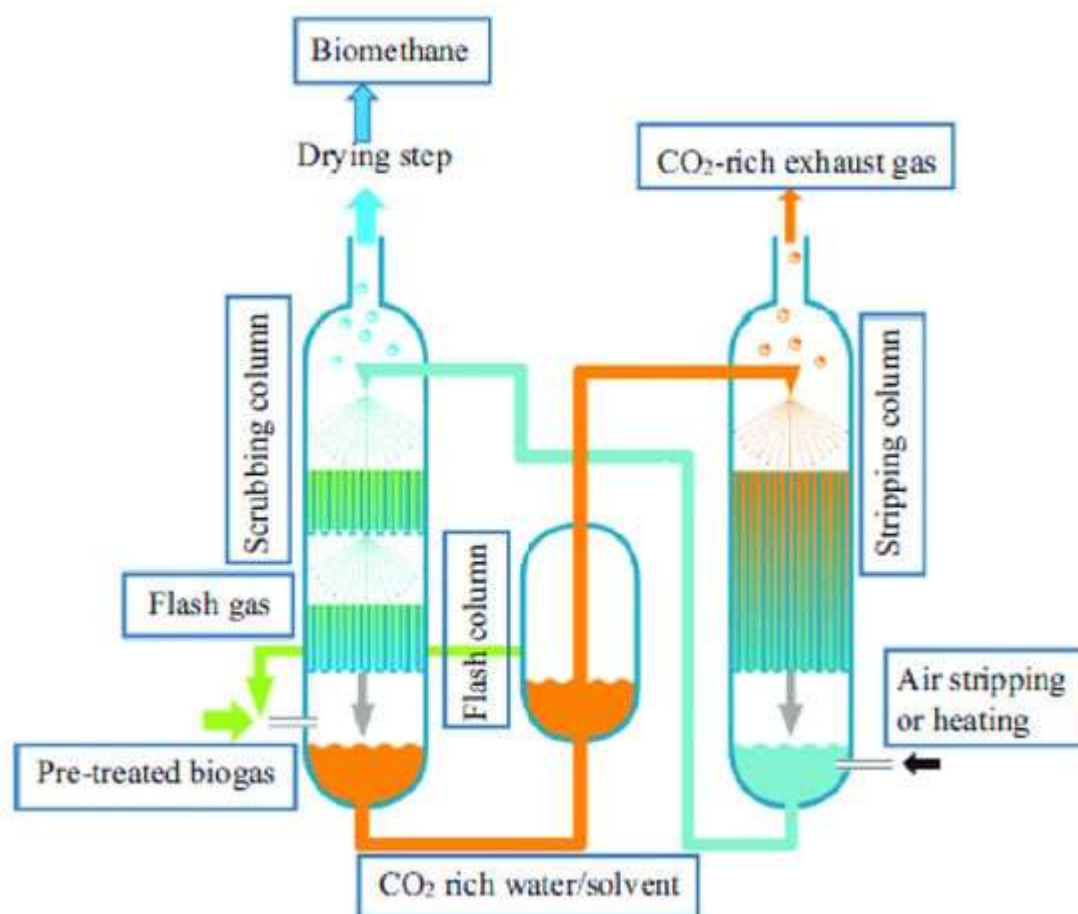


Figura 3. Diagrama mostrando o método de lavagem com água [14].

A lavagem com água baseia-se na Lei de Henry, que afirma que os gases se dissolvem em líquidos; é a técnica de absorção física mais utilizada. Comparativamente ao CH_4 , o CO_2 e o H_2S são muito mais solúveis em água à temperatura ambiente.

Como resultado da remoção de outras moléculas da água e da sua posterior regeneração para melhorar a recuperação do CH_4 , o gás que sobe do topo da coluna de absorção apresenta um elevado teor de metano. Embora o biometano de saída seja altamente puro — até 99% de pureza [15] — existe um risco significativo de perdas por diversos motivos.

O estudo acima focou no aprisionamento de bolhas causado pela grande diferença de pressão entre o tanque de dessorção e a coluna de lavagem com água, bem como no curto-circuito de gás na parte inferior da coluna devido à vedação inadequada da água. Nesse caso, a integração de um vaso de pressão entre o tanque de dessorção e a unidade de lavagem foi a solução utilizada para evitar perdas de CH_4 . Devido à menor pressão da água, essa solução apresentou uma redução nas perdas. Em outro estudo, os mesmos autores também sugeriram um vaso de expansão instantânea [16], que levou a uma recuperação de metano de 8,46%.

2.3.2. Esfoliação física

A lavagem física é o processo de remoção de poluentes do biogás utilizando técnicas físicas como a lavagem com água. O método de lavagem depende da solubilidade do H_2S e do CO_2 ; por exemplo, eles são mais facilmente dissolvidos em água do que o CH_4 . A uma temperatura de 26 °C, o CO_2 tem uma solubilidade em água 26 vezes maior do que o metano. Este processo é realizado a uma pressão de 6–10 bar [17].

Um estudo [18] mostrou que os componentes primários do método de lavagem orgânica são um absorvedor de enxofre, um absorvedor de CO_2 , um concentrador de H_2S , um removedor de H_2S , uma bomba de refluxo do refeedor do removedor e um acumulador de refluxo, conforme mostrado na Figura 4. Ao usar a lavagem física orgânica, o CO_2 no biogás bruto é absorvido em um solvente orgânico, como uma mistura de éteres dimetílicos de polietilenoglicol.

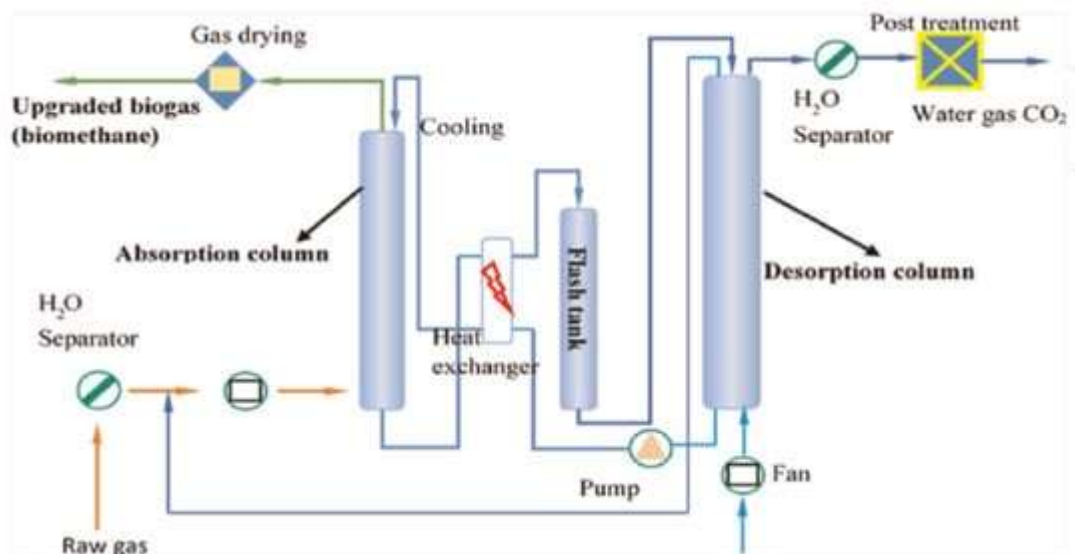


Figura 4. Processo de lavagem física [19].

2.3.3. Lavagem Química

Uma das técnicas mais antigas para purificar o biogás bruto de dióxido de carbono (CO_2) e outros contaminantes é a lavagem química. Solventes químicos alcalinos que absorvem preferencialmente o CO_2 da corrente gasosa, como soluções aquosas de monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) ou carbonato de potássio, são comumente usados neste processo. O processo fundamental depende de uma reação química reversível entre o solvente e o CO_2 , o que permite que o solvente seja reciclado em um sistema de circuito fechado por meio de uma etapa de dessorção térmica [20].

A lavagem química funciona bem; no entanto, existem vários obstáculos financeiros e tecnológicos que impedem seu uso generalizado, principalmente em aplicações de pequeno e médio porte. A regeneração térmica de solventes químicos consome muita energia, o que aumenta os custos operacionais e reduz a eficiência geral do sistema.

Se os solventes degradados não forem manuseados adequadamente, suas propriedades corrosivas e ácidas podem danificar máquinas e levantar questões sobre segurança ambiental [21]. Além disso, como os solventes usados podem ser nocivos, seu descarte exige cautela.

A lavagem química é menos prática para instalações dispersas ou rurais devido à sua infraestrutura mais complexa e aos maiores custos operacionais quando comparada a alguns procedimentos de purificação física (como a lavagem com água).

Estudos recentes têm se concentrado na criação de solventes substitutos, como líquidos iônicos e sais de aminoácidos, que oferecem maior resistência à degradação e menores necessidades de energia de regeneração.

Esses métodos ainda requerem validação adicional em condições reais de biogás, pois ainda estão principalmente em estágios experimentais ou piloto [22].

Em conclusão, a lavagem química oferece excelente pureza do gás e flexibilidade operacional; no entanto, seu impacto ambiental e as compensações econômicas devem ser cuidadosamente ponderados.

Ainda é uma boa opção para plantas de purificação centralizadas ou de grande escala. Tecnologias alternativas de purificação de baixo consumo energético, no entanto, podem fornecer opções mais ecológicas para aplicações de biogás fora da rede ou descentralizadas [21]. O diagrama abaixo (Figura 5) apresenta um processo de lavagem física.

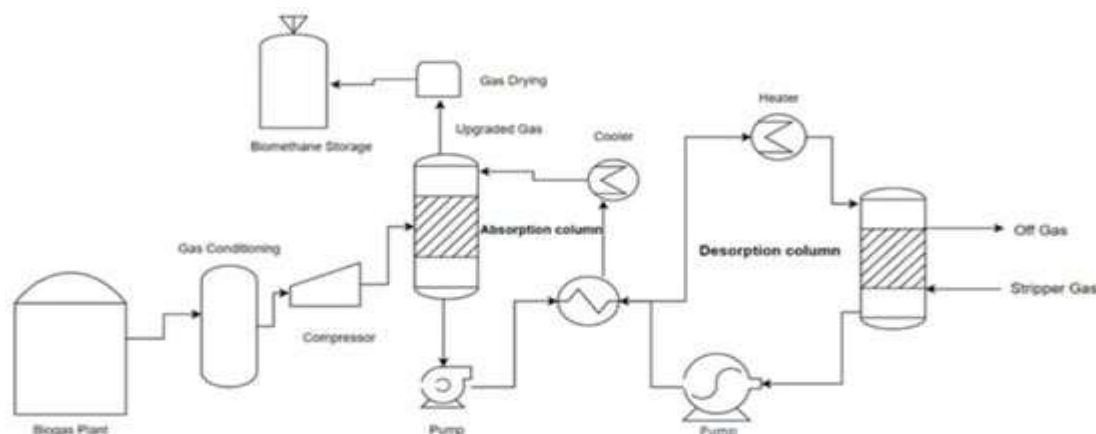


Figura 5. Diagrama mostrando o processo de lavagem física [23].

2.4. Sistema Híbrido

Alguns sistemas híbridos modernos combinam múltiplas tecnologias para otimizar o desempenho e a eficiência. Uma abordagem híbrida pode integrar a tecnologia de membrana com PSA ou lavagem com água para obter resultados de purificação superiores sob diferentes condições de matéria-prima. Essa flexibilidade permite que os operadores adaptem as soluções com base nas qualidades específicas do gás e nos requisitos operacionais [8]. Um sistema híbrido é mostrado na Figura 6 .

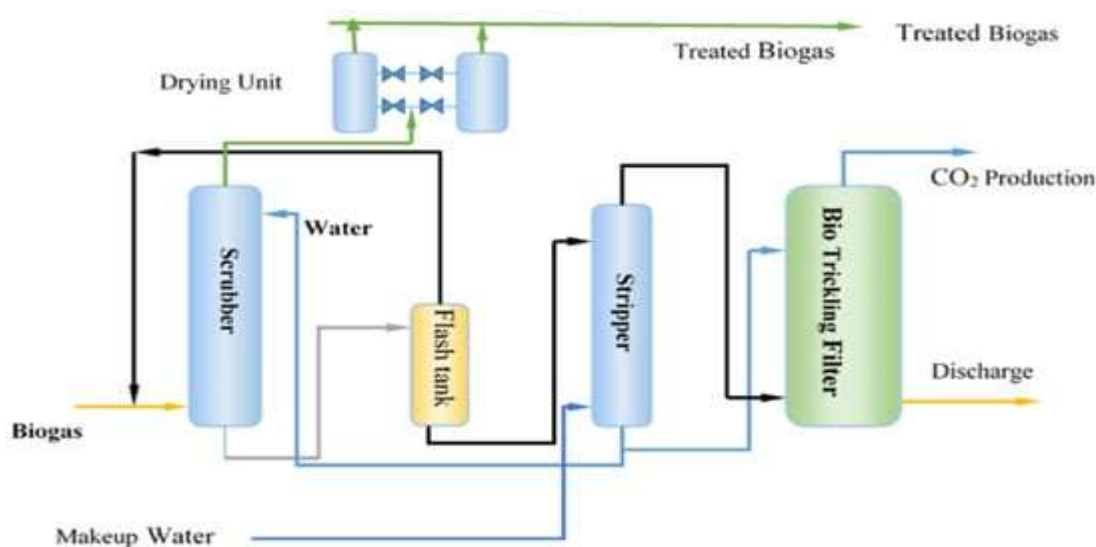


Figura 6. Atualização do sistema híbrido [24].

Os sistemas híbridos integram duas ou mais técnicas de purificação e melhoramento. Ao combinar várias tecnologias numa única unidade, as perdas de CH₄ serão reduzidas, os custos de capital e operacionais serão minimizados e o impacto ambiental dos sistemas de condicionamento será diminuído. É importante lembrar que o melhoramento do biogás também oferece a opção de armazenar ou valorizar o CO₂ recuperado [25] .

No entanto, a escolha da tecnologia de purificação do biogás depende de fatores como as características da matéria-prima, a qualidade desejada do gás, os custos operacionais e as capacidades de integração do sistema. Cada método oferece benefícios únicos que podem aumentar a eficácia geral das instalações de produção de biogás, contribuindo para soluções energéticas mais sustentáveis.

2.5. Tecnologias mais recentes para o aprimoramento do biogás

2.5.1. Destilação Criogênica

De acordo com um estudo [26], uma possível técnica para converter biogás em biometano é o aprimoramento criogênico, que utiliza as características únicas de condensação de seus constituintes.

O biogás é comprimido a altas pressões (geralmente 4900 kPa) e resfriado a temperaturas entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ usando este método.

A separação eficaz é possível nessas circunstâncias porque o metano (CH_4) permanece na fase gasosa enquanto o dióxido de carbono (CO_2) se liquefaz.

A Ref. [27] indicou que o método de aprimoramento criogênico apresenta altos custos operacionais, uma vez que requer uma grande quantidade de energia para resfriamento e compressão. Como o CO_2 pode congelar em baixas temperaturas, podem ocorrer obstruções e perturbações nas operações. Isso pode ser reduzido gerenciando adequadamente os sistemas para impedir a formação de CO_2 sólido. Compressores, trocadores de calor, colunas de destilação e outros equipamentos necessários para o aprimoramento criogênico apresentam altos custos iniciais e custos contínuos de manutenção [28]. A Figura 7 demonstra um sistema de aprimoramento por destilação criogênica.

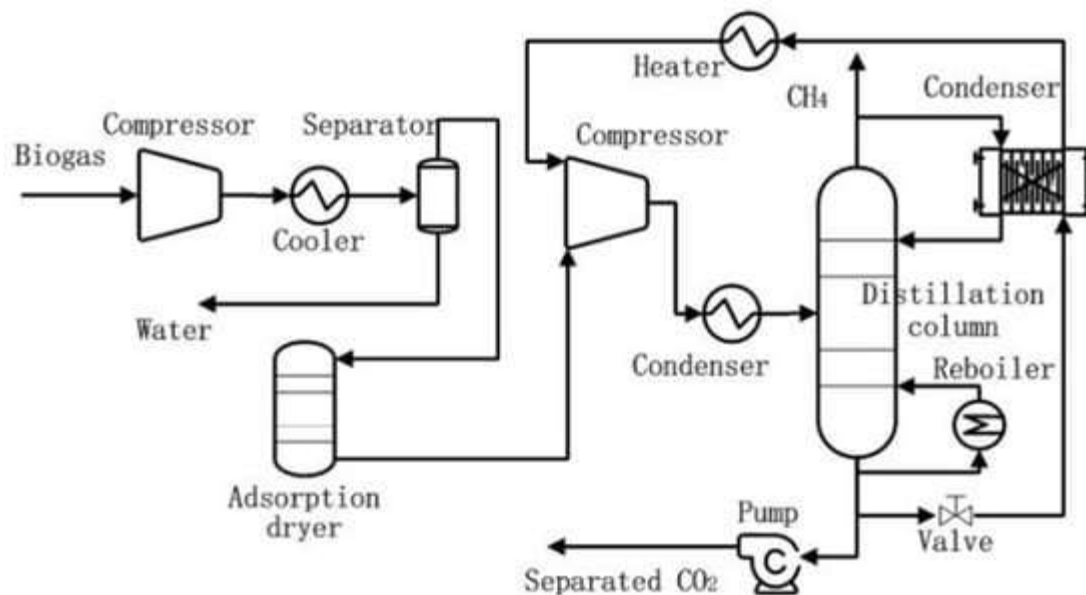


Figura 7. Processo de destilação criogênica [29].

Um método de purificação de biogás de alta pureza com a vantagem adicional da recuperação de CO_2 é fornecido pelo aprimoramento criogênico.

Suas altas necessidades energéticas e custos associados, no entanto, dificultam a adoção em larga escala [4]. Para maximizar essa abordagem para uso mais amplo em sistemas de energia sustentável, são necessárias mais pesquisas e desenvolvimentos técnicos.

2.5.2. Separação supersônica

Uma nova técnica chamada separação supersônica usa fluxos de gás de alta velocidade para extrair eficazmente contaminantes do gás natural, incluindo água e hidrocarbonetos pesados.

Bicos convergentes-divergentes são usados nesta técnica para atingir velocidades supersônicas, o que causa condensação rápida e a separação dos componentes desejados [30].

A Ref. [31] sugeriu que as impurezas podem ser removidas eficazmente de materiais naturais utilizando um separador supersônico, que pode realizar condensação e separação rápidas.

O tamanho reduzido da tecnologia facilita a sua integração em sistemas existentes sem ocupar muito espaço. Como a separação supersônica não requer os produtos químicos utilizados em outros processos convencionais, ela tem um menor impacto ambiental e reduz os custos operacionais.

A eficiência da separação pode ser afetada pelo desempenho do separador supersônico, que é suscetível a mudanças no fluxo de gás. Ainda é difícil projetar separadores supersônicos que suportem diferentes vazões, mantendo alta eficiência.

Para garantir um desempenho consistente em diversas aplicações, são necessários projetos e processos operacionais padronizados [32]. A Figura 8 mostra um diagrama de uma tecnologia de separação supersônica.

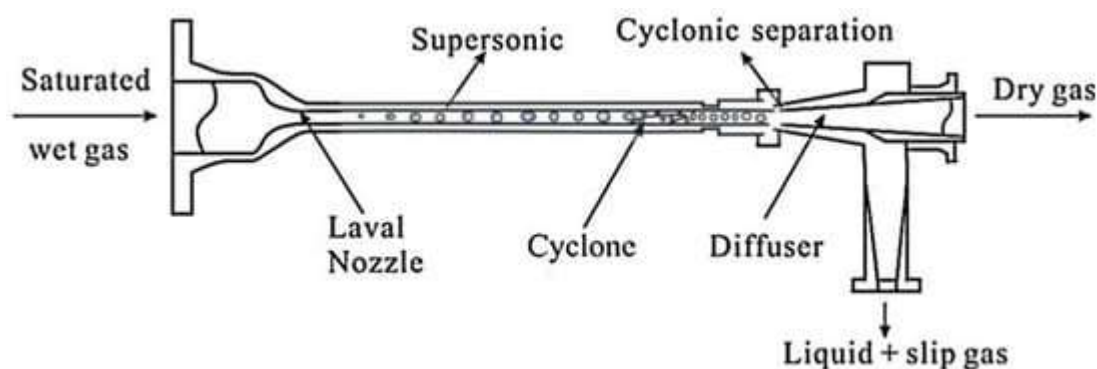


Figura 8. O processo de separação supersônica [33].

Conforme afirmado por [34], a separação supersônica apresenta uma abordagem promissora para a purificação de gás natural, removendo impurezas de forma eficiente sem a necessidade de produtos químicos. Embora existam desafios relacionados à sensibilidade ao fluxo e à complexidade do projeto, as investigações contínuas e os avanços tecnológicos continuam a melhorar a viabilidade e a eficácia desse método. O desenvolvimento e a padronização adicionais são essenciais para concretizar plenamente o potencial da separação supersônica no processamento de gás natural.

A separação supersônica (SS), um método que utiliza fluxo de gás supersônico para separar componentes com base em diferenças em suas propriedades físicas (por exemplo, massa, temperatura, transição de fase), é uma tecnologia inovadora e energeticamente eficiente. Ela é especialmente promissora para a remoção de água, CO₂ e hidrocarbonetos mais pesados no processamento de gás natural sem o uso de solventes químicos ou sistemas criogênicos.

No entanto, apesar de suas vantagens, existem diversas barreiras práticas à sua implementação em larga escala:

Engenharia de Precisão: Projetar bicos e separadores supersônicos que criem e controlem ondas de choque e mudanças de fase de forma confiável requer modelagem CFD avançada e fabricação de precisão [35];

Sensibilidade de controle: Pequenas variações na pressão, temperatura ou taxa de fluxo podem impactar significativamente o desempenho [36];

Questões de escalabilidade: A manutenção da eficiência e da consistência de desempenho ao aumentar a escala de laboratórios ou plantas piloto para sistemas industriais não é trivial [30];

Alto investimento inicial: Embora os custos operacionais possam ser menores do que os métodos tradicionais, o custo inicial para projetar, construir e instalar separadores supersônicos pode ser alto [30];

Desafios de modernização: A integração de unidades SS em instalações existentes geralmente requer modificações significativas nos layouts de tubulação, compressores e sistemas de controle;

Requisitos de pressão: as unidades SS requerem uma alta pressão de gás de entrada (frequentemente >70 bar) para gerar e sustentar o fluxo supersônico, limitando seu uso a certos segmentos da cadeia de processamento de gás (por exemplo, upstream ou midstream) [37];

Flexibilidade limitada: SS é mais adequado para fluxos estáveis e de alto volume. Condições variáveis ou fora de especificação (por exemplo, composição ou pressão flutuantes) podem prejudicar a eficiência da separação [38];

Conservadorismo na indústria: os operadores geralmente preferem tecnologias comprovadas (como o tratamento de gases com aminas ou a destilação criogênica) a métodos mais recentes;

Lacunas de demonstração: Existem poucas implementações comerciais em grande escala e dados limitados de terceiros sobre o desempenho em diversas condições operacionais [39];

Concorrência com tecnologias estabelecidas: Em muitos casos, especialmente com a queda dos preços do gás ou margens apertadas, as tecnologias convencionais continuam sendo mais rentáveis no curto prazo;

Incerteza do retorno do investimento: O período de retorno do investimento para SS pode ser incerto devido à flutuação dos custos de energia, composição do gás e condições de mercado [30]. Os custos de capital (CAPEX) e os custos operacionais (OPEX) variam significativamente entre as tecnologias de separação de gases, influenciando sua adoção com base no tamanho do projeto, localização e objetivos de processamento. A separação supersônica (SSS) normalmente apresenta menor CAPEX devido ao seu design compacto e estático, com implantações recentes mostrando sistemas montados em skid custando cerca de US\$ 500.000 para instalações de pequena escala; esses custos são menores do que os de turboexpansores ou sistemas baseados em aminas, que podem chegar a dezenas de milhões de dólares [30].

Em contraste, a lavagem química está entre as opções que exigem maior investimento de capital, requerendo grandes torres de absorção e despojamento, equipamentos de circulação de solventes e sistemas de regeneração de vapor, com CAPEX variando de US\$ 10 a US\$ 35 milhões para unidades de escala de 10 MW [40]. Os sistemas criogênicos normalmente ficam entre esses extremos, com um estudo recente estimando um CAPEX de aproximadamente US\$ 12 milhões para uma grande instalação de desidratação de gás e remoção de CO₂ [41].

Em termos de OPEX, a separação supersônica se destaca, apresentando os menores custos contínuos, por ser uma tecnologia livre de solventes e de baixa manutenção, que separa passivamente os componentes por meio de expansão e condensação controladas. Ao contrário dos sistemas de amina, que requerem energia térmica substancial para a regeneração e substituição frequente do solvente, as unidades supersônicas consomem pouca ou nenhuma energia auxiliar, resultando em custos operacionais mínimos [42]. Os sistemas de amina continuam a incorrer em altos custos operacionais devido à sua demanda energética e à degradação do solvente, tipicamente custando de US\$ 45 a US\$ 60 por tonelada de CO₂ capturada , enquanto solventes avançados (por exemplo, carbonato de potássio ou misturas de piperazina) oferecem reduções de aproximadamente 15 a 25% [43]. Os sistemas criogênicos apresentam custos operacionais moderados, impulsionados principalmente pelo consumo de eletricidade em vez do consumo de produtos químicos, com um caso estimando um custo operacional anual de aproximadamente US\$ 1,4 milhão para uma instalação de médio porte.

Os sistemas de separação por membrana também oferecem um OPEX baixo a moderado de aproximadamente USD 25–35 por tonelada de CO₂, com custos principalmente relacionados à eletricidade para compressão e substituição periódica da membrana [44].

Os custos de capital e operacionais (CAPEX/OPEX) para tecnologias de purificação de biogás são normalmente expressos como estimativas relativas indicativas, categorizadas como baixas, moderadas ou altas, dependendo do projeto específico do sistema, da capacidade da planta e do nível de integração do processo. As necessidades energéticas variam significativamente entre as tecnologias e são influenciadas por fatores como a configuração da planta, a pressão operacional e a necessidade de processos adicionais, como compressão ou resfriamento do gás. O escape de metano, que se refere à proporção de metano perdida durante a purificação, é um parâmetro crítico, pois impacta diretamente tanto a eficiência geral do sistema quanto suas emissões de gases de efeito estufa. Minimizar o escape de metano é essencial para garantir uma alta recuperação de metano e melhorar o desempenho climático do processo de purificação.

3. Os principais desafios da otimização do desempenho de uma planta de purificação de biogás

3.1. Controle de Qualidade

A Ref. [46] afirmou que as plantas de melhoramento de biogás devem cumprir normas de qualidade rigorosas para o biometano, especialmente quando injetado nas redes de gás.

Garantir que o gás produzido atenda a essas normas exige o controle preciso dos parâmetros operacionais. A variabilidade na composição da matéria-prima pode levar a flutuações na qualidade do gás, o que significa que é necessário monitorar e ajustar continuamente os processos para manter a conformidade com os requisitos regulamentares.

3.2. Custo das Operações

Estudos anteriores de [47] mostram que os custos associados ao aprimoramento do biogás podem ser significativos, principalmente devido ao consumo de energia e à necessidade de aditivos, como propano, para atender às especificações da rede. Por exemplo, a otimização das configurações de controle pode reduzir os custos relacionados à perda de metano durante o processamento e minimizar a energia necessária para a operação. No entanto, alcançar essas otimizações geralmente requer modelagem e sistemas de controle sofisticados, que podem ser dispendiosos em termos de recursos para desenvolver e implementar.

3.3. Remoção de impurezas

O biogás bruto contém várias impurezas, incluindo dióxido de carbono (CO_2) , sulfeto de hidrogênio (H_2S) , siloxanos e outros gases residuais que devem ser removidos eficazmente para melhorar a qualidade do gás [48]. A presença dessas impurezas não só reduz o poder calorífico do biogás, como também representa riscos de corrosão e falhas operacionais em equipamentos subsequentes. O desenvolvimento de estratégias eficazes para a remoção completa de impurezas, mantendo a eficiência, é um desafio crucial.

3.4. Complexidade do Processo. O processo de digestão anaeróbia é inerentemente complexo, influenciado por inúmeros fatores físicos, químicos e biológicos, como características do substrato, tempo de retenção hidráulica e controle de temperatura. Quaisquer ineficiências ou instabilidades no processo de digestão podem afetar adversamente as taxas de produção e a qualidade do biogás, complicando a otimização dos sistemas de melhoramento [49].

A integração de tecnologias avançadas de melhoramento (como a separação por membrana ou a adsorção por oscilação de pressão) com instalações de biogás existentes pode ser desafiadora. Cada tecnologia tem requisitos operacionais específicos e pode exigir modificações na infraestrutura existente. Garantir a compatibilidade e maximizar o desempenho muitas vezes requer um esforço e investimento de engenharia significativos [50].

A implementação de sistemas de controle preditivo que utilizam dados em tempo real para otimização contínua apresenta desafios na gestão e análise de dados. O desenvolvimento de modelos preditivos precisos requer um extenso conjunto de dados históricos e algoritmos sofisticados para interpretar esses dados de forma eficaz. A complexidade desses sistemas pode levar a dificuldades na implementação e manutenção.

Além disso, embora a otimização do desempenho de uma planta de purificação de biogás ofereça benefícios substanciais em termos de eficiência e qualidade do produto, ela envolve a superação de uma série de desafios relacionados ao controle de qualidade, custos operacionais, remoção de impurezas, complexidade do processo, integração tecnológica e gestão de dados.

4. Comparação das Tecnologias de Biogás

Sistemas de separação de gases supersônicos (SSS), como os implantados em locais remotos e offshore na Malásia, Nigéria e Rússia, demonstraram pureza de metano superior a 95%. Esses sistemas utilizam bicos supersônicos para condensar e separar CO₂ e água sem o uso de solventes ou partes móveis. Como resultado, consomem energia insignificante, tipicamente próxima de zero, além das pequenas quedas de pressão envolvidas. As perdas de metano são relatadas como inferiores a 0,2%; devido ao seu design compacto montado em skid, os custos totais por Nm³ de gás purificado são estimados em aproximadamente USD 0,05 quando amortizados ao longo da vida útil e da vazão típicas do sistema. Esses níveis de desempenho tornam os SSS particularmente atraentes para instalações onde o espaço e a disponibilidade de energia são limitados [51].

Em comparação, os sistemas de separação por membrana, especialmente em configurações de dois estágios, podem atingir purezas de metano em torno de 97,5%, com eficiências de remoção de CO₂ de até 99%. Demonstrações em escala piloto processando gás a 20 bar relataram níveis de consumo de energia específica de cerca de 0,33 kWh/Nm³ , principalmente devido à eletricidade necessária para a compressão do gás. As perdas de metano variam, mas podem ser tão baixas quanto 0,19% em projetos otimizados. Os custos de capital e operacionais são relativamente baixos, com estimativas variando entre USD 0,011 e USD 0,02 por Nm³ de gás tratado.

Os sistemas de membrana são modulares e facilmente escaláveis, tornando-os uma forte escolha para projetos de melhoria de gás distribuídos ou de médio porte [24].

A absorção de aminas, utilizando MEA convencional ou misturas de solventes avançados, como carbonato de potássio ou piperazina (PZ), é uma tecnologia consolidada com ampla aplicação industrial. Esses sistemas podem atingir eficiências de remoção de CO₂ de 85–95%; em algumas configurações otimizadas, as eficiências de remoção são ainda maiores. A pureza do metano normalmente excede 98%, com escape de metano consistentemente abaixo de 0,1%. No entanto, a tecnologia é intensiva em energia, com consumos específicos de energia variando de 0,9 a 1,4 kWh/Nm³, dependendo do solvente utilizado e do projeto de integração térmica. Como resultado, os custos totais de purificação tendem a ser mais elevados, na faixa de USD 0,10 a USD 0,15 por Nm³, tornando as aminas mais adequadas para instalações centralizadas de grande escala, onde já existem infraestruturas de recuperação de calor e gestão de solventes [52].

As tecnologias de separação criogênica, frequentemente utilizadas para a remoção profunda de CO₂ ou hidrocarbonetos pesados, oferecem excelente pureza do gás e perda mínima de metano. Sistemas em escala de demonstração relataram eficiências de remoção de CO₂ superiores a 99% e pureza de CH₄ em torno de 99%. A demanda de energia é moderada, em torno de 0,27 kWh/Nm³, e deriva principalmente do ciclo de refrigeração utilizado para liquefazer e separar o CO₂.

As perdas de metano são geralmente mantidas abaixo de 0,5%; o custo estimado por Nm³ de gás purificado varia entre USD 0,08 e USD 0,12, dependendo da escala e do preço da energia. Os sistemas criogênicos são particularmente valiosos quando se deseja CO₂ de alta pureza como subproduto ou quando combinados com infraestrutura de GNL [53].

4.1. Análise Detalhada das Relações de Custo-Benefício

Recuperação de metano vs. pureza: Os sistemas de membrana são flexíveis, mas requerem configurações de vários estágios para alta pureza, aumentando os custos. O PSA oferece alta pureza, mas menor recuperação e maiores despesas operacionais. A lavagem com água e física equilibra a recuperação e a pureza, mas depende da disponibilidade de água/solvente e da regeneração [55];

Consumo de energia versus impacto ambiental: A lavagem criogênica e química são intensivas em energia, impactando os custos operacionais e a pegada de carbono. A lavagem com água é menos intensiva em energia, mas insustentável em regiões com escassez de água. Os sistemas de membrana e PSA oferecem uso moderado de energia, mas geralmente exigem pré-tratamento para contaminantes [56];

Despesas de capital e operacionais: Os sistemas híbridos e criogênicos exigem alto investimento e operação especializada, adequados para projetos grandes e de alto valor. Os sistemas de lavagem por membrana e água têm custos moderados, tornando-os ideais para operações descentralizadas ou de média escala [26];

Restrições específicas da matéria-prima e do local: A lavagem química e física tolera matérias-primas variáveis ou contaminadas, adequadas para aterro sanitário ou biogás de resíduos mistos. A membrana e o PSA requerem matéria-prima mais limpa para evitar incrustações e degradação do adsorvente [56].

4.2. Desafios Operacionais Práticos

Cada via de aprimoramento apresenta desafios operacionais e de manutenção únicos que influenciam significativamente seu desempenho, custo e escalabilidade. A separação por membrana, uma técnica amplamente adotada devido à sua modularidade e demanda de energia relativamente baixa, é notavelmente suscetível à incrustação por sulfeto de hidrogênio (H_2S), siloxanos e partículas. Esses contaminantes podem degradar o desempenho da membrana, reduzir a seletividade e encurtar a vida útil, exigindo, portanto, etapas robustas de pré-tratamento e regimes de manutenção programados [57]. A falha na implementação desses pré-tratamentos pode levar a danos irreversíveis à membrana e ao aumento dos custos operacionais.

Os sistemas de adsorção por oscilação de pressão (PSA), embora eficazes na obtenção de altas purezas de metano, são limitados pela capacidade de saturação finita dos materiais adsorventes. Com o tempo, os leitos adsorventes perdem eficácia e devem ser regenerados ou substituídos, uma operação que interrompe o tempo de funcionamento do sistema e acarreta custos adicionais [58]. Além disso, os sistemas PSA são sensíveis a flutuações na composição do gás de alimentação, o que pode prejudicar a eficiência da separação e exigir estratégias de controle dinâmico.

A lavagem com água, um método tradicional e relativamente simples, enfrenta crescente escrutínio devido à escassez global de água. O processo requer volumes substanciais de água e problemas, como incrustações minerais e escape de metano, tornam-se proeminentes, especialmente em sistemas não refrigerados ou não reciclados [59]. Essas limitações reduzem a sustentabilidade ambiental e aumentam a complexidade operacional, particularmente em regiões áridas ou instalações isoladas da rede elétrica.

A lavagem química, frequentemente utilizando aminas ou outros solventes reativos, introduz uma nova dimensão de complexidade. Embora altamente seletivos para a remoção de CO_2 , esses sistemas enfrentam desafios relacionados à degradação, toxicidade e descarte dos solventes. O gerenciamento desses riscos exige um controle operacional rigoroso, conformidade ambiental e procedimentos de manuseio seguro [60]. As compensações ambientais associadas ao uso de solventes representam uma barreira para a sustentabilidade a longo prazo e a aceitação regulatória.

O aprimoramento criogênico oferece a vantagem de produzir metano de alta pureza; no entanto, requer infraestrutura de refrigeração sofisticada e de alto consumo energético. A formação de gelo nas unidades de separação é um problema frequente que pode causar bloqueios e falhas nos equipamentos se não for cuidadosamente gerenciado.

Esses sistemas também exigem alto investimento de capital e um alto grau de supervisão operacional, limitando sua aplicabilidade a instalações de grande escala ou centralizadas [61].

Sistemas híbridos, que combinam duas ou mais tecnologias de aprimoramento, estão sendo explorados para melhorar a eficiência geral do processo e a qualidade do gás. No entanto, esses sistemas introduzem integração complexa, exigindo controle de processo avançado, automação e pessoal altamente treinado. Seu sucesso depende da orquestração perfeita das operações unitárias e de algoritmos de otimização em tempo real. A maior sofisticação técnica e o custo dos sistemas híbridos podem limitar sua implantação em instalações de biogás descentralizadas ou de pequena escala [62].

De modo geral, embora tenham sido feitos avanços significativos na modernização das tecnologias, o equilíbrio entre simplicidade operacional, custo, impacto ambiental e qualidade do gás continua sendo uma preocupação central. Superar esses desafios exige uma abordagem multidimensional que aprimore a robustez dos materiais, integre energias renováveis para operações com alto consumo energético e desenvolva sistemas de controle inteligentes para a gestão dinâmica da planta.

4.3. Seleção de tecnologias apropriadas em diferentes condições

A seleção da tecnologia apropriada para o aprimoramento do biogás requer uma avaliação crítica e multicritério baseada nas condições específicas do local, nos objetivos operacionais e na sustentabilidade a longo prazo. Os principais fatores incluem a composição do biogás bruto, particularmente a presença de H_2S , CO_2 , siloxanos e umidade, que influenciam significativamente a adequação de diferentes tecnologias [63].

A separação por membrana, por exemplo, é energeticamente eficiente e modular, tornando-a ideal para operações de pequena a média escala com fluxos de gás relativamente limpos; no entanto, é sensível à incrustação e pode exigir pré-tratamento. A adsorção por oscilação de pressão (PSA) tolera maior variabilidade da matéria-prima e proporciona alta pureza do metano; no entanto, apresenta maiores demandas de eletricidade e requer a substituição regular do adsorvente. A lavagem com água é simples e eficaz, mas depende muito da disponibilidade de água e do resfriamento para minimizar o escape de metano, tornando-a inadequada em regiões com escassez hídrica [64]. A lavagem química oferece excelente remoção de CO_2 , mas levanta preocupações sobre o gerenciamento de solventes e os impactos ambientais. As separações criogênicas e supersônicas, embora ofereçam a maior pureza e recuperação de metano, exigem alto investimento de capital e são adequadas apenas para plantas centralizadas de grande escala com operadores qualificados. Outros critérios cruciais incluem consumo de energia, requisitos de manutenção, capacidade técnica local, normas regulatórias, metas de pureza do metano (especialmente para injeções na rede elétrica ou combustível veicular) e custo-benefício ao longo do tempo. Os sistemas de membrana e PSA geralmente oferecem menor manutenção e períodos de retorno mais rápidos, especialmente em aplicações descentralizadas, enquanto as configurações híbridas (por exemplo, membrana + PSA) são ideais quando se exige alta recuperação e pureza.

Uma estrutura de tomada de decisão deve incorporar esses fatores técnicos, econômicos e ambientais para orientar a seleção da tecnologia, garantindo a compatibilidade com as condições locais e os objetivos de sustentabilidade [65].

Estudos recentes de [66] enfatizam a necessidade de avaliações integradas e específicas para cada local, que equilibrem a viabilidade operacional com o desempenho ambiental e econômico a longo prazo.

5. Engarrafamento de Biogás

O engarrafamento de biogás é o processo de purificação, compressão e armazenamento de biogás (um combustível renovável composto principalmente de metano) em cilindros pressurizados (como cilindros de GLP) para facilitar o transporte e a utilização. Este processo envolve a remoção de impurezas, como dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e vapor de água (H_2O), do biogás bruto para aumentar sua concentração de metano e poder calorífico, tornando-o adequado como uma alternativa limpa aos combustíveis fósseis [67].

De acordo com [68] este processo envolve:

Compressão de gás purificado (biometano) utilizando compressores mecânicos;

Armazenamento em cilindros de alta pressão ou recipientes adaptados para uso seguro e eficiente.

Particularmente em cozinhas rurais e residenciais, o biogás engarrafado, refinado e comprimido em biometano, é utilizado como um combustível limpo e eficaz para cozinhar. Em locais isolados, fora da rede elétrica ou rurais, o biogás engarrafado pode ser utilizado para alimentar geradores a gás que produzem eletricidade. É ideal para necessidades de energia em pequena escala, como bombeamento, iluminação ou funcionamento de pequenos eletrodomésticos.

Assim como o gás natural comprimido (GNC), o biogás engarrafado (também conhecido como bio-GNC ou biometano) pode ser usado como combustível gasoso em automóveis após ser purificado e comprimido. Ele fornece um substituto renovável e de baixa emissão para gasolina ou diesel [69]. Embora as técnicas de compressão e engarrafamento tenham avançado, estudos comparativos que avaliem a viabilidade técnico-econômica de processos alternativos de engarrafamento em diferentes tamanhos e contextos operacionais (urbanos vs. rurais, países desenvolvidos vs. em desenvolvimento) são notavelmente escassos [67].

Questões logísticas e de infraestrutura continuam a restringir seu uso em larga escala, particularmente em áreas rurais ou descentralizadas. Embora os métodos de geração e aprimoramento do biogás tenham sido objeto de muitas pesquisas, o engarrafamento do biogás enriquecido (biometano), uma etapa crucial para facilitar seu armazenamento, transporte e comercialização, recebeu relativamente pouca atenção. Globalmente, há uma falta de uniformidade nos requisitos de segurança, nas certificações de vasos de pressão e nas leis de transporte para o biogás engarrafado.

Pouco se sabe sobre como os marcos regulatórios afetam a escalabilidade e a adoção da tecnologia de engarrafamento, especialmente em países de baixa e média renda. Utilizando técnicas convencionais de avaliação do ciclo de vida (ACV), o impacto ambiental dos processos de engarrafamento não foi adequadamente avaliado, particularmente em relação aos insumos energéticos para compressão, aos refrigerantes utilizados e ao vazamento de metano.

5.1. Material utilizado para o engarrafamento de biogás

Os materiais utilizados para o envase de biogás podem ser categorizados em componentes para produção, purificação, compressão e armazenamento de biogás. O biogás é produzido a partir de materiais orgânicos, como esterco bovino e resíduos de cozinha, que passam por digestão anaeróbica para gerar biogás bruto [23]. Para a purificação, são empregados métodos para remover umidade, dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), pois essas impurezas reduzem o valor energético e causam corrosão. Embora nem todos os agentes purificadores específicos sejam listados, os materiais comumente utilizados incluem lavadores de água e filtros químicos. O processo de purificação garante que o biogás seja transformado em biometano, aumentando as concentrações de metano para mais de 95% [70].

Para compressão e armazenamento, são utilizados diversos materiais, principalmente itens de baixo custo e disponíveis localmente. O compressor é construído com tubos e conexões de PVC de vários tamanhos [71], anéis de vedação de borracha para vedação hermética, esferas de borracha para válvulas de retenção e lubrificantes, como graxa de silicone, para minimizar o atrito.

Pregos ou grampos de metal são usados para montar os mecanismos das válvulas [10]. Uma vez purificado e comprimido, o biometano é armazenado em cilindros de aço convencionais de alta pressão (150–200 bar). O diagrama abaixo mostra o material típico usado para armazenar biogás [68].

5.2. Materiais e tipos de cilindros para engarraamento de biogás [72]

Aço (Tipo I - Totalmente Metálico); Revestimento de aço/alumínio + Envoltório de aro composto (Tipo II); Revestimento metálico + Envoltório completo em compósito (Tipo III);

Revestimento de plástico/polímero + Envelopamento completo em material compósito (Tipo IV).

5.3. Importância do engarraamento de biogás. O biogás engarraado pode ajudar o desenvolvimento rural e a equidade energética, chegando a locais isolados sem infraestrutura de rede. A comercialização e a gama de aplicações do biometano engarraado são aumentadas pelo seu uso como aquecimento industrial ou como combustível para automóveis (Bio-GNV). Ao possibilitar o armazenamento de biometano excedente, o engarraamento melhora a resiliência e ajuda a equilibrar as variações entre oferta e demanda [73].

Em linha com as metas climáticas nacionais e internacionais, o biogás engarraado reduz drasticamente as emissões de gases de efeito estufa quando usado em substituição ao GLP ou combustível. Ao gerar empregos na operação, manutenção e distribuição, o engarraamento de biogás apoia modelos de economia circular na gestão de resíduos e na agricultura [74].

Preencher as lacunas de pesquisa acima mencionadas é vital para aproveitar ao máximo o potencial do biogás como uma solução energética limpa e portátil. Uma revisão das tecnologias, desafios e inovações atuais no engarrafamento de biogás pode orientar formuladores de políticas, pesquisadores e empreendedores no desenvolvimento de sistemas de bioenergia escaláveis e sustentáveis para o futuro.

5.4. Normas de segurança para o engarrafamento de biogás

Dadas as altas pressões envolvidas, tipicamente variando de 200 a 250 bar, o biogás deve ser armazenado em recipientes pressurizados que atendam a critérios rigorosos de projeto, teste e certificação para garantir a segurança operacional e a conformidade ambiental. Entre as normas internacionais mais reconhecidas, a série ISO 11119 (Partes 1–3) descreve as especificações para cilindros de gás compostos com revestimentos não metálicos, incluindo os reforçados com fibra. No entanto, embora a ISO 11119 amplie a gama de materiais e projetos permitidos para cilindros leves de alta pressão, ela ainda impõe critérios de desempenho rigorosos, incluindo pressão de ruptura, resistência à fadiga, comportamento de vazamento antes da ruptura e estabilidade térmica [75]. Nesse contexto, materiais como o tereftalato de polietileno (PET), comumente usados em recipientes para líquidos de baixa pressão, são fundamentalmente inadequados para o armazenamento de gás em alta pressão devido às suas propriedades de barreira a gases deficientes, baixa resistência à tração e suscetibilidade à deformação por fluência e permeação de gás sob cargas sustentadas.

Essas deficiências tornam o PET incapaz de atender aos padrões ISO para vida útil à fadiga, ciclo de pressão e resistência à difusão interna de gás, especialmente na presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e umidade comumente encontrados no biogás [76].

Como demonstrado por estudos recentes [77], garantir a integridade dos sistemas de armazenamento de biogás requer alinhamento contínuo com as normas internacionais e adaptação aos critérios de segurança e desempenho em constante evolução.

A falha em fazê-lo não só compromete a segurança, como também mina a confiança pública e a credibilidade ambiental do biogás como vetor energético renovável.

5.5. Desafios Logísticos

As complexidades logísticas da implantação de sistemas de engarrafamento de biogás em áreas rurais são multifacetadas. Em primeiro lugar, a coleta e o transporte da matéria-prima, como resíduos agrícolas, esterco ou restos de comida, podem ser altamente descentralizados e sazonais, levando a uma produção inconsistente de biogás. Garantir taxas de fluxo de gás estáveis é essencial para a compressão e o armazenamento; no entanto, os biodigestores rurais frequentemente sofrem com alimentação insuficiente ou controle inadequado do processo. Além disso, a infraestrutura rodoviária inadequada, a falta de eletricidade confiável para a compressão e a ausência de redes de distribuição de cilindros locais tornam o transporte e a entrega de biogás engarrafado impraticáveis ou proibitivamente caros.

A manutenção de equipamentos de alta pressão e a inspeção periódica dos cilindros de gás também apresentam dificuldades onde a expertise técnica e as peças de reposição são escassas, comprometendo potencialmente a segurança e a longevidade do sistema [78].

5.6. Barreiras Econômicas

O engarrafamento de biogás enfrenta barreiras econômicas significativas, principalmente devido aos altos custos de produção e infraestrutura inicial.

O investimento de capital necessário para a instalação de usinas de biogás, incluindo digestores, equipamentos de purificação de gás, unidades de compressão e cilindros de armazenamento, é substancial, tornando esses projetos financeiramente desafiadores, especialmente para operações de pequena a média escala [79]. Sem subsídios governamentais ou programas de apoio específicos, pequenas empresas e agricultores frequentemente consideram os custos iniciais proibitivos e pouco atrativos para o investimento. Além disso, os custos operacionais permanecem elevados, uma vez que os processos envolvidos na purificação do biogás e sua compressão para engarrafamento são intensivos em energia. Atualmente, o custo de produção de biogás engarrafado (aprimoramento para biometano e posterior engarrafamento) pode variar de US\$ 36 a US\$ 108 por megawatt-hora, o que é aproximadamente cinco vezes maior que o preço de mercado do gás natural fóssil, ressaltando a desvantagem econômica do biogás nas condições atuais [80].

Para agravar o problema, as barreiras de financiamento restringem ainda mais o crescimento do setor.

O financiamento acessível e de longo prazo é limitado; os promotores de projetos enfrentam desafios como a falta de modelos de negócio viáveis, a baixa disponibilidade dos credores devido aos riscos percebidos e os longos períodos de retorno do investimento que muitas vezes ultrapassam uma década.

Estes obstáculos, em conjunto, impedem o investimento crucial necessário para expandir a indústria de engarrafamento de biogás [81].

A concorrência de mercado apresenta outro conjunto de desafios. O biometano e o biogás engarrafado têm dificuldades em competir com os baixos preços do gás natural fóssil convencional, particularmente em regiões onde a precificação do carbono e os incentivos às energias renováveis permanecem fracos ou inexistentes.

A obtenção de reduções de custos através de economias de escala também é um desafio. As instalações de menor dimensão tendem a ter custos unitários de produção mais elevados, enquanto as operações centralizadas de grande escala beneficiam de uma maior eficiência, mas requerem uma logística de matérias-primas e redes de distribuição sofisticadas.

Além disso, a infraestrutura existente para a recolha, engarrafamento e distribuição de biogás continua limitada, especialmente em regiões rurais ou em desenvolvimento, o que impede a penetração no mercado onde os benefícios poderiam ser mais pronunciados [82].

5.7. Restrições regulatórias

Os projetos de engarrafamento de biogás frequentemente enfrentam processos de licenciamento complexos e demorados devido aos marcos regulatórios fragmentados e não harmonizados que regem a construção, a operação e a segurança. Vários órgãos reguladores normalmente exigem licenças separadas que abordam avaliações de impacto ambiental, normas de saúde e segurança e certificação de equipamentos para armazenamento pressurizado, o que não só prolonga os prazos dos projetos, como também aumenta os custos de conformidade [83].

Além disso, muitas regiões carecem de normas técnicas e de segurança nacionais claras, particularmente para o manuseio e armazenamento de biogás em cilindros pressurizados, o que representa barreiras significativas à implantação em larga escala e limita as oportunidades de comércio transfronteiriço. Políticas restritivas e incertezas jurídicas complicam ainda mais o desenvolvimento; definições legais rígidas de “biogás”, “biometano” ou “gás renovável” podem limitar os tipos de matéria-prima elegíveis ou confinar os modelos de produção a instalações agrícolas ou centralizadas, excluindo, assim, iniciativas comunitárias ou cooperativas. Em algumas jurisdições, os produtores de biogás enfrentam acesso restrito ou proibido de terceiros a gasodutos e redes de distribuição de gás natural comerciais, dificultando a penetração mais ampla do biogás engarrafado no mercado [12]. Além disso, a evolução dos requisitos de conformidade e de testes, exemplificada por reformas recentes como o Padrão de Combustível Renovável dos EUA de 2025, exige atualizações contínuas nos protocolos de relatórios, medições e garantia de qualidade.

Essas exigências regulatórias rigorosas e, por vezes, ambíguas aumentam os encargos administrativos. Simultaneamente, uma ênfase crescente na certificação, rastreabilidade e contabilização das emissões do ciclo de vida exige esquemas de verificação dispendiosos e auditorias anuais, introduzindo ainda mais incerteza até que se alcance a harmonização internacional desses processos [84].

5.8. Abordagem Integrada e Recomendações Políticas

Para superar esses desafios, é necessária uma estratégia de longo prazo.

Isso inclui o desenvolvimento de tecnologias de engarrafamento modulares e de baixo custo, programas de treinamento para técnicos locais e instrumentos financeiros como microcrédito, modelos cooperativos e financiamento baseado em resultados para reduzir os custos iniciais. Os marcos regulatórios devem ser contextualizados e escalonados, permitindo a conformidade gradual e oferecendo isenções temporárias para sistemas piloto sob condições supervisionadas. As parcerias público-privadas e as políticas energéticas rurais devem priorizar a capacitação, o codesenvolvimento de infraestrutura e o acesso ao mercado para o biogás. Sem essas condições favoráveis, a implantação de sistemas de engarrafamento de biogás em áreas rurais e de baixa renda corre o risco de permanecer uma solução teórica, em vez de um caminho prático para a equidade energética e a sustentabilidade ambiental [85].

Estudo de Caso 1:

Usina de Biogás na região de Pune, Índia.

No estado de Maharashtra, na Índia, a Corporação Municipal de Pune (PMC) fez uma parceria com a empresa privada Mailhem-Ikos para desenvolver uma planta de biogás (bio-CNG) que processa aproximadamente 300 toneladas métricas de resíduos sólidos urbanos orgânicos diariamente, produzindo cerca de 14.000 kg/dia de biogás comprimido (CBG). O biogás bruto, que inicialmente contém cerca de 55–60% de CH_4 e 35–40% de CO_2 , é purificado por meio de um sistema de lavagem com água acoplado à filtração com carvão ativado para remover H_2S e siloxanos. O gás rico em metano é então comprimido a 220 bar e engarrafado em cilindros de alta pressão compostos, em conformidade com a norma ISO 11120 e as normas regulatórias locais.

Em condições operacionais, a planta atinge uma pureza de CH_4 de aproximadamente 96–98%, com eficiência de remoção de CO_2 superior a 90% e escape de metano mantido abaixo de 2%. O gás engarrafado é usado para abastecer ônibus urbanos da PMP e vendido para postos de GNV privados, com o apoio da política SATAT (Sustainable Alternative Towards Affordable Transportation) da Índia. Apesar do sucesso, o projeto enfrentou desafios iniciais, como a qualidade variável da matéria-prima, incrustações no lavador de água e obstáculos regulatórios para a certificação do transporte de cilindros, que foram superados por meio de um modelo de parceria público-privada e apoio político consistente. O projeto demonstra como o aprimoramento e o engarrafamento centralizados podem funcionar efetivamente nas áreas periféricas urbano-rurais quando a infraestrutura logística e os incentivos políticos estão alinhados [86].

Estudo de Caso 2:

Engarrafamento de biogás em escala comunitária em Kisumu, Quênia

Em uma área rural do oeste do Quênia, uma iniciativa piloto de engarrafamento de biogás, apoiada pelo Programa de Biogás do Quênia (KBP) e pela SNV Netherlands, teve como objetivo criar um sistema de engarrafamento descentralizado e gerenciado pela comunidade, utilizando resíduos agrícolas e esterco animal de 40 pequenas propriedades rurais. Cada família contribuiu com matéria-prima para um biodigestor centralizado que produziu aproximadamente 60 Nm³ / dia de biogás, o qual foi purificado utilizando uma unidade de adsorção por oscilação de pressão (PSA) de baixo custo para remover CO₂ e H₂S .

O gás purificado foi comprimido a 150 bar por um compressor movido a energia solar e armazenado em cilindros de aço do Tipo I.

Em condições reais, o sistema atingiu concentrações de metano de 93–95%, com escape de metano estimado em ~4% devido à entrada flutuante de biogás e às limitações do PSA de estágio único sob pressão variável. As inspeções dos cilindros foram desafiadoras devido à falta de centros de teste certificados nas proximidades; o transporte de cilindros de gás de alta pressão sem classificação regulatória clara atrasou a distribuição. Economicamente, o investimento inicial foi subsidiado por apoio de doadores; no entanto, o custo operacional por quilograma do biogás engarrafado ainda era 30–40% menor do que o GLP, tornando-o competitivo para aplicações culinárias [87].

Este caso destaca tanto a viabilidade técnica quanto as lacunas logísticas e regulatórias que dificultam a expansão em regiões de baixa renda.

Ressalta a necessidade de normas simplificadas, serviços móveis de inspeção e programas de microfinanciamento para viabilizar o acesso de áreas rurais à energia limpa.

5.9. Principais Lições dos Estudos de Caso

Desempenho da tecnologia: Tanto a tecnologia de lavagem com água quanto a PSA podem produzir biometano de alta pureza (>95% CH₄) em condições de campo quando combinadas com um pré-tratamento adequado;

Desafios operacionais: A variabilidade na matéria-prima, no fornecimento de energia e na pressão do sistema pode causar inconsistências na pureza do metano e no escape de metano, especialmente em ambientes descentralizados;

Conformidade regulamentar: O sucesso depende muito de políticas de apoio, equipamentos certificados e regulamentos de segurança e transporte claramente definidos;

Viabilidade Econômica: Embora projetos urbanos e periurbanos possam alcançar viabilidade comercial com escala e subsídios, os sistemas rurais exigem envolvimento de doadores, modelos de propriedade cooperativa e compartilhamento de custos para se manterem sustentáveis.

6. Conclusões. O aprimoramento e o engarrafamento do biogás representam soluções transformadoras na transição global para sistemas de energia sustentáveis e descentralizados.

Como demonstrado nesta revisão, diversas tecnologias de aprimoramento, desde a separação por membranas e PSA até a lavagem com água e produtos químicos, oferecem vantagens exclusivas dependendo das necessidades operacionais, das características da matéria-prima e das aplicações finais pretendidas. Inovações como sistemas híbridos, destilação criogênica e separação supersônica estão ampliando os limites de eficiência e pureza na produção de biometano, embora ainda existam desafios relacionados a custos, complexidade e impacto ambiental.

Uma conclusão fundamental é a importância da seleção da tecnologia com base em cenários de uso específicos, visto que nenhum método isolado é universalmente ideal. Embora a tecnologia de membranas ofereça alta recuperação de metano com baixo consumo de energia, a lavagem química proporciona excelente pureza do gás, à custa de maior complexidade operacional e risco ambiental.

Além disso, tecnologias mais recentes, como os métodos criogênicos e supersônicos, embora promissoras, requerem validação adicional e otimização de custos antes de sua ampla implementação.

Igualmente crucial, mas frequentemente negligenciada, é a fase de engarrafamento, que possibilita o armazenamento, o transporte e a comercialização do biometano purificado. Apesar de sua importância, essa área apresenta lacunas significativas em pesquisa e políticas públicas, principalmente no que diz respeito a normas de segurança, seleção de materiais, requisitos de infraestrutura e avaliações ambientais.

O potencial do engarrafamento de biogás para empoderar comunidades rurais, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e diversificar o acesso à energia é imenso; no entanto, permanece limitado por inconsistências regulatórias, desafios logísticos e análises comparativas escassas.

Maximizar o impacto das tecnologias de biogás exige uma abordagem holística que integre sistemas avançados de purificação com processos de engarrafamento eficientes e escaláveis. Superar os atuais desafios técnicos, econômicos e regulatórios será essencial para desbloquear todo o potencial do biogás como fonte de energia limpa, renovável e portátil. Pesquisas futuras devem priorizar o desenvolvimento de soluções economicamente viáveis, ambientalmente sustentáveis e adequadas ao contexto, que apoiem a transição global para um futuro energético de baixo carbono.

O aprimoramento e o engarrafamento do biogás são componentes críticos para o avanço de sistemas energéticos sustentáveis e descentralizados, oferecendo caminhos viáveis para reduzir emissões e ampliar o acesso à energia.

Esta revisão destaca que nenhuma tecnologia de aprimoramento isolada é universalmente ideal; em vez disso, soluções como separação por membrana, PSA (aglomerante de solventes) e lavagem com água apresentam vantagens e desvantagens em termos de custo, eficiência e escalabilidade, com as tecnologias de membrana ganhando impulso devido à sua modularidade e baixa demanda energética. Métodos emergentes, como a separação supersônica e criogênica, são promissores, mas requerem validação adicional e redução de custos.

O engarrafamento, uma fase vital, porém pouco pesquisada, enfrenta obstáculos relacionados a normas de segurança de materiais, infraestrutura e incoerência regulatória, particularmente em contextos rurais e de baixa renda. Pesquisas futuras devem se concentrar em sistemas integrados que combinem aprimoramento de alta eficiência com engarrafamento seguro e escalável, enfatizando tecnologias de baixo custo e baixo impacto. As principais recomendações incluem o aprimoramento da padronização, o investimento em testes de campo para novos métodos e a priorização de políticas públicas que facilitem a implantação e a comercialização do biometano em áreas rurais.

Contribuições dos autores

YM: concepção, redação — preparação do rascunho original, revisão e edição.
PM: supervisão e investigação. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis mediante solicitação razoável ao autor correspondente.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nosso sincero agradecimento ao Departamento de Inovação Científica (DSI), à Agência de Inovação Tecnológica (TIA) e à Área de

Pesquisa de Nicho: Energia Eólica Renovável do GMRDC, Universidade de Fort Hare, África do Sul, pelo apoio prestado.

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

- Preto, MJ; Roy, A.; Twinomunuji, E.; Kemausuor, F.; Oduro, R.; Lixiviar, M.; Sadhukhan, J.; Murphy, R. Biogás engarrafado – Uma oportunidade para uma cozinha limpa em Gana e Uganda. *Energias* 2021 , 14 , 3856. [Google Scholar] [CrossRef]
- Obaideen, K.; Abdelkareem, MA; Wilberforce, T.; Elsaid, K.; Sayed, ET; Maghrabie, HM; Olabi, A. Papel do biogás na consecução dos objetivos de desenvolvimento sustentável: avaliação, desafios e diretrizes. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2022 , 131 , 104207. [Google Scholar] [CrossRef]
- Chynoweth, DP; Owens, JM; Legrand, R. Legrand, Metano renovável da digestão anaeróbica de biomassa. *Renew. Energy* 2001 , 22 , 1–8. [Google Scholar] [CrossRef]
- Werkneh, AA. Impurezas do biogás: implicações ambientais e de saúde, tecnologias de remoção e perspectivas futuras. *Heliyon* 2022 , 8 , e10929. [Google Scholar] [CrossRef]
- Twinomunuji, E.; Kemausuor, F.; Black, M.; Roy, A.; Leach, M.; Sadhukhan, ROJ; Murphy, R. O potencial do biogás engarrafado para cozinhar de forma limpa na África. Disponível online: <https://www.mecs.org.uk/working-papers/.3> (acessado em 30 de julho de 2025).
- Abd, AA; Othman, MR; Helwani, Z.; Kim, J. Da geração de resíduos à geração de energia: comparação de desempenho entre as tecnologias de adsorção por oscilação de pressão e absorção por amina para o aprimoramento de biogás contendo sulfeto de hidrogênio para padrões de qualidade de combustível. *Energy* 2023 , 272 , 127060. [Google Scholar] [CrossRef]
- Stritzke, S.; Jain, P. A sustentabilidade de projetos de energia renovável descentralizados em países em desenvolvimento: aprendendo com a Zâmbia. *Energies* 2021 , 14 , 3757. [Google Scholar] [CrossRef]
- Aguilloso, G.; Arpia, K.; Khan, M.; Sapico, ZA; Lopez, ECR. Recent Advances in Membrane Technologies for Biogas Upgrading. *Eng. Proc.* 2024 , 67 , 57. [Google Scholar] [CrossRef]
- Rodero, MDR; Muñoz, R.; González-Sánchez, A.; Ruiz, HA; Quijano, G. Materiais de membrana para purificação e atualização de biogás: Fundamentos, avanços recentes e desafios. *J. Meio Ambiente. Química. Eng.* 2024 , 12 , 114106. [Google Scholar] [CrossRef]

Katariya, HG; Patolia, HP. Avanços nas tecnologias de limpeza, enriquecimento e utilização de biogás: um caminho a seguir. *Biomass Convers. Biorefin.* 2023 , 13 , 9565–9581. [Google Scholar] [CrossRef]

Wantz, E.; Lemonnier, M.; Benizri, D.; Dietrich, N.; Hébrard, G. Lavador de água inovador de alta pressão para aprimoramento de biogás em escala agrícola usando vácuo para regeneração de água. *Appl. Energy* 2023 , 350 , 121781. [Google Scholar] [CrossRef]

Mustafi, NN; Agarwal, AK. Biogás para o setor de transportes: situação atual, barreiras e perspectivas para adaptação em larga escala. Em: *Combustíveis alternativos e suas estratégias de utilização em motores de combustão interna ; Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade*; Springer: Singapura, 2020; pp. 229–271. [Google Scholar] [CrossRef]

Mugagga, GR; Omosa, IB; Thoruwa, T. Otimização e análise de um sistema de purificação de biogás por lavagem com água de baixa pressão através das abordagens de Taguchi e metodologia de superfície de resposta. *Int. J. Renew. Energy Dev.* 2023 , 12 , 99–110. [Google Scholar] [CrossRef]

Nguyen, LN; Kumar, J.; Vu, MT; Mohammed, JA; Pathak, N.; Commault, AS; Sutherland, D.; Zdarta, J.; Tyagi, VK; Nghiem, LD. Produção de biometano a partir da codigestão anaeróbica em estações de tratamento de águas residuais: uma revisão crítica sobre o desenvolvimento e as inovações em técnicas de aprimoramento do biogás. *Sci. Total Environ.* 2021 , 765 , 142753. [Google Scholar] [CrossRef]

Carranza-Abaid, A.; Wanderley, RR; Knuutila, HK; Jakobsen, JP. Análise e seleção de tecnologias ótimas baseadas em solventes para o aprimoramento do biogás. *Fuel* 2021 , 303 , 121327. [Google Scholar] [CrossRef]

Kapoor, R.; Subbarao, P.; Vijay, VK; Shah, G.; Sahota, S.; Singh, D.; Verma, M. Fatores que afetam a perda de metano em um sistema de purificação de biogás baseado em lavagem com água. *Appl. Energy* 2017 , 208 , 1379–1388. [Google Scholar] [CrossRef]

Castellanos-Sánchez, JE; Aguilar-Aguilar, FA; Hernández-Altamirano, R.; Venegas, JAV; Aryal, DR. Processos de purificação de biogás: revisão e perspectivas. *Biocombustíveis* 2024 , 15 , 215–227. [Google Scholar] [CrossRef]

Kabeyi, MJB; Olanrewaju, OA. Produção e Aplicações de Biometano. Em *Digestão Anaeróbica - Biotecnologia para Sustentabilidade Ambiental ; IntechOpen: Londres, Reino Unido, 2023.* [Google Scholar] [CrossRef]

Ogunlode, P.; Abunumah, O.; Orakwe, I.; Shehu, H.; Muhammad-Sukki, F.; Gobina, E. Avaliação comparativa do efeito do tamanho dos poros e da temperatura no transporte de gás em membranas cerâmicas nanoestruturadas para o aprimoramento do biogás. *Weentech Proc. Energy* 2019 , 5 , 195–205. [Google Scholar] [CrossRef]

Nsair, A.; Cinar, SO; Alassali, A.; Abu Qdais, H.; Kuchta, K. Parâmetros operacionais de usinas de biogás: um estudo de revisão e avaliação. *Energies* 2020 , 13 , 3761. [Google Scholar] [CrossRef]

Mandree, P.; Thopil, GA; Ramchuran, S. Oportunidades potenciais para converter resíduos em produtos químicos de base biológica em escala industrial na África do Sul. *Fermentation* 2023 , 9 , 908. [Google Scholar] [CrossRef]

Khan, MU; Usman, M.; Ashraf, MA; Dutta, N.; Luo, G.; Zhang, S. Uma revisão dos avanços recentes em técnicas de pré-tratamento de materiais lignocelulósicos para produção de biogás: Oportunidades e Limitações. *Chem. Eng. J. Adv.* 2021 , 10 , 100263. [Google Scholar] [CrossRef]

Naeiji, E.; Noorpoor, A.; Ghnavati, H. Aumento da produção de biometano no processo de digestão anaeróbica de resíduos sólidos urbanos por pré-tratamento químico e térmico e avaliação da comercialização do processo. *Fermentation* 2022 , 8 , 463. [Google Scholar] [CrossRef]

Awe, OW; Zhao, Y.; Nzihou, A.; Minh, DP; Lyczko, N. Uma revisão das tecnologias de utilização, purificação e aprimoramento do biogás. *Valorização de biomassa residual* 2017 , 8 , 267–283. [Google Scholar] [CrossRef]

Oxfam, GB; África, E. Mudanças climáticas, desenvolvimento e problemas energéticos na África do Sul: Outro mundo é possível. *Oxfam Policy Pract. Clim. Change Resil.* 2009 , 5 , 1–52. [Google Scholar]

Mohammadpour, H.; Cheng, KY; Pivrikas, A.; Ho, G. Uma revisão das tecnologias de aprimoramento do biogás: ênfase principal em sistemas eletroquímicos. *Water Sci. Technol.* 2025 , 91 , 93–116. [Google Scholar] [CrossRef]

Font-Palma, C.; Cann, D.; Udemu, C. Revisão das inovações em captura criogênica de carbono e suas aplicações potenciais. *C* 2021 , 7 , 58. [Google Scholar] [CrossRef]

Ahmed, SF; Mofijur, M.; Tarannum, K.; Chowdhury, AT; Rafa, N.; Nuzhat, S.; Kumar, PS; Vo, D.-VN; Lichtfouse, E.; Mahlia, TMI. Aprimoramento, economia e utilização do biogás: uma revisão. *Environ. Chem. Lett.* 2021 , 19 , 4137–4164. [Google Scholar] [CrossRef]

PG&E Gas R&D and Innovation. *Análise Técnica de Separação Criogênica* ; PG&E Gas R&D and Innovation: San Jose, CA, EUA, 2018. [Google Scholar]

Lakzian, E.; Yazdani, S.; Salmani, F.; Mahian, O.; Kim, HD; Ghalambaz, M.; Ding, H.; Yang, Y.; Li, B.; Wen, C. Separação supersônica para remoção sustentável de gases e captura de carbono. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2024 , 103 , 101158. [Google Scholar] [CrossRef]

Ding, H.; Zhang, G.; Wang, S.; Zhang, Y.; Yang, Y.; Wen, C. Otimização multiobjetivo de separador supersônico para remoção de gás e captura de carbono usando modelo de fluxo bifásico de três campos e algoritmo genético de classificação não dominada II (NSGA-II). *Sep. Purif. Technol.* 2025 , 358 , 130363. [Google Scholar] [CrossRef]

Okoro, EE; Igbiniedion, U.; Aimikhe, V.; Sanni, SE; Agwu, OE. Avaliação de parâmetros influentes para a desidratação supersônica de gás natural: abordagem de aprendizado de máquina. *Pet. Res.* 2022 , 7 , 372–383. [Google Scholar] [CrossRef]

Cao, X.; Bian, J. Tecnologia de separação supersônica para processamento de gás natural: uma revisão. *Chem. Eng. Process. Process. Intensif.* 2019 , 136 , 138–151. [Google Scholar] [CrossRef]

Bârsan, D.; Prodea, L.; Chiş, T. Análise de técnicas supersônicas para separação de água do gás natural extraído. *Int. J. Eng. Sci.* 2024 , 13 , 50–56. [Google Scholar] [CrossRef]

Capecelatro, J. Modelagem de fluxos de gás-partícula de alta velocidade relevantes para pousos de espaçonaves. *Int. J. Multiph. Flow* 2022 , 150 , 104008. [Google Scholar] [CrossRef]

Altam, RA; Lemma, TA; Jufar, SR; Sakidin, H.; Yusof, M.; Sa'Ad, N.; Ching, DLC; Karim, SA. Tendências no desenvolvimento de projetos de separadores supersônicos. *MATEC Web Conf.* 2017 , 131 , 03006. [Google Scholar] [CrossRef] [Versão Verde]

Iwuanyanwu, O.; Gil-Ozoudeh, I.; Okwandu, AC; Ike, CS. Retrofitting existing buildings for sustainability: Challenges and innovations. *Eng. Sci. Technol. J.* 2024 , 5 , 2616–2631. [Google Scholar] [CrossRef]

Alobaid, F.; Kuhn, A.; Vakkilainen, E.; Epple, B. Progressos recentes na flexibilidade operacional da combustão em leito fluidizado circulante de 1 MW. *Energy* 2024 , 306 , 132287. [Google Scholar] [CrossRef]

Osman, AI; Hefny, M.; Maksoud, MIAA; Elgarahy, AM; Rooney, DW. Avanços recentes em tecnologias de captura, armazenamento e utilização de carbono: uma revisão. *Environ. Chem. Lett.* 2021 , 19 , 797–849. [Google Scholar] [CrossRef]

Kiani, A.; Jiang, K.; Feron, P. Avaliação técnico-econômica da captura de CO₂ do ar usando um processo convencional de absorção em meio líquido. *Front. Energy Res.* 2020 , 8 , 92. [Google Scholar] [CrossRef]

Garcia, JA; Villen-Guzman, M.; Rodriguez-Maroto, JM; Paz-Garcia, JM. Análise técnica de vias e tecnologias de captura de CO₂. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022 , 10 , 108470. [Google Scholar] [CrossRef]

Pauzi, MMM; Azmi, N.; Lau, KK Tecnologias emergentes de regeneração de solventes para captura de CO₂ por meio de processos de purificação de gás natural offshore. *Sustainability* 2022 , 14 , 4350. [Google Scholar] [CrossRef]

Loachamin, D.; Casierra, J.; Calva, V.; Palma-Cando, A.; Ávila, EE; Ricaurte, M. Solventes e aditivos à base de amina para melhorar os processos de captura de CO₂ : uma revisão. *Chemengineering* 2024 , 8 , 129. [Google Scholar] [CrossRef]

Adhi, TP; Putra, EP; Haristyan, RB. Conceito de área de congelamento de CO₂ para destilação criogênica aprimorada de gás natural. Em *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* ; Institute of Physics Publishing: Bristol, Reino Unido, 2019. [Google Scholar] [CrossRef]

Collet, P.; Flottes, E.; Favre, A.; Raynal, L.; Pierre, H.; Capela, S.; Peregrina, C. Avaliação tecnoeconômica e do ciclo de vida da produção de metano via aprimoramento de biogás e tecnologia power-to-gas. *Appl. Energy* 2017 , 192 , 282–295. [Google Scholar] [CrossRef]

Abubakar, AM Biodigestor e tipo de matéria-prima: características, seleção e produção global de biogás. *J. Eng. Res. Sci.* 2022 , 1 , 170–187. [Google Scholar] [CrossRef]

Meyer, EL; Overen, OK; Obileke, K.; Botha, JJ; Anderson, JJ; Koatla, TA; Thubela, T.; Khamkham, TI; Ngqeleni, VD. Viabilidade financeira e econômica de biodigestores para gestão da demanda residencial rural e desenvolvimento sustentável. *Energy Rep.* 2021 , 7 , 1728–1741. [Google Scholar] [CrossRef]

Rawat, YS; Singh, GS; Tekleyohannes, AT. Otimizando os benefícios da biomassa de plantas exóticas invasoras na África do Sul. *Sustainability* 2024 , 16 , 1876. [Google Scholar] [CrossRef]

Steiniger, B.; Hupfau, S.; Insam, H.; Schaum, C. Explorando a digestão anaeróbica de temperaturas mesofílicas a termofílicas — aspectos operacionais e microbianos. *Fermentation* 2023 , 9 , 798. [Google Scholar] [CrossRef]

Farghali, M.; Osman, AI; Chen, Z.; Abdelhaleem, A.; Ihara, I.; Mohamed, IMA; Yap, P.-S.; Rooney, DW. Consequências sociais, ambientais e econômicas da integração de energias renováveis no setor elétrico: uma revisão. *Environ. Chem. Lett.* 2023 , 21 , 1381–1418. [Google Scholar] [CrossRef]

Nwosi, HA; Ezeh, EM Aplicação do separador supersônico gás-líquido Twister para recuperação aprimorada de gás natural em um fluxo de processo. *Niger. J. Trop. Eng.* 2024 , 18 , 345–369. [Google Scholar] [CrossRef]

Obileke, KC. Avaliação da sustentabilidade das técnicas atuais de aprimoramento do biogás. Em *Inovações na Indústria Global de Biogás: Aplicações de Princípios Verdes* ; Woodhead Publishing: Cambridge, Reino Unido, 2025; pp. 213–244. [Google Scholar] [CrossRef]

Fu, L.; Ren, Z.; Si, W.; Ma, Q.; Huang, W.; Liao, K.; Huang, Z.; Wang, Y.; Li, J.; Xu, P. Progresso da pesquisa sobre tecnologia de captura e utilização de CO₂ . *J. CO₂ Util.* 2022 , 66 , 102260. [Google Scholar] [CrossRef]

Soto, C.; Palacio, L.; Muñoz, R.; Prádanos, P.; Hernandez, A. Avanços recentes no aprimoramento de biogás e biohidrogênio baseado em membranas. *Processes* 2022 , 10 , 1918. [Google Scholar] [CrossRef]

Golmakani, A.; Wadi, B.; Manović, V.; Nabavi, SA. Avaliação comparativa dos processos PSA, PVSA e PSA duplo para o aprimoramento do biogás: o dilema da pureza, recuperação e consumo de energia. *Energies* 2023 , 16 , 6840. [Google Scholar] [CrossRef]

Gkotsis, P.; Kougias, P.; Mitrakas, M.; Zouboulis, A. Tecnologias de aprimoramento de biogás — Avanços recentes em processos baseados em membranas. *Int. J. Hydrogen Energy* 2023 , 48 , 3965–3993. [Google Scholar] [CrossRef]

Khan, MU; Lee, JTE; Bashir, MA; Dissanayake, PD; Ok, YS; Tong, YW; Shariati, MA; Wu, S.; Ahring, BK. Situação atual do aprimoramento do biogás para uso direto de biometano: uma revisão. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021 , 149 , 111343. [Google Scholar] [CrossRef]

Bashir, FI; Porter, RTJ; Catalanotti, E.; Mahgerefteh, H. Análise de desempenho e custo da adsorção por oscilação de pressão para recuperação de H₂ , CO e CO₂ de gases residuais de siderúrgicas. *Energies* 2025 , 18 , 2440. [Google Scholar] [CrossRef]

Upadhyay, A.; Kovalev, AA; Zhuravleva, EA; Kovalev, DA; Litti, YV; Masakapalli, SK; Pareek, N.; Vivekanand, V. Desenvolvimento recente em técnicas de atualização física, química, biológica e híbrida de biogás. *Sustentabilidade* 2022 , 15 , 476. [Google Scholar] [CrossRef]

Daneshvar, E.; Wicker, RJ; Show, P.-L.; Bhatnagar, A. Captura e utilização de carbono mediadas biologicamente por microalgas para biofixação sustentável de CO₂ e valorização de biomassa — Uma revisão. *Chem. Eng. J.* 2022 , 427 , 130884. [Google Scholar] [CrossRef]

Yousef, AM; El-Maghlany, WM; Eldrainy, YA; Attia, A. Nova abordagem para purificação de biogás usando separação criogênica e processo de destilação para captura de CO₂. *Energy* 2018 , 156 , 328–351. [Google Scholar] [CrossRef]

Abo-Khalil, AG; Sobhy, A.; Abdelkareem, MA; Olabi, A. Avanços e desafios em sistemas híbridos de armazenamento de energia: componentes, estratégias de controle e direções futuras. *Int. J. Thermofluids* 2023 , 20 , 100477. [Google Scholar] [CrossRef]

Jameel, MK; Mustafa, MA; Ahmed, HS; Mohammed, AJ; Ghazy, H.; Shakir, MN; Lawas, AM; Mohammed, SK; Idan, AH; Mahmoud, ZH; et al. Biogás: Produção, propriedades, aplicações, aspectos econômicos e desafios: Uma revisão. *Results Chem.* 2024 , 7 , 101549. [Google Scholar] [CrossRef]

Gkotsis, P.; Peleka, E.; Zouboulis, A. Tecnologias baseadas em membranas para captura de CO₂ pós-combustão de gases de combustão: progressos recentes em materiais de membrana comumente empregados. *Membranes* 2023 , 13 , 898. [Google Scholar] [CrossRef]

Galloni, M.; Di Marcoberardino, G. Tecnologia de aprimoramento de biogás: análise de processos convencionais e soluções emergentes. *Energies* 2024 , 17 , 2907. [Google Scholar] [CrossRef]

Ji, L.; Wu, Y.; Xie, Y.; Sun, L.; Huang, G. Uma estrutura integrada para análise de viabilidade e gestão otimizada de um sistema energético em escala de bairro com tecnologias fotovoltaicas em telhados e de conversão de resíduos em energia. *Energy Sustain. Dev.* 2022 , 70 , 78–92. [Google Scholar] [CrossRef]

Nallamothu, RB; Teferra, A.; Rao, BA Purificação, compressão e engarrafamento de biogás. *Glob. J. Eng. Des. Technol.* 2013 , 2 , 34–38. [Google Scholar]

Srivastava, S.; Kumar, S.; dev Sharma, K. Engarrafamento de biogás — Uma abordagem renovável. *Eng. J. Appl. Scopes* 2016 , 1 , 28–32. Disponível online: <https://www.researchgate.net/publication/322055714> (acessado em 30 de julho de 2025).

Obileke, K.; Nwokolo, N.; Makaka, G.; Mukumba, P.; Onyeaka, H. Digestão anaeróbica: Tecnologia para produção de biogás como fonte de energia renovável — Uma revisão. *Energy Environ.* 2021 , 32 , 191–225. [Google Scholar] [CrossRef]

Erick, MK. Adoção da tecnologia de biogás e sua contribuição para os meios de subsistência e conservação florestal na Divisão de Abogeta, Condado de Meru, Quênia. Tese de doutorado, Universidade Kenyatta, Nairobi, Quênia, 2018. [Google Scholar]

Bhatia, A. Compressores e Sistemas de Ar Comprimido. Curso nº: M06-018. Crédito: 6 PDH. Disponível online: www.cedengineering.com (acessado em 30 de julho de 2025).

Shohiwa, C.; Mapantsela, Y.; Makaka, G.; Mukumba, P.; Shambira, N. Valorização do Biogás para Biometano para Comercialização na África do Sul: Uma Revisão. *Energias* 2023 , 16 , 5272. [Google Scholar] [CrossRef]

Ndunguru, EM. Aumentando o acesso a fogões limpos: a praticidade do pagamento por uso na promoção da adoção de gás engarrafado em Kinondoni, Dar Es Salaam, Tanzânia. *Int. J. Clean Coal Energy* 2021 , 10 , 41–58. [Google Scholar] [CrossRef]

Mutungwazi, A.; Mukumba, P.; Makaka, G. Tipos de biodigestores instalados na África do Sul: Uma revisão. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018 , 81 , 172–180. [Google Scholar] [CrossRef]

ISO 11119-1 ; Cilindros de gás — Cilindros de gás de construção composta — Especificação e métodos de ensaio — Parte 1: Cilindros de gás compostos com revestimento circunferencial. Organização Internacional de Normalização: Genebra, Suíça, 2002.

Hatinoglu, MD; Sanin, FD Destino e efeitos de microplásticos de tereftalato de polietileno (PET) durante a digestão anaeróbica de lodo pré-tratado alcalino-térmico. *Waste Manag.* 2022 , 153 , 376–385. [Google Scholar] [CrossRef]

Hegazy, H.; Saady, NMC; Zendehboudi, S. Segurança em usinas de biogás: uma análise baseada em normas internacionais e melhores práticas. *Process. Saf. Environ. Prot.* 2025 , 200 , 107390. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, J. Tecnologia descentralizada de biogás de digestão anaeróbica e ecossistema agrícola: Oportunidades e desafios. *Front. Energy Res.* 2014 , 2 , 10. [Google Scholar] [CrossRef]

Gbadeyan, OJ; Muthivhi, J.; Liganiso, LZ; Deenadayalu, N.; Alabi, OO. Produção de biogás e estudos de viabilidade técnico-econômica da implementação de tecnologia de biogás doméstico na África: uma revisão crítica. *Energy Sci. Eng.* 2024 , 12 , 4788–4806. [Google Scholar] [CrossRef]

Vidigal, LPV; de Souza, TAZ; da Costa, RBR; Roque, LFdA; Frez, GV; Pérez-Rangel, NV; Pinto, GM; Ferreira, DJS; Cardinali, VBA; de Carvalho, FS; e outros. Biometano como combustível para a transição energética na América do Sul: revisão, desafios, oportunidades e perspectivas. *Energias* 2025 , 18 , 2967. [Google Scholar] [CrossRef]

Gandhi, HH; Hoex, B.; Hallam, BJ. Riscos de investimento estratégico ameaçam a ambição da Índia em energia renovável. *Energy Strat. Rev.* 2022 , 43 , 100921. [Google Scholar] [CrossRef]

Thrän, D.; Adetona, A.; Borchers, M.; Cyffka, K.-F.; Daniel-Gromke, J.; Oehmichen, K. Contribuição potencial do biogás para sistemas de energia líquida zero — Um estudo comparativo do Canadá e da Alemanha. *Biomass Bioenergy* 2025 , 193 , 107561. [Google Scholar] [CrossRef]

Hegazy, H.; Saady, NMC; Khan, F.; Zendehboudi, S.; Albayati, TM Acidentes em usinas de biogás: análise de ocorrência, gravidade e associações entre 1990 e 2023. *Saf. Sci.* 2024 , 177 , 106597. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhang, Y.; Lu, X.; Liu, B.; Wu, D. Impactos da urbanização e fatores associados nos serviços ecossistêmicos na aglomeração urbana de Pequim-Tianjin-Hebei, China: implicações para a política de uso da terra. *Sustentabilidade* 2018 , 10 , 4334. [Google Scholar] [CrossRef]

Dhillon, R.; Moncur, Q. Agricultura em pequena escala: uma revisão dos desafios e oportunidades potenciais oferecidas pelos avanços tecnológicos. *Sustentabilidade* 2023 , 15 , 15478. [Google Scholar] [CrossRef]

Virginia, DD; Buana, IGS; Kamil, M.; Boyke, C.; Lazuardi, SD; Wuryaningrum, P. Modelo de Distribuição de Biometano-Gás Natural Comprimido (Bio-GNC) em Apoio ao Programa de Substituição de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Em IOP Conference Series: Earth and Environmental Science ; Institute of Physics: Londres, Reino Unido, 2025. [Google Scholar] [CrossRef]

Dianati, K.; Schäfer, L.; Milner, J.; Gómez-Sanabria, A.; Gitau, H.; Hale, J.; Langmaack, H.; Kiesewetter, G.; Muindi, K.; Mberu, B.; et al. Uma análise de cenários baseada em dinâmica de sistemas para a gestão de resíduos sólidos residenciais em Kisumu, Quênia. *Sci. Total Environ.* 2021 , 777 , 146200. [Google Scholar] [CrossRef]

Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais, e não dos editores. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.





Integração da utilização de biogás em sistemas de aquecimento urbano

Integração da utilização de biogás em sistemas de aquecimento urbano

Ance Ansone *, Katarina Brence, Liga Rozentale , Cláudio Rochas e Dagnija Blumberga *

Instituto de Sistemas de Energia e Meio Ambiente, Universidade Técnica de Riga, Azenes iela 12/1, 1048 Riga, Letônia

Resumo

Este estudo investiga o papel do biogás e do biometano na aceleração da descarbonização dos sistemas de aquecimento urbano na Europa. Uma revisão estruturada da literatura, combinada com dois estudos de caso representativos, avalia o desempenho tecnológico, econômico e ambiental em diferentes escalas de sistema. O modelo de otimização Meppel, desenvolvido para os Países Baixos, e a estrutura de modelagem de sistemas energéticos Backbone, em larga escala, para a Finlândia, são comparados para identificar sinergias metodológicas e insights operacionais para a integração da bioenergia em redes de aquecimento. Os resultados mostram que os sistemas de cogeração baseados em biogás podem reduzir as emissões de dióxido de carbono em mais de 70% em comparação com alternativas baseadas em combustíveis fósseis e melhorar significativamente a segurança energética local, especialmente quando acoplados a bombas de calor e armazenamento térmico.

A modelagem em larga escala demonstra ainda que os recursos de biometano e bioenergia proporcionam flexibilidade valiosa ao sistema, facilitando a integração setorial e apoiando o equilíbrio da produção variável de eletricidade renovável. A principal contribuição deste estudo é uma avaliação comparativa integrada em duas escalas diferentes (local e regional), que relaciona dados operacionais, modelagem e resultados de desempenho para determinar como o biogás e o biometano podem otimizar o sistema energético a curto e longo prazo para o fornecimento centralizado de calor. Os resultados confirmam que o biogás e o biometano são recursos renováveis essenciais e despacháveis, capazes de sustentar sistemas de aquecimento urbano escaláveis, de baixo carbono e resilientes em toda a Europa.

Palavras-chave: biogás ; biometano ; aquecimento urbano ; cogeração (CHP) ; modelagem de otimização ; estrutura básica ; energia renovável ; redução de carbono ; economia circular

1. Introdução

A descarbonização do setor de aquecimento é necessária para atingir as metas de neutralidade climática da União Europeia para 2050. Os sistemas de aquecimento urbano (AU) desempenham um papel importante nesta transição para a integração eficiente de fontes de energia renováveis e calor residual no fornecimento de energia térmica. Entre as várias opções renováveis, o biogás e a sua forma melhorada, o biometano, são recursos valiosos, pois oferecem uma economia circular sustentável, facilitando uma alternativa à energia fóssil na infraestrutura de gás natural existente.

Estas características permitem que o biogás e o biometano complementem a eletricidade renovável variável, fortaleçam a produção local e a segurança do abastecimento e reduzam as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) [1 , 2 , 3].

O biogás é gerado a partir de resíduos orgânicos, resíduos agrícolas e lodo de esgoto por meio de digestão anaeróbica, fornecendo energia renovável e contribuindo para os objetivos da economia circular, transformando fluxos de resíduos em recursos úteis. Quando refinado para biometano, o gás renovável resultante pode ser injetado diretamente nas redes de gás ou usado como combustível de baixo carbono para geração combinada de calor e energia (CHP) e aplicações de aquecimento urbano. Avaliações do ciclo de vida mostram consistentemente que a substituição do gás natural fóssil por energia baseada em biogás pode reduzir as emissões de GEE em mais de 70%, dependendo da matéria-prima e das configurações do sistema [3].

A transição energética na Europa e em todo o mundo está impulsionando uma mudança dos combustíveis fósseis para fontes de energia renováveis e de baixo carbono. Muitos países, incluindo a Letônia, estabeleceram metas de neutralidade climática para 2050, e os gases renováveis e de baixo carbono representam uma ferramenta fundamental para alcançar essas ambições. Nesse contexto, o biogás e o biometano servem como vetores energéticos flexíveis que complementam a disponibilidade variável de recursos renováveis e aumentam a segurança energética local.

Os sistemas de aquecimento urbano desempenham um papel importante na descarbonização do setor de aquecimento, permitindo a distribuição eficiente de calor e a integração de fontes renováveis e de calor residual. Atingir a neutralidade de carbono em nível municipal pode exigir uma combinação de aquecimento urbano e soluções individuais de aquecimento renovável, dependendo da prontidão da infraestrutura e das oportunidades para aumentar a participação de energias renováveis no aquecimento [4].

A Europa opera mais de 21.000 usinas de biogás, com variações significativas entre as diferentes regiões, produzindo aproximadamente 234 TWh anualmente e representando cerca de 7% da demanda de gás da UE [5]. A Alemanha sozinha abriga a maior parte, com cerca de 9.500 usinas de biogás, refletindo décadas de diversas medidas políticas de estímulo, como incentivos às energias renováveis, que estimularam um crescimento inicial e sustentado [6]. Em contraste, desde 2025, a França lidera em capacidade instalada de biometano (190.711 Nm³ /h), seguida pela Alemanha (157.258 Nm³ /h), Itália (99.658 Nm³ /h), Reino Unido (93.151 Nm³ /h) e Dinamarca (85.142 Nm³ /h). Por outro lado, em 2023 e 2024, a Lituânia e a Letônia iniciaram suas primeiras injeções de biometano na rede [7]. A França implementou um plano de 1,5 bilhão de euros para expandir a infraestrutura de injeção e transporte de biometano. A Dinamarca introduziu um programa de gás renovável de 1,7 bilhão de euros com o objetivo de alcançar a integração total do biometano até 2030. A Alemanha continua a liderar a produção europeia por meio de tarifas de incentivo estabelecidas e investimentos de capital contínuos.

A Itália adotou novos decretos de incentivo para o período de 2022 a 2026 para apoiar a capacidade adicional de produção de biometano, mostrando as diferenças entre o status do desenvolvimento e do apoio ao biometano nos países europeus [8]. A transição da energia fóssil para a bioenergia também estimula o desenvolvimento regional, a criação de empregos e os fluxos circulares de recursos. No entanto, apesar desses pontos fortes, ainda existem desafios, incluindo custos de produção variáveis, riscos de vazamento de metano e concorrência com os preços do mercado de gás natural [9].

Os sistemas de aquecimento urbano oferecem uma forma prática e eficiente de utilizar biogás e biometano em maior escala. Quando a produção de calor renovável é combinada com armazenamento térmico, unidades de cogeração e, cada vez mais, bombas de calor, as redes de aquecimento urbano podem atingir alta eficiência, maior flexibilidade operacional e reduções substanciais de emissões. No entanto, a pesquisa existente sobre a integração da bioenergia em sistemas de aquecimento urbano ainda é bastante fragmentada. A maioria dos estudos concentra-se em tecnologias específicas ou estudos de caso individuais, enquanto análises comparativas mais amplas que abordem simultaneamente o desempenho técnico, econômico e ambiental em diferentes escalas de sistema ainda são limitadas [10].

O objetivo deste estudo é preencher essa lacuna por meio de uma análise comparativa estruturada de dois estudos de caso europeus representativos: o sistema de aquecimento urbano de Meppel, na Holanda, e a estrutura de modelagem do sistema energético Backbone, aplicada na Finlândia.

O caso de Meppel ilustra a otimização em escala local de um sistema energético híbrido que combina cogeração de biogás, bombas de calor, armazenamento térmico e aquecimento urbano. O modelo Backbone representa a otimização regional em larga escala de sistemas interconectados de fornecimento de eletricidade, aquecimento e biomassa. Ao comparar esses sistemas, o estudo destaca importantes sinergias tecnológicas, resultados de desempenho e análises sobre como o biogás e o biometano podem apoiar a descarbonização, tanto a curto quanto a longo prazo, do fornecimento centralizado de calor.

2. Métodos e Metodologia

Os métodos aplicados neste estudo baseiam-se numa abordagem de revisão estruturada, concebida para identificar, resumir e avaliar sistematicamente a literatura científica sobre a utilização de biogás e biometano em sistemas de aquecimento urbano. Este processo permite uma avaliação coerente do conhecimento atual e apoia o desenvolvimento de uma visão geral informada sobre o potencial e as aplicações práticas destes gases renováveis.

A Figura 1 ilustra esquematicamente o fluxo de trabalho adotado nesta pesquisa. O processo iniciou-se com a definição do problema, seguida por uma revisão estruturada da literatura que orientou a seleção de estudos de caso relevantes. Posteriormente, foram identificadas abordagens de modelagem e ferramentas analíticas, após o que foi realizada uma avaliação comparativa. O fluxo de trabalho concluiu-se com a formulação das principais conclusões e a identificação de pontos de discussão e lacunas de pesquisa.

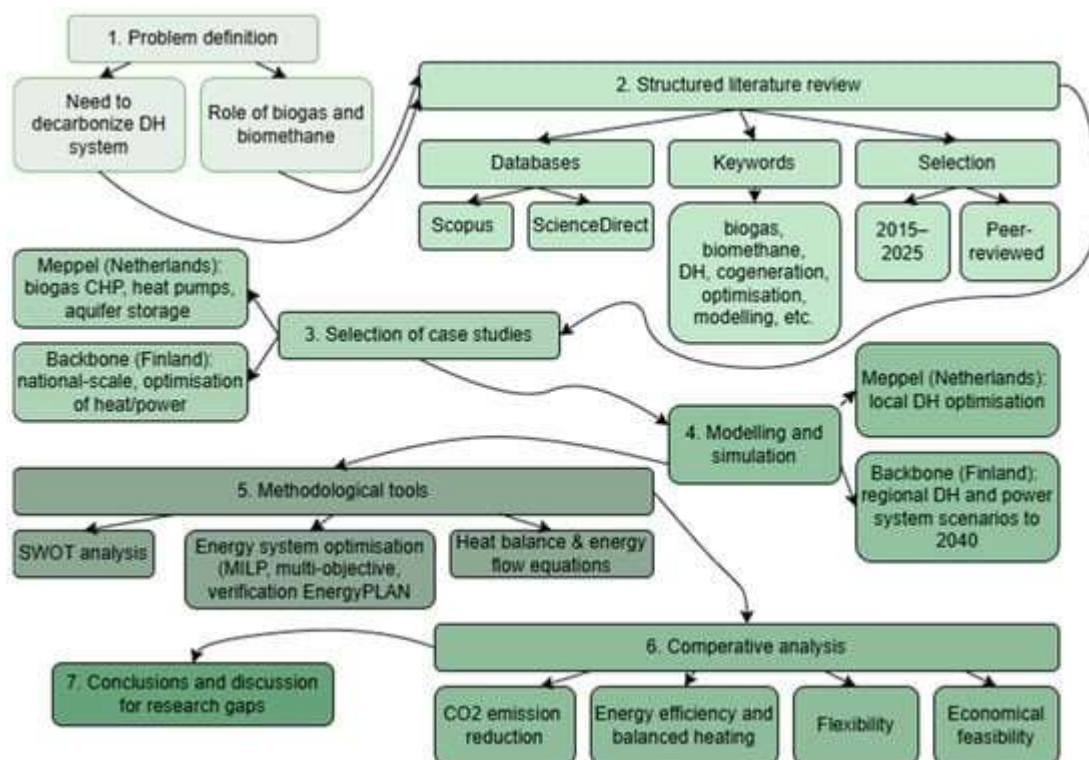


Figura 1. Algoritmo dos métodos de pesquisa utilizados e sua lógica.

Uma análise SWOT (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças) foi aplicada como uma estrutura organizada para apoiar a avaliação estratégica. Embora relativamente simples, ela pode fornecer uma visão geral abrangente e acessível para as partes interessadas. Apesar de a análise SWOT ser limitada pela subjetividade, categorização estática e baixa capacidade de priorização, ela oferece valor como uma ferramenta acessível para sintetizar diversas descobertas. Suas limitações muitas vezes exigem pesquisas mais extensas ou o desenvolvimento de abordagens híbridas, como a integração de métodos de análise multicritério para melhorar a objetividade. No entanto, suas principais vantagens, como a facilidade de uso e a capacidade de gerar uma visão geral integrada das descobertas, a tornam uma ferramenta valiosa para formar uma compreensão inicial do tema [11 , 12].

Numerosos estudos analisaram a otimização de sistemas energéticos usando técnicas de modelagem matemática. Esses métodos são comumente categorizados em abordagens de objetivo único e multiobjetivo. Os métodos de objetivo único normalmente se concentram em minimizar os custos anuais, enquanto a otimização multiobjetivo incorpora critérios adicionais, como emissões, permitindo avaliação abrangente do desempenho do sistema [13].

Diversos estudos examinaram o planejamento e a operação de sistemas de energia usando modelos de otimização matemática. Esses modelos geralmente abordam um único objetivo, como a redução dos custos totais anuais ou do ciclo de vida, enquanto outros incorporam metas que incluem indicadores ambientais, como emissões de CO₂ [14 , 15] .

Uma contribuição notável para a otimização de sistemas de aquecimento urbano é o trabalho de Leeuwen et al., que desenvolveram um modelo para a área de Meppel, na Holanda [17]. O sistema energético de Meppel combina cogeração de biogás, aquecimento urbano e bombas de calor geotérmicas em uma configuração integrada. Uma central de cogeração (CHP) converte o biogás proveniente de uma estação de tratamento de águas residuais municipais em eletricidade e calor: a eletricidade alimenta as bombas de calor, enquanto o calor abastece a rede de aquecimento urbano. Devido ao progresso econômico e construtivo mais lento, o sistema foi implementado gradualmente, começando com cerca de 40 residências e expandindo para 176. O sistema energético inclui uma central de cogeração de biogás, um reservatório de água de alta temperatura, bombas de calor e armazenamento de energia em aquíferos.

A eletricidade da unidade de cogeração pode ser usada localmente ou exportada para a rede, e a demanda de refrigeração é atendida por meio de poços de água fria no aquífero. O equilíbrio térmico é mantido pela recuperação de calor e pela regeneração adicional proveniente de resfriadores a seco ou da estação de tratamento de águas residuais. Leeuwen et al. Desenvolveu-se um modelo de otimização para maximizar a rentabilidade deste sistema energético local, analisando as necessidades de aquecimento e arrefecimento.

O modelo identificou o tamanho e o funcionamento ideais da unidade de cogeração e das caldeiras em diferentes cenários e propôs uma abordagem de implementação faseada. A primeira fase baseia-se principalmente em caldeiras a gás natural e eletricidade verde comprada, enquanto as fases posteriores introduzem cogeração a biogás e armazenamento de calor em aquíferos à medida que a oferta e a procura aumentam. Uma unidade de arrefecimento também é incorporada para satisfazer as necessidades de arrefecimento das residências. A sustentabilidade do sistema foi avaliada comparando o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de CO₂ em cada fase de desenvolvimento, com particular atenção à segunda fase, que envolve 160 casas [17 , 18].

O estudo definiu quatro casos e concluiu que a utilização de biogás no aquecimento urbano é uma solução mais sustentável. No entanto, quando a unidade de cogeração opera com gás natural, a sua sustentabilidade é apenas cerca de 6% superior à dos casos com aquecimento convencional com caldeiras a gás.

Os objetivos e as contribuições do estudo são apresentados na Figura 2 .

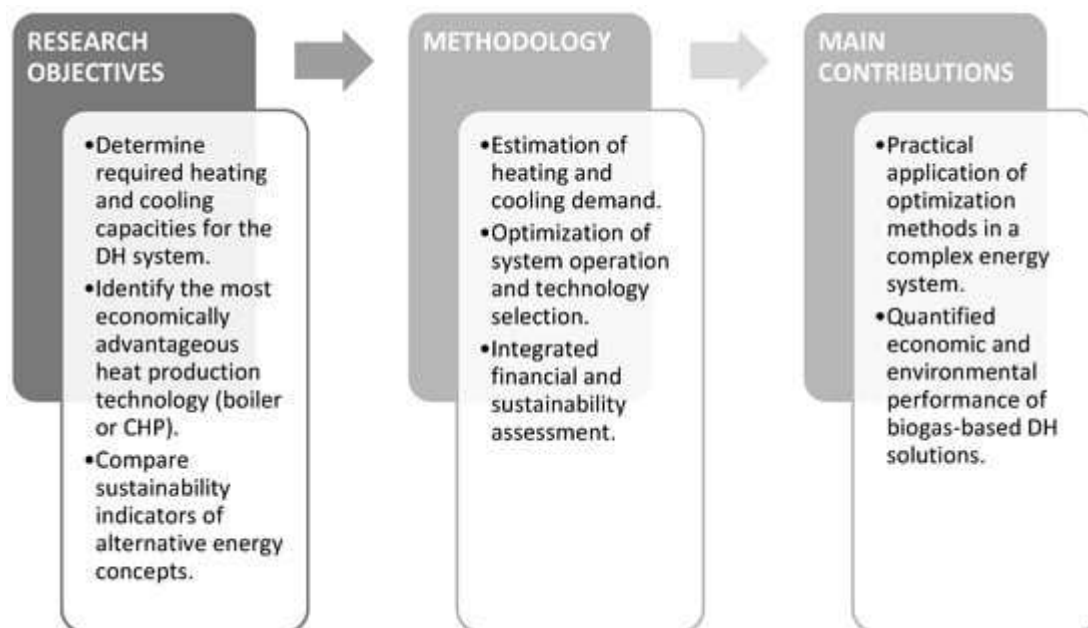


Figura 2. Objetivos da pesquisa e principais contribuições analíticas do estudo, ilustrando a relação entre projeto do sistema, modelagem de otimização e desempenho de sustentabilidade (desenvolvido pelo autor usando [17]).

A Figura 2 resume como a análise e otimização de sistemas são utilizadas para avaliar o desempenho econômico e ambiental de soluções de aquecimento urbano baseadas em biogás. Ela mostra a estrutura da pesquisa, incluindo a progressão desde os principais objetivos da pesquisa, passando pela metodologia aplicada, até as principais contribuições científicas.

Foi realizada uma revisão estruturada da literatura utilizando bases de dados de alta qualidade, em particular ScienceDirect e Scopus. Para avaliar a base de pesquisa existente, a busca combinou palavras-chave como “biogás”, “biometano”, “aquecimento urbano”, “otimização de sistemas energéticos”, “cogeração”, “modelagem” e “cálculos de aquecimento”.

Os critérios de inclusão focaram em artigos de periódicos revisados por pares, publicados entre 2015 e 2025, escritos em inglês e dedicados ao uso de biogás ou biometano em sistemas de aquecimento urbano ou sistemas energéticos integrados. Para garantir que este artigo permanecesse focado em aplicações de aquecimento urbano, pesquisas que abordassem apenas sistemas de biogás de pequena capacidade ou isolados da rede, sem vínculos claros com redes de aquecimento urbano, foram excluídas. Tais sistemas diferem fundamentalmente em escala e finalidade operacional, visto que instalações de biogás e biometano isoladas da rede normalmente fornecem energia para uso no local, pequenos edifícios próximos ou necessidades de transporte interno. Suas configurações tecnológicas, condições de contorno econômicas e desempenho ambiental, portanto, não são diretamente comparáveis a sistemas de aquecimento urbano centralizados, que requerem fornecimento contínuo de calor, redes térmicas interconectadas e ativos de produção centralizados ou semicentralizados. Por essas razões, estudos que analisaram sistemas de pequena capacidade ou autônomos foram excluídos para evitar distorções na avaliação comparativa e garantir que as conclusões permaneçam diretamente relevantes para aplicações de aquecimento urbano.

Dois estudos de caso representativos foram selecionados para análise detalhada com base em sua diversidade metodológica e relevância para diferentes contextos europeus: o modelo Backbone na Finlândia, onde uma estrutura de otimização de programação linear inteira mista (MILP) em grande escala foi aplicada aos sistemas de energia nórdicos e europeus, enfatizando a integração

de recursos de bioenergia e aquecimento urbano na operação do sistema e planejamento de investimento [18]; e o estudo de caso da cidade de Meppel na Holanda, onde um modelo de otimização em escala local combinando cogeração de biogás, aquecimento urbano e bombas de calor, projetado para avaliar o desempenho do sistema, balanço energético e sustentabilidade em um contexto urbano, foi aplicado [17].

Dados essenciais sobre configuração do sistema, matriz energética, eficiência, potencial de redução de CO₂ e parâmetros técnico-econômicos foram extraídos de cada estudo de caso. Em seguida, foi realizada uma análise comparativa, com foco em quatro dimensões principais: (1) abordagens de modelagem e métodos de otimização, (2) desempenho energético e de emissões, (3) flexibilidade operacional e integração de energias renováveis e (4) impactos de políticas e investimentos.

Essa comparação estruturada proporciona uma perspectiva mais ampla, desde um microssistema em escala urbana (Meppel) até a modelagem de sistemas nacionais e regionais (Backbone).

2.1. Metodologia e Estudo de Caso do Sistema de Aquecimento Urbano de Meppel

A metodologia utilizada por Leeuwen et al. emprega um modelo de otimização matemática projetado para identificar configurações economicamente ótimas para sistemas de aquecimento urbano (DH) que integram cogeração de biogás, caldeiras e armazenamento de calor.

O modelo de otimização desenvolvido foi concebido para servir como uma ferramenta de validação para verificar modelagens adicionais realizadas usando o sistema EnergyPLAN [17].

O conceito inicial de um sistema de aquecimento urbano é definido pela eficiência de seus conversores, pelas características dos recursos energéticos, pela demanda de energia e pelos fluxos de energia. Um resumo dos principais métodos de pesquisa e exemplos de sua aplicação para avaliação do biogás e de outras fontes de energia para uso em aquecimento urbano.

O conceito energético originário dos Países Baixos serviu como sistema piloto: combina um motor de cogeração alimentado por biogás, caldeiras a gás de reserva, um reservatório de água de alta temperatura, bombas de calor e armazenamento de energia térmica em aquíferos. O sistema de cogeração fornece eletricidade para as bombas de calor e calor para a rede de distribuição de água. O arrefecimento é assegurado por um sistema baseado em aquíferos, utilizando poços de armazenamento de calor e frio.

Determinar as capacidades de aquecimento e resfriamento necessárias para a rede de aquecimento urbano;

Identificar as combinações ideais de cogeração e caldeiras numa perspetiva económica (de custos);

Avaliação das reduções de emissões de CO₂ na operação de biogás e gás natural [17].

2.2. Estrutura de Modelagem do Sistema Energético Principal

Para a modelagem em macroescala, foi aplicada a estrutura Backbone. O Backbone é um sistema energético de código aberto, implementado em Python e resolvido por meio de programação linear inteira mista (MILP).

Ele permite a otimização temporal e espacial de sistemas interconectados de fornecimento de eletricidade, aquecimento e biomassa.

O modelo representa:

Sistemas de energia do norte da Europa (Módulo A),

Setores finlandeses de bioenergia e calor (Módulos B e C),

Trocas transfronteiriças de eletricidade e fluxos de recursos de biomassa.

Os conjuntos de dados de entrada incluíram as capacidades de geração de energia da Rede Europeia de Operadores de Sistemas de Transmissão de Eletricidade (ENTSO-E), as estatísticas de biomassa do Instituto de Recursos Naturais da Finlândia (LUKE) e dados meteorológicos, que foram pré-processados para garantir sua compatibilidade com os intervalos de tempo e a resolução geográfica do modelo Backbone. Os dados de capacidade de geração de energia da ENTSO-E foram agrupados por principais tipos de geração e alinhados com os intervalos de tempo horários do modelo. Os dados de disponibilidade de biomassa do LUKE foram convertidos em estimativas de oferta anual.

Os conjuntos de dados meteorológicos foram processados em perfis horários de temperatura e recursos renováveis para representar a variabilidade sazonal e diária na demanda de calor e no desempenho do sistema. Para lidar com a incerteza nos dados de entrada, testamos como as mudanças em fatores importantes afetaram os resultados.

O modelo avalia cenários até 2040 com medidas progressivas de descarbonização — eliminação gradual do carvão, substituição por biomassa e bombas de calor em grande escala em Helsinque e outras redes de aquecimento urbano finlandesas [18]. Uma visualização simplificada de ambos os casos do sistema é apresentada na Figura 3 .

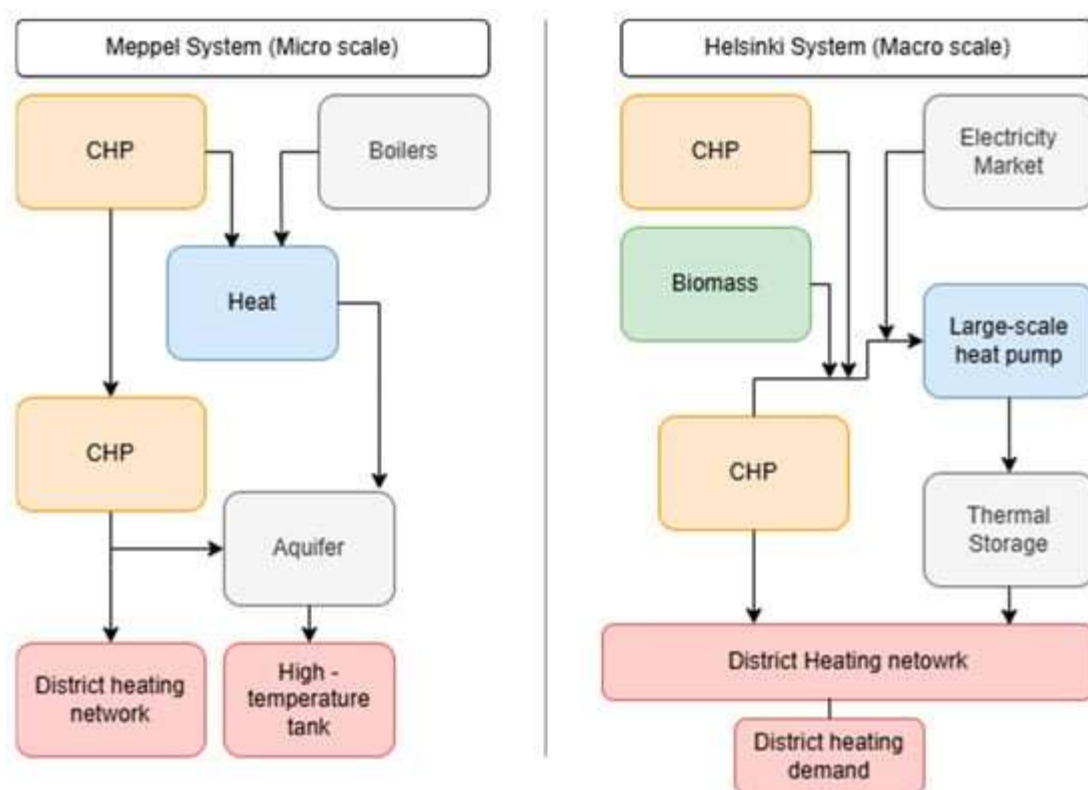


Figura 3. Visualização de sistemas.

O sistema de aquecimento urbano de Meppel representa uma pequena rede local com poucos componentes (cogeração, caldeiras, aquífero) utilizada por um número reduzido de edifícios. Na terminologia de sistemas energéticos, esse tipo de instalação é comumente descrito como de microescala, pois abrange uma área geográfica relativamente pequena, possui poucas fontes de calor e algumas unidades descentralizadas.

O sistema de Helsinque, por sua vez, é uma rede de aquecimento urbano que abrange toda a cidade, com diversas fontes de calor (biomassa, mercado de eletricidade, bombas de calor, cogeração) e utiliza armazenamento em larga escala e infraestrutura centralizada para abastecer um grande número de consumidores.

3. Resultados

3.1. Utilização do biogás e benefícios ambientais

O biogás é tipicamente composto por cerca de 60% de metano (CH_4) e 40% de CO_2 , com pequenas quantidades de H_2 e outros gases. Através da digestão anaeróbica (DA), resíduos agrícolas, lodo de esgoto e resíduos urbanos são convertidos em energia renovável e fertilizante digestato. O aprimoramento do biogás para a produção de biometano permite seu uso para injeção na rede elétrica e em aplicações de transporte.

Análises do ciclo de vida indicam que a substituição do gás fóssil por biogás em sistemas de cogeração pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 70–90%, dependendo da matéria-prima.

A redução nas emissões reflete diferenças na origem das matérias-primas do biogás e nas respectivas etapas do ciclo de vida. As emissões dos sistemas de biogás decorrem principalmente da produção e transporte da matéria-prima, da digestão anaeróbica e da purificação do gás. Em contrapartida, as emissões associadas ao gás natural fóssil decorrem principalmente da extração, processamento, transporte e vazamentos na infraestrutura.

Resíduos agrícolas e resíduos orgânicos coletados separadamente oferecem reduções líquidas menores, mas ainda significativas. Em comparação, as culturas energéticas geralmente oferecem economias menores devido às emissões associadas ao cultivo. Os valores de emissão dependem muito do tipo de matéria-prima e das condições de contorno, e não apenas da eficiência da combustão [6].

As emissões da cogeração de biogás são significativamente menores do que as dos sistemas de gás natural fóssil, porque o carbono liberado durante a combustão provém de fontes biogênicas recentes, e não de carbono armazenado geologicamente [19]. Consequentemente, as emissões de CO₂ resultantes são geralmente consideradas neutras em carbono, uma vez que fazem parte do ciclo biológico de carbono de curto prazo e não contribuem para o acúmulo atmosférico líquido [20]. Assim, o principal benefício em termos de gases de efeito estufa decorre da redução das emissões de metano associadas ao manejo de esterco e resíduos orgânicos, bem como da substituição de combustíveis fósseis na produção de calor e energia.

Esses mecanismos explicam as reduções de emissões observadas nos sistemas de cogeração de biogás, independentemente da captura de dióxido de carbono no processo de purificação do biogás.

As variáveis ótimas para uma rede de energia centralizada (DEN) incluem o seguinte:

temperatura de fornecimento do transportador de calor, taxa de fluxo e consumo e custo total de energia [21];

Capacidade de armazenamento [22];

O layout da rede de energia [23], etc.

Os algoritmos de otimização DEN incluem principalmente os métodos de evolução híbrida e programação linear inteira mista (MILP) [24], bem como algoritmos genéticos [22].

A integração de fontes de energia renováveis e a recuperação do calor residual nos sistemas de redes de aquecimento urbano (DEN) são cruciais para reduzir o impacto ambiental do setor da construção, apoiar os objetivos de sustentabilidade e diminuir a poluição ambiental. Exemplos incluem a utilização de energia hidroelétrica [25], tecnologias fotovoltaicas [26 , 27] e calor residual de fornos de coqueificação [26]. Estas soluções são também as mais benéficas e energeticamente eficientes a longo prazo.

Com base na ref. [28], os principais problemas com o DEN incluem o seguinte:

Investimento inicial significativo e custos de manutenção elevados;

A necessidade de as autoridades locais fornecerem apoio financeiro e desenvolverem um plano detalhado e uma estratégia de projeto antes da construção da rede. O principal desafio da pesquisa é a integração eficiente e harmoniosa de vários sistemas de energia e renováveis na estrutura DEN. O principal desafio da tecnologia DEN é que os mesmos tubos não podem fornecer aquecimento e resfriamento para diferentes edifícios ao mesmo tempo [29].

O estudo [28] tira conclusões que explicam as capacidades de operação e otimização de DH e Redes de Energia Centralizadas (DENs)

As redes de aquecimento e resfriamento urbano de quinta geração (5GDHC) ainda estão em desenvolvimento; no entanto, vários sistemas já estão em operação na Europa, muitos deles lançados como projetos-piloto. Esses sistemas diferem significativamente das tecnologias convencionais de aquecimento urbano. Nas redes 5GDHC, a água é fornecida a estações descentralizadas de bomba de calor geotérmica (WSHP) a temperaturas entre 0 °C e 30 °C, proporcionando diversas vantagens em relação aos sistemas tradicionais de alta temperatura.

O 5GDHC permite que as temperaturas da rede flutuem livremente e utiliza fontes de calor de baixa temperatura disponíveis localmente. As temperaturas de distribuição próximas à temperatura do solo resultam em perdas mínimas de calor, permitem a operação nos modos de aquecimento e resfriamento, independentemente da temperatura da rede, e permitem fluxos de energia bidirecionais e descentralizados.

Essas características estão em estreita consonância com o conceito de redes de aquecimento inteligentes, uma vez que o 5GDHC emprega subestações híbridas e facilita o acoplamento setorial entre eletricidade e calor dentro de um sistema de energia inteligente [30].

Com a crescente eletrificação dos transportes e de outros setores energéticos, o 5GDHC pode impulsionar ainda mais a eletrificação sustentável e eficiente do aquecimento urbano.

As principais oportunidades e desafios associados à implantação de sistemas 5GDHC na infraestrutura existente, destacando seu potencial para o desenvolvimento futuro de sistemas de aquecimento urbano de baixo carbono.

Os elevados custos de implementação dos sistemas 5GDHC podem ser reduzidos através do desenvolvimento faseado, da expansão modular da rede e da utilização mais ampla de tubagens de menor custo e de projetos padronizados de bombas de calor, o que pode reduzir os requisitos de investimento inicial e a exposição ao risco. A viabilidade económica pode ser reforçada através de incentivos específicos, incluindo subsídios de capital ou tarifas de aquecimento indexadas às emissões de carbono. A atual falta de normas técnicas pode ser atenuada através de projetos-piloto e da partilha coordenada de dados a nível municipal ou nacional, apoiando o desenvolvimento de diretrizes comuns de projeto e operação e reduzindo a incerteza para uma implementação mais ampla.

As vantagens do 5GDHC em relação aos sistemas de bomba de calor ar-ar são relativamente numerosas [29 , 31 , 32]. Estas incluem uma temperatura de fonte mais elevada no modo de aquecimento e uma temperatura de fonte mais baixa no modo de arrefecimento em comparação com o ar ambiente, o que permite um melhor desempenho sazonal do sistema. Outra vantagem dos sistemas 5GDHC é que as soluções centralizadas podem incorporar o armazenamento de calor sazonal em ambientes urbanos, onde a instalação de permutadores de calor individuais de bombas de calor geotérmicas pode ser limitada.

Além disso, a diversidade e a simultaneidade das cargas do edifício aumentam o potencial de recuperação do excesso de calor dos processos de arrefecimento para utilização no aquecimento [29]. Dado que o 5GDHC ainda é um campo emergente e relativamente pouco estudado, a experiência nesta tecnologia permanece concentrada num número limitado de empresas. Além disso, a utilização de fontes de calor locais e a introdução de subestações “ativas” descentralizadas apoiam uma mudança em relação às estruturas tradicionais monopolistas de aquecimento e arrefecimento urbano (DHC) e incentivam o desenvolvimento de novos modelos de negócio para empresas multisserviços. Atualmente, os projetistas carecem de normas e diretrizes técnicas, e há conhecimento insuficiente sobre a otimização operacional e a gestão de sistemas 5GDHC [33]. O estudo de [29] analisou 40 redes 5GDHC operacionais, a maioria das quais localizadas na Alemanha e na Suíça (75%), tornando esses países líderes na implantação dessa tecnologia.

Os principais fatores que impulsionam a adoção do 5GDHC são as intenções das autoridades locais, dos investidores em construção e das comunidades de escolher soluções sustentáveis de aquecimento e resfriamento [19 , 24].

3.2. Resultados da Otimização Econômica (Caso Meppel)

A otimização e a análise de cenários baseadas no sistema de aquecimento urbano de Meppel [17] compararam quatro conceitos: Cenário 1 — um sistema de cogeração (CHP) a biogás com caldeiras de apoio a gás natural; Cenário 2 — aquecimento urbano utilizando apenas caldeiras a gás; Cenário 3 — caldeiras a gás individuais em cada residência; e Cenário 4 — painéis solares fotovoltaicos em telhados com aquecimento de apoio a gás.

Dentre essas soluções, o Cenário 1, que utiliza biogás em cogeração, mostrou-se o mais sustentável, combinando o uso de recursos energéticos renováveis locais com a eficiência do processo de cogeração. A eficiência econômica do Cenário 1 foi avaliada utilizando os resultados de operação e utilização de recursos, que demonstraram consumo de combustível e emissões significativamente menores em comparação com as alternativas. A configuração de cogeração com biogás apresentou o menor consumo anual de combustível (6,18 TJ de biogás e 1,65 TJ de gás natural), proporcionou a maior eficiência combinada (cerca de 88%) e reduziu as emissões de CO₂ em aproximadamente 80% em comparação com o aquecimento individual convencional, indicando melhores perspectivas econômicas associadas a custos de combustível mais baixos e menor impacto na precificação do carbono.

Em contrapartida, o sistema que utiliza apenas caldeiras (Cenário 2) apresentou o pior desempenho, consumindo quase 9,8 TJ de gás natural e emitindo mais de 500 t de CO₂ por ano. O Cenário 3 (caldeiras a gás individuais) emitiu cerca de 430 t de CO₂ por ano, enquanto o Cenário 4 (energia solar fotovoltaica e gás) alcançou uma redução de 50% nas emissões, compensando a eletricidade da rede com energia solar produzida no local.

O modelo também revelou que a demanda total de calor no distrito era de cerca de 4 a 5 TJ por ano, enquanto as residências individuais necessitavam de 12 a 20 GJ por ano, dependendo do tipo de construção. As necessidades de refrigeração eram significativamente menores (cerca de 5 a 10 GJ por ano por residência) e parcialmente supridas por um sistema de armazenamento de água.

Utilizando relações matemáticas entre a produção elétrica e térmica da central de cogeração e o coeficiente de desempenho (COP) da bomba de calor (de aproximadamente 3,5 a 4), o estudo calculou que, para cada MJ de calor produzido pela bomba de calor, apenas 0,25 a 0,3 MJ de eletricidade eram necessários, melhorando assim a eficiência energética geral. A central de cogeração atingiu uma eficiência combinada de cerca de 88%, com uma relação de capacidade de aproximadamente 1,45 MJ de calor por 1 MJ de eletricidade produzida.

O modelo de otimização simplificado determinou com eficácia o tamanho ideal do sistema e as estratégias operacionais, sugerindo uma implementação gradual que começa com uma pequena unidade de cogeração e aumenta de tamanho à medida que o bairro se expande.

A metodologia equilibra com sucesso o projeto técnico, a justificativa econômica e o impacto ambiental. Apesar de simplificações como indicadores de eficiência fixos, tarifas estáticas e suposições de estado estacionário, essa abordagem mostrou-se eficaz na fase inicial de planejamento e na comparação de cenários de aquecimento urbano.

A otimização para o caso de Meppel demonstrou que a cogeração a biogás atinge o melhor equilíbrio entre eficiência e emissões quando operada continuamente com armazenamento de calor. Sistemas que utilizam cogeração a gás natural são apenas cerca de 6% mais sustentáveis do que sistemas convencionais com caldeiras a gás, enquanto o biogás melhora a sustentabilidade em mais de 30%. A inclusão de armazenamento de calor (125 L por residência a 90 °C) aumenta a estabilidade operacional e a rentabilidade.

Os resultados mostram que a integração de fontes de energia renováveis locais (biogás, painéis solares) com cogeração proporciona os maiores ganhos de sustentabilidade para sistemas energéticos urbanos como o de Meppel.

3.3. Análises da Simulação da Rede Principal (Caso da Finlândia). Os resultados do estudo demonstram a aplicabilidade e a flexibilidade da estrutura de modelagem do sistema energético Backbone para a análise de sistemas energéticos complexos e multiníveis no Norte da Europa. O modelo Backbone foi aplicado como uma ferramenta de engajamento de unidades e alocação econômica com um horizonte temporal variável, com foco na otimização da operação de ativos existentes em vez de na tomada de novas decisões de investimento.

O modelo capturou com sucesso as interações entre o sistema elétrico do Norte da Europa, a rede de aquecimento urbano finlandesa e o fornecimento regional de biomassa florestal, proporcionando uma visão integrada dos fluxos de energia, da disponibilidade de recursos e das restrições em nível de sistema.

Os resultados mostram que o sistema modelado refletiu eficazmente o caminho de descarbonização escolhido pelo setor energético nórdico, impulsionado principalmente por um aumento significativo na geração de energia eólica e solar. Os principais resultados dos cálculos do modelo para o cenário base de 2030 e sua comparação com as estatísticas de 2017 mostraram que, na Finlândia, a participação da biomassa e da energia hidrelétrica também aumentou ligeiramente, enquanto a geração de energia nuclear teve uma projeção de queda de cerca de 35%.

No setor de aquecimento urbano, o carvão e a turfa foram gradualmente substituídos por resíduos florestais, madeira de pequeno diâmetro, pellets de combustível importados, bombas de calor e gás natural.

O modelo confirmou que as bombas de calor de grande escala oferecem os menores custos marginais e servem como tecnologias de base, enquanto as caldeiras de biomassa operam praticamente o ano todo, exceto no verão. As instalações de armazenamento de energia, em particular as de armazenamento térmico, desempenham um papel importante no equilíbrio das flutuações de curto prazo na demanda e na produção.

A análise de cenários revelou uma flexibilidade significativa na adaptação às mudanças nas condições operacionais e de mercado. A integração dos sistemas locais de aquecimento urbano com os de cidades vizinhas melhorou a estabilidade do sistema e reduziu os custos operacionais gerais. Indicadores econômicos como o período de retorno do investimento e a taxa interna de retorno (TIR) demonstram que as tecnologias de aquecimento por biomassa podem ser financeiramente viáveis, especialmente se as políticas de precificação de carbono e tributação de combustíveis promoverem soluções que gerem as menores emissões possíveis.

O sistema Backbone, graças à sua estrutura modular transparente, é considerado ideal para combinar os setores de eletricidade, calor e biomassa no planejamento de longo prazo, mantendo a possibilidade de uma avaliação detalhada dos resultados de cada operação.

A simulação Backbone da transição para o aquecimento urbano na Finlândia mostra uma redução de 30% na demanda de calor para aquecimento urbano até 2040 devido a ganhos de eficiência; à substituição de carvão e turfa por resíduos de biomassa, bombas de calor e apoio a gás; ao declínio gradual da geração nuclear compensado pelo aumento da energia eólica e solar; e à usina de cogeração alcançando maiores reduções de emissões no nível geral do sistema.

A integração de biomassa e biogás no aquecimento urbano leva a reduções significativas nas emissões de carbono sem comprometer a segurança do abastecimento.

Em Helsínquia, bombas de calor de grande escala (60 MW) e sistemas de armazenamento (11 GWh) melhoram ainda mais a flexibilidade e o potencial de redução de emissões.

4. Discussão/Conclusões

Este estudo integrado demonstra que o biogás e o biometano podem ser uma parte importante da descarbonização do aquecimento urbano na Europa. A estrutura de otimização desenvolvida por Leeuwen fornece evidências de que sistemas integrados localmente podem alcançar um desempenho sólido em termos de custos e emissões, enquanto o modelo Backbone destaca a escalabilidade a longo prazo dos recursos de bioenergia e suas interações dentro dos sistemas energéticos regionais.

A análise comparativa indica que ambos os casos demonstram o potencial do biogás no aquecimento urbano para apoiar a transição energética, particularmente através da integração direta da produção de energia renovável com as redes de aquecimento.

O modelo Backbone enfatiza a importância da incorporação de recursos de bioenergia em sistemas energéticos multissetoriais de grande escala, otimizando a alocação de recursos e mantendo a confiabilidade operacional. Além disso, demonstra que o aquecimento urbano pode funcionar como um mecanismo de balanceamento, especialmente quando combinado com bioenergia, armazenamento de energia e geração variável de eletricidade renovável.

O caso de Meppel oferece uma visão sobre configurações de sistemas híbridos nos quais unidades de cogeração de biogás operam em conjunto com bombas de calor e armazenamento térmico. Essa abordagem aprimora a autossuficiência energética local, apoia a gestão flexível da demanda e oferece um modelo prático para comunidades de pequeno e médio porte que pode ser replicado em contextos semelhantes.

Entre as tendências tecnológicas identificadas, destaca-se o uso crescente de ferramentas de otimização digital, como os modelos de programação linear inteira mista, ilustrados pela estrutura Backbone. Paralelamente, o desenvolvimento de sistemas energéticos híbridos que combinam bioenergia e bombas de calor vem ganhando destaque como uma abordagem promissora para alcançar sistemas energéticos eficientes e resilientes.

As principais conclusões são que a cogeração baseada em biogás e o biometano purificado fornecem calor e energia renováveis e despacháveis, compatíveis com a infraestrutura existente, proporcionam reduções substanciais de GEE (>70%) em comparação com os sistemas fósseis e permanecem competitivos em um contexto de precificação de carbono favorável e políticas estáveis (por exemplo, a meta RED III de 35 bilhões de metros cúbicos de biometano até 2030). Simulações nacionais do modelo Backbone confirmam fortes sinergias entre biogás, biomassa e tecnologias de aquecimento eletrificado.

Os resultados deste estudo são consistentes com outras pesquisas que mostram que a integração de biogás e biometano pode melhorar o desempenho de emissões e a flexibilidade do sistema em aplicações de aquecimento urbano.

Trabalhos anteriores confirmam os benefícios ambientais da digestão anaeróbica e da valorização de resíduos [3]. Estudos sobre transições no aquecimento municipal indicam que a combinação do aquecimento urbano com fontes individuais de calor renovável pode ser necessária para atingir as metas de neutralidade de carbono [4], enquanto pesquisas sobre redes de aquecimento integradas demonstram que o aumento da flexibilidade operacional permite uma maior participação de energia renovável e custos de sistema mais baixos [10]. Em conjunto, essas comparações reforçam a conclusão do presente estudo de que a cogeração baseada em biogás e a integração de biometano oferecem um caminho confiável para sistemas de aquecimento urbano resilientes e de baixo carbono.

A pesquisa atual frequentemente se baseia em dados de desempenho modelados em vez de medidos e dá pouca atenção aos fatores sociais que influenciam a aceitação local de fontes de energia específicas. Outras limitações incluem a disponibilidade desigual de dados e os desafios na comparação de resultados entre estudos, que frequentemente diferem em escopo temporal, contexto geográfico e condições do sistema energético nacional.

Os dados de instalações de produção reais sobre a eficiência da cogeração sob condições de carga variável ainda são limitados.

Outras lacunas empíricas incluem o uso de energia no aprimoramento do biogás, as taxas de vazamento de biometano, as perdas de calor e o comportamento dinâmico da temperatura em redes de aquecimento urbano.

Esses parâmetros são frequentemente modelados em vez de medidos, reduzindo a confiabilidade dos resultados e restringindo a comparabilidade entre estudos. Uma estrutura de avaliação mais unificada poderia ser estabelecida por meio de limites de relatório padronizados, premissas de ciclo de vida harmonizadas e indicadores técnico-econômicos consistentes, como índices de eficiência, margens de entrada-saída de combustível e fatores de emissão.

Tal padronização permitiria uma comparação mais precisa entre os conceitos de aquecimento urbano e melhoraria a consistência e a interpretabilidade dos resultados da modelagem a longo prazo.

Trabalhos futuros poderão incorporar preços dinâmicos, tecnologias de captura e utilização de carbono biogênico e uma maior integração multissetorial para otimizar ainda mais os sistemas de aquecimento urbano renovável.

Também poderão incluir avaliações harmonizadas do ciclo de vida em diferentes escalas de sistema, modelagem de desempenho dinâmico aprimorada que reflita a disponibilidade variável de recursos renováveis e avaliações de longo prazo das trajetórias de investimento em infraestrutura.

Contribuições dos autores

Conceitualização: LR e DB; Metodologia: AA e DB; Validação: DB; Análise formal: KB; Recursos: KB e DB; Curadoria de dados: DB; Redação – rascunho original: AA; Redação – revisão e edição: AA, LR e CR; Visualização: AA; Supervisão: LR, CR e DB. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Declaração de Disponibilidade de Dados

As contribuições originais apresentadas neste estudo estão incluídas no artigo. Para mais informações, entre em contato com os autores correspondentes.

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- IEA (Agência Internacional de Energia). Seção Especial: Biogás e Biometano. Disponível online: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/special-section-biogas-and-biomethane> (acessado em 17 de outubro de 2025).
- Kabeyi, MJB; Olanrewaju, OA Produção e aplicações de biogás na transição energética sustentável. J. Energy 2022 , 2022 , 8750221. [Google Scholar]
- Mignogna, D.; Ceci, P.; Cafaro, C.; Corazzi, G.; Avino, P. Produção de biogás e biometano como fontes de energia renováveis: uma revisão. Appl. Sci. 2023 , 13 , 10219. [Google Scholar] [CrossRef]
- Balode, L.; Zlaugotne, B.; Gravelins, A.; Svedovs, O.; Pakere, I.; Kirsanovs, V.; Blumberga, D. Neutralidade de carbono em municípios: equilibrando soluções de energia renovável para aquecimento individual e urbano. Sustainability 2023 , 15 , 8415. [Google Scholar] [CrossRef]
- EBA (Associação Europeia de Biogás). Relatório Estatístico 2023: Acompanhamento da Implantação de Biogás e Biometano na Europa ; EBA: Bruxelas, Bélgica, 2023.
- Thrän, D.; Deprie, K.; Dotzauer, M.; Kornatz, P.; Nelles, M.; Radtke, KS; Schindler, H. A contribuição potencial do biogás para a segurança do abastecimento de gás na Alemanha. Energy Sustain. Soc. 2023 , 13 , 12. [Google Scholar] [CrossRef]
- Associação Europeia de Biogás. Capacidade europeia de biometano atinge 7 bilhões de metros cúbicos — É necessário um apoio político mais robusto para sustentar o ritmo. Disponível online: <https://www.europeanbiogas.eu/news/european-biomethane-capacity-hits-7-bcm-stronger-policy-support-needed-to-sustain-momentum/> (acessado em 17 de outubro de 2025).
- Comissão Europeia. Comissão aprova regime de auxílio estatal francês de 1,5 mil milhões de euros para apoiar a produção sustentável de biometano e impulsionar a transição para uma economia neutra

em carbono. Julho de 2024. Disponível online: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_3986 (consultado em 22 de dezembro de 2025).

Parceria Industrial do Biometano. Relatório Europeu de Benchmarking de Preços do Biometano — Análises sobre o Custo Atual da Produção de Biometano a partir de Dados Reais da Indústria. Disponível online: https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2023/10/BIP_TF4-study_Full-slidedeck_Oct2023.pdf (acessado em 17 de outubro de 2025).

Schwarz, MB; Veyron, M.; Clausse, M. Impacto da implementação da flexibilidade no controle de um sistema de aquecimento solar urbano. *Solar* 2023 , 4 , 1–14. [Google Scholar] [CrossRef]

Puyt, RW; Lie, FB; Wilderom, CPM. As origens da análise SWOT. *Long Range Plann.* 2023 , 56 , 102304. [Google Scholar] [CrossRef]

Wu, J.; Zhao, N.; Yang, T. Sabedoria das multidões: análise SWOT baseada em métodos híbridos de mineração de texto usando avaliações online. *J. Bus. Res.* 2023 , 171 , 114378. [Google Scholar] [CrossRef]

Xi, Y.; Zhang, Z.; Zhang, J. Estratégia de otimização multiobjetivo para sistemas multienergéticos regionais integrados com tecnologia solar térmica de média a alta temperatura. *Energy* 2024 , 300 , 131545. [Google Scholar] [CrossRef]

Chen, W.; Ren, H.; Zhou, W. Revisão da otimização multiobjetivo em modelos de sistemas de energia de longo prazo. *Glob. Energy Interconnect.* 2023 , 6 , 645–660. [Google Scholar] [CrossRef]

Egieya, JM; Čuček, L.; Zirngast, K.; Isafiade, AJ; Kravanja, Z. Otimização de redes de fornecimento de biogás considerando múltiplos objetivos e preços de leilão de eletricidade. *BMC Chem. Eng.* 2020 , 2 , 3. [Google Scholar] [CrossRef]

Friebe, M.; Karasu, A.; Kriegel, M. Metodologia para comparar e otimizar o aquecimento urbano e o fornecimento de calor descentralizado para transformação de energia em nível municipal. *Energy* 2023 , 282 , 128987. [Google Scholar] [CrossRef]

van Leeuwen, RP; Fink, J.; de Wit, JB; Smit, GJM. Ampliação de um sistema de aquecimento urbano baseado em cogeração de biogás e bombas de calor. *Energy Sustain. Soc.* 2015 , 5 , 16. [Google Scholar] [CrossRef]

Lindroos, TJ; Mäki, E.; Koponen, K.; Hannula, I.; Kiviluoma, J.; Raitila, J. Substituição de combustíveis fósseis por bioenergia no aquecimento urbano — Comparação de opções tecnológicas. *Energy* 2021 , 231 , 1207990. [Google Scholar] [CrossRef]

Christianides, D.; Bagaki, DA; Timmers, RA; Zrimec, MB; Theodoropoulou, A.; Angelidaki, I.; Kougias, P.; Zampieri, G.; Kamergi, N.; Napoli, A.; et al. Emissões biogênicas de CO₂ no setor de biocombustíveis e bioenergia da UE: mapeamento de fontes, tendências regionais e caminhos para captura e utilização. *Energies* 2025 , 18 , 1345. [Google Scholar] [CrossRef]

Hawrot-Paw, M.; Tapczewski, J. Conversão de resíduos em energia: codigestão anaeróbica de biomassa de microalgas e resíduos de panificação. *Energies* 2025 , 18 , 5516. [Google Scholar] [CrossRef]

Pirouti, M.; Bagdanavicius, A.; Ekanayake, J.; Wu, J.; Jenkins, N. Consumo de energia e análises econômicas de uma rede de aquecimento urbano. *Energy* 2013 , 57 , 149–159. [Google Scholar] [CrossRef]

Fang, T.; Lahdelma, R. Otimização genética da produção de calor em múltiplas usinas em redes de aquecimento urbano. *Appl. Energy* 2015 , 159 , 610–619. [Google Scholar] [CrossRef]

Morvaj, B.; Evins, R.; Carmeliet, J. Otimizando sistemas de energia urbana: dimensionamento simultâneo do sistema, operação e projeto da rede de aquecimento urbano. *Energy* 2016 , 116 , 619–636. [Google Scholar] [CrossRef]

Vesterlund, M.; Toffolo, A.; Dahl, J. Otimização de rede complexa de aquecimento urbano com múltiplas fontes: um estudo de caso. *Energy* 2017 , 126 , 53–63. [Google Scholar] [CrossRef]

Kuriqi, A.; Pinheiro, AN; Sordo-Ward, A.; Garrote, L. Aspectos do regime de vazão na determinação de vazões ambientais e maximização da produção de energia em usinas hidrelétricas a fio d'água. *Appl. Energy* 2019 , 256 , 113980. [Google Scholar] [CrossRef]

Novosel, T.; Feijoo, F.; Duić, N.; Domac, J. Impacto do aquecimento e resfriamento urbano no potencial de integração de fontes de energia renováveis variáveis em climas amenos e mediterrâneos. *Energy Convers. Manag.* 2022 , 272 , 116374. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, Y.; Zhang, S.; Chow, D.; Kuckelkorn, JM. Avaliação e otimização do desempenho da rede de energia distrital: presente e futuro. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021 , 139 , 110577. [Google Scholar] [CrossRef]

Buffa, S.; Cozzini, M.; D'Antoni, M.; Baratieri, M.; Fedrizzi, R. Sistemas de aquecimento e resfriamento urbano de 5ª geração: uma revisão de casos existentes na Europa. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019 , 104 , 504–522. [Google Scholar] [CrossRef]

Lund, H.; Duic, N.; Østergaard, PA; Mathiesen, BV. Sistemas e tecnologias de aquecimento urbano do futuro: sobre o papel dos sistemas de energia inteligentes e do aquecimento urbano de 4ª geração. *Energy* 2018 , 165 , 614–619. [Google Scholar] [CrossRef]

Boesten, S.; Ivens, W.; Dekker, SC; Eijdens, H. Sistemas de aquecimento e resfriamento urbano de 5ª geração como solução para o fornecimento de energia térmica urbana renovável. *Adv. Geosci.* 2019 , 49 , 129–136. [Google Scholar] [CrossRef]

Menegazzo, D.; Lombardo, G.; Bobbo, S.; De Carli, M.; Fedele, L. Estado da arte, perspectivas e obstáculos da tecnologia de bombas de calor geotérmicas no setor da construção europeu: uma revisão. *Energies* 2022 , 15 , 2685. [Google Scholar] [CrossRef]

Bünning, F.; Wetter, M.; Fuchs, M.; Müller, D. Sistemas bidirecionais de energia distrital de baixa temperatura com controle baseado em agentes: comparação de desempenho e otimização de operação. Appl. Energy 2018 , 209 , 502–515. [Google Scholar] [CrossRef]

Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais, e não dos editores. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.





Biogás à base de resíduos animais — rumo ao fechamento do ciclo nos países da UE

Biogás à base de resíduos animais — rumo ao fechamento do ciclo nos países da UE

Dorota Janiszewska * e Luiza Ossowska

Departamento de Economia, Universidade Tecnológica de Koszalin, 75-343 Koszalin, Polônia

- Autor a quem a correspondência deve ser dirigida.

Resumo

A produção e utilização de biogás podem desempenhar um papel fundamental na transição para uma economia circular e de baixas emissões. Os resíduos animais constituem um substrato local disponível para usinas de biogás, embora sejam utilizados com menos frequência do que os resíduos vegetais. Portanto, o principal objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial da biomassa animal e a possibilidade de produção de biogás a partir dela para atender às necessidades energéticas dos países da UE. O potencial foi estimado para os 27 Estados-Membros da União Europeia. Os dados são do Serviço de Estatística da União Europeia, referentes a 2024. Os volumes de biomassa e o potencial de produção de biogás foram estimados utilizando fórmulas disponíveis na literatura.

As análises indicam que os países da União Europeia possuem um potencial significativo para a produção de biogás a partir da biomassa existente proveniente de resíduos animais. Mesmo em países com produção atual relativamente alta, existe um potencial significativo para a produção e utilização de maiores quantidades de biogás. Para atingir as metas climáticas, além de grandes investimentos, as microusinas de biogás estão ganhando importância. Pequenas instalações podem representar uma solução para países com produção animal bastante reduzida e dispersa. A utilização em larga escala do potencial da biomassa proveniente de resíduos animais requer apoio institucional, bem como a disseminação do conhecimento entre os diversos grupos de interesse.

Palavras-chave: biomassa animal ; fertilizantes naturais ; biogás ; biometano ; países da UE ; economia circular

1. Introdução

As políticas climáticas atuais, bem como os desafios associados à crise energética, tornam necessária a busca por fontes alternativas de energia [1 , 2]. Em resposta à crescente demanda por energia sustentável e ao impacto ambiental dos combustíveis fósseis, fontes renováveis como a biomassa tornaram-se cruciais. Esta pode ser uma das principais direções da gestão energética em regiões ricas em resíduos agrícolas e pecuários [3]. Atualmente, a agricultura tem um impacto significativo no meio ambiente, que vai desde as emissões de gases de efeito estufa (GEE), passando pela poluição do ar e da água, até a perda de biodiversidade [4 , 5].

O aumento do número de animais contribui para a renda dos produtores, mas tem impactos negativos no meio ambiente [6 , 7].

O aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da agricultura pode exacerbar as mudanças climáticas, resultando em eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes (secas, inundações, tempestades), que impactam negativamente a produção agrícola [8].

Isso também é confirmado pela pesquisa de Ma et al. [9], que indica que o consumo de energia e a produção pecuária correlacionam-se positivamente com as emissões de GEE e revela uma relação bidirecional entre as mudanças climáticas e as emissões do solo.

Essas conclusões apontam para a importância da adoção de práticas agrícolas sustentáveis para reduzir as emissões. Portanto, por razões ambientais (a necessidade de reduzir as emissões de GEE) e razões econômicas (melhorar a sustentabilidade do fornecimento de energia), a digestão anaeróbica, que produz biogás, está ganhando cada vez mais atenção. O biogás é uma fonte versátil de energia renovável, pois pode ser usado para gerar calor, eletricidade e como combustível para veículos [10 , 11].

As principais vantagens do biogás incluem a produção de energia renovável, a redução de resíduos, a redução de patógenos, a conversão de resíduos contendo matéria orgânica em fertilizantes de alta qualidade, a proteção da vegetação, do solo e da água, e o aumento da produtividade na pecuária e na agricultura [12].

Além disso, a produção e o uso de biogás por meio da digestão anaeróbica podem desempenhar um papel fundamental na resolução de questões prementes de desenvolvimento sustentável, incluindo a produção de energia renovável, a gestão de resíduos, a mitigação das mudanças climáticas e a agricultura sustentável [13]. O desenvolvimento e a ampla adoção da tecnologia de biogás são parte integrante da transição para uma economia circular e de baixas emissões. O uso do biogás pode fechar o ciclo, reduzindo os resíduos [14 , 15]. De acordo com Honharuch, a produção e o uso de biogás são componentes de quase todas as áreas da economia verde e contribuem significativamente para a construção de uma economia neutra em carbono [16]. Além disso, o aumento do uso de gases de efeito estufa renováveis é atualmente apresentado como um elemento crítico e eficaz da estratégia de descarbonização de longo prazo da UE [17]. Isto é particularmente importante no contexto da procura da UE pela neutralidade climática [18] e pela independência energética [19]. Estas ações fazem também parte dos esforços da UE para fechar o ciclo [20].

Considerando os desafios e benefícios do uso do biogás, é importante destacar que os fatores que determinam o nível de desenvolvimento do mercado de gás renovável incluem a disponibilidade de matérias-primas, a estrutura geográfica e a estrutura econômica do país. Portanto, devido à importância promissora do uso de recursos de biogás reconhecidos como sustentáveis, desafios como a disponibilidade de matérias-primas para sua produção devem ser abordados [21].

No contexto do potencial da biomassa, pesquisadores apontam para a necessidade de despertar o interesse de empresas e investidores em pesquisas, bem como para a necessidade de mais estudos [6], incluindo o desenvolvimento de modelos econômicos sustentáveis que integrem tecnologia, mercado de energia e reciclagem [22]. Ressalta-se a necessidade de conduzir análises mais abrangentes sobre a diversidade de matérias-primas utilizadas na produção de biogás e seu impacto na composição e eficiência do digestato [1]. Pesquisadores também apontam para o problema do uso insuficiente de substratos disponíveis para a produção de biogás, especialmente considerando a grande quantidade de esterco animal e resíduos agrícolas [23 , 24]. Em relação aos países da União Europeia, é importante comparar os métodos de gestão e a eficiência da utilização deste tipo de resíduos em diferentes economias [25].

Para preencher parcialmente essa lacuna de pesquisa, o principal objetivo foi avaliar o potencial da biomassa animal e a possibilidade de produzir biogás a partir dela para atender às necessidades energéticas dos países da UE. Em relação a esse objetivo, as seguintes questões de pesquisa foram abordadas:

RQ1: Qual a quantidade de biomassa proveniente da produção animal disponível nos Estados-Membros da UE?

RQ2: Qual a quantidade de biogás que pode ser produzida a partir da biomassa identificada proveniente da produção animal em cada Estado-Membro da UE?

RQ3: Que parcela das necessidades energéticas pode ser suprida pelo biometano produzido em cada Estado-Membro da UE?

O artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 contém referências à biomassa animal e sua importância na economia circular. A Seção 3 apresenta o contexto da pesquisa relacionado à situação da União Europeia. A Seção 4 descreve a metodologia de pesquisa utilizada. A Seção 5 apresenta os resultados da pesquisa realizada. A Seção 6 discute os resultados. A Seção 7 apresenta as conclusões.

2. Biomassa animal na economia circular

Os resíduos agrícolas, incluindo os resíduos animais, constituem um excelente substrato para a produção de energia limpa e sustentável no contexto de uma bioeconomia circular [1]. A transição da economia linear para uma economia circular é crucial para redirecionar o valor dos recursos perdidos para produtos economicamente viáveis e desenvolver um sistema sustentável [26]. Uma economia circular baseia-se no conceito de zero resíduos, em que os recursos não só são transformados em produtos de valor acrescentado, como também os resíduos gerados durante o processo são utilizados de forma sustentável. A digestão anaeróbia é uma etapa que integra o sistema em cascata dos resíduos agrícolas, produzindo simultaneamente um vetor energético renovável (biogás) com o digestato. Isto cria um ciclo fechado. Os resíduos agrícolas são transformados em produtos de valor acrescentado, que são depois utilizados para produzir novos produtos e subprodutos, maximizando assim os benefícios energéticos, económicos e ambientais [27].

Portanto, uma economia circular procura minimizar os resíduos através da utilização de matérias-primas aparentemente inúteis. A biogaseificação, por outro lado, permite recuperar energia a partir de resíduos.

No entanto, para que a biogaseificação esteja alinhada com os objetivos da economia circular, ela deve ser de natureza local, o que significa que deve utilizar substratos derivados da produção agrícola local [28].

A agricultura tem potencial para produzir estrume, que é tradicionalmente utilizado como fertilizante na produção agrícola [29]. No entanto, o uso inadequado do estrume pode representar um problema em termos de poluição ambiental [30]. Portanto, as usinas de produção de biogás podem contribuir para a segurança ambiental, utilizando subprodutos agrícolas e, simultaneamente, reduzindo os odores associados à produção agrícola. Além disso, o biogás oferece o maior potencial de cooperação com as autoridades locais e a sociedade dentre todas as fontes renováveis. Ademais, o setor de biogás pode desempenhar um papel estratégico no aumento da resiliência dos sistemas energéticos em contextos de mudanças repentinas, como a situação atual, especialmente em países com escassez de recursos de combustíveis fósseis [31]. O uso de estrume agrícola para a produção de biogás pode trazer muitos benefícios ambientais, principalmente em termos de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente metano, e de odores no caso do armazenamento de estrume [6 , 30 , 32].

O uso de estrume animal também pode trazer benefícios econômicos, incluindo renda proveniente da produção de energia e fertilizantes orgânicos [7 , 33] ou redução dos custos de produção de biocombustíveis [34]. Na dimensão socioeconômica, inclui também o desenvolvimento das zonas rurais e a criação de novos empregos [32 , 35].

Deve-se enfatizar que a biomassa produzida na agricultura deve ser utilizada de forma sustentável, sem impactar negativamente outras atividades agrícolas [36]. Na prática, isso significa que os fins energéticos não podem competir com a produção de alimentos, que é a função primordial da agricultura. Subprodutos não utilizados para fins alimentares podem ser usados para a produção de energia [37].

No caso de fertilizantes naturais, isso tem significado, até o momento, seu uso na produção vegetal antes do uso energético [38]. No entanto, pesquisas recentes mostram que o digestato da digestão anaeróbia (um subproduto do biogás) pode ser tratado como aditivo de solo e fertilizante na produção vegetal, substituindo fertilizantes sintéticos [1 , 39].

Recentemente, o digestato ganhou importância devido ao aumento dos preços dos fertilizantes minerais, bem como às dificuldades com sua disponibilidade e aquisição. Além disso, os inúmeros benefícios do uso do digestato estão sendo cada vez mais reconhecidos, especialmente por estarem ligados à promoção do desenvolvimento sustentável e da economia circular [40].

Conforme indicado por Weiland [10] e Arthurson [41], o digestato resultante é um fertilizante valioso devido ao aumento da disponibilidade de nitrogênio e à melhor eficiência de fertilização a curto prazo. Além disso, o processo de digestão anaeróbia minimiza a sobrevivência de patógenos, o que é importante para o uso do digestato como fertilizante. Adicionalmente, o uso do digestato como fertilizante orgânico fecha os ciclos de carbono e nutrientes e pode reduzir a dependência de fertilizantes inorgânicos [42].

O uso da massa pós-fermentação também influencia as propriedades dos solos fertilizados, aumentando a capacidade do solo de reter nutrientes e água [43], ativando processos microbiológicos [44], melhorando a estrutura do solo [45 , 46] e a atividade enzimática do solo [47]; aumentando o teor de carbono orgânico [48] e de substâncias húmicas no solo, melhorando sua fertilidade [49]. Além disso, durante a produção de biogás, a massa pós-fermentação é rica em nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio), que podem ser devolvidos ao solo e fornecer nutrientes para as culturas [1]. Uma revisão da literatura realizada por Szymańska [50] indica que o uso de fertilizantes na forma de produtos pós-fermentação resulta em aumento da produtividade das plantas. No entanto, essa fertilização requer doses balanceadas [51].

Além disso, como enfatizam Pilarski et al. [14], o uso de fertilizantes naturais como substrato para a produção de biogás contribui para uma transição mais rápida para uma economia circular e de baixas emissões. Bentivoglio et al. [15] também concordam, apontando que o aproveitamento de resíduos do setor agroalimentar tem enorme potencial para facilitar a transformação em

consonância com os princípios da economia circular. A produção de biogás é uma estratégia ambientalmente amigável que permite a recuperação eficaz de grandes quantidades de resíduos e subprodutos para a produção de energia renovável. Ademais, em vista da crescente demanda por biocombustíveis verdes, o biogás pode ser convertido em biometano, possibilitando a implementação de uma economia totalmente circular.

3. A situação na União Europeia

Na União Europeia, a promoção de energia proveniente de fontes renováveis tem sido uma prioridade desde a década de 1990 [1]. O pacote mais recente da UE, de 2021, Fit for 55, estabelece a ambiciosa meta de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 55% até 2030, bem como de colocar a UE no caminho da neutralidade climática até 2050. O pacote pressupõe que a quota de energia renovável atingirá 45% até 2030. No que diz respeito às emissões de gases com efeito de estufa, também aborda setores não abrangidos pelo Sistema de Comércio de Emissões da UE (EU ETS), incluindo a agricultura. Pressupõe um aumento na redução das emissões de gases com efeito de estufa de 29% para 40% até 2030, em comparação com 2005 [18]. A redução das emissões de gases com efeito de estufa aplica-se também ao setor dos transportes, onde se prevê uma redução de 13% nas emissões através do aumento da quota de combustíveis renováveis. Além disso, o pacote Fit for 55 prevê uma redução de 30% no consumo de gás até 2030, sendo que um terço dessa economia resultará do cumprimento da meta de eficiência energética da UE [19].

De acordo com as premissas adotadas, a participação de biocombustíveis avançados e biogás deverá aumentar para pelo menos 2,2% até 2030 [52]. Ademais, em 2022, devido à crise energética resultante da agressão da Rússia contra a Ucrânia, a UE intensificou seus esforços para melhorar a segurança energética e reduzir a dependência das importações de combustíveis fósseis com o lançamento do programa REPowerEU. Este programa prevê um aumento na produção sustentável de biometano para 35 milhões de m³ até 2030. Durante esse período, estão previstos investimentos de 37 bilhões de euros em atividades relacionadas ao aumento da produção de biogás e à promoção de sua conversão em biometano [18].

Foi dada especial ênfase à produção sustentável, garantindo a produção de biometano a partir de resíduos orgânicos e resíduos florestais e agrícolas, a fim de evitar impactos no uso da terra e na segurança alimentar.

O biogás é uma fonte de energia renovável de suma importância para o desenvolvimento em muitos países devido ao acesso abundante à biomassa. Portanto, um uso mais amplo do biogás poderia atender às metas de energia renovável sustentável [53]. A União Europeia é uma produtora significativa de biogás e, de acordo com previsões de pesquisa, espera-se que sua produção global aumente 2,7% até 2026. A geração de eletricidade a partir de biogás deverá aumentar na maioria dos países da UE até essa data [30]. Atualmente, esse setor fornece à Europa 18,4 bilhões de metros cúbicos de gás renovável (biogás, biometano). No entanto, há uma tendência de a produção de biometano se desenvolver mais rapidamente do que a de biogás.

Prevê-se que, até 2050, ela poderá suprir até 167 bilhões de metros cúbicos, cobrindo de 35% a 62% da demanda de gás [16]. O relatório da Comissão Europeia sobre a sustentabilidade da bioenergia na UE mostra que a principal fonte de energia renovável é a bioenergia produzida a partir de matérias-primas agrícolas e florestais e resíduos orgânicos. A quota deste tipo de energia é de 59% (148 Mtoe) de todo o consumo de energia renovável na UE. A maior parte da bioenergia é detida pelos biocombustíveis sólidos primários (70,3%). Os biocombustíveis líquidos representam 12,9%, o biogás/biometano 10,1% e a quota de resíduos urbanos que constituem uma fonte de energia renovável é de 6,6% [54].

Na União Europeia, o biogás é produzido principalmente a partir de culturas agrícolas, mas também de estrume animal e resíduos sólidos urbanos [30]. Na Europa, aproximadamente 70% das centrais de biogás utilizam matérias-primas do setor agrícola [53]. De acordo com o relatório da EurObserv'ER, foram produzidos 15.763,3 ktoe de energia a partir de biogás em 2022. A maior parte da energia nos países da UE foi gerada a partir de “outros” tipos de biogás, que incluem o biogás agrícola resultante da decomposição de matérias-primas agrícolas, o biogás de utilização agrícola e o gás de aterro derivado da fração biodegradável limitada dos resíduos urbanos. A energia gerada a partir desta categoria ascendeu a 13.287,5 ktoe, representando 84,3% da produção total. As maiores quantidades deste tipo de biogás foram produzidas na Alemanha, Itália e França. Dinamarca, República Checa e Países Baixos também merecem menção.

Pequenas quantidades deste tipo de biogás foram produzidas em Chipre, Malta, Portugal e Estónia. A produção também foi pequena em outros países (Figura 1) [55].

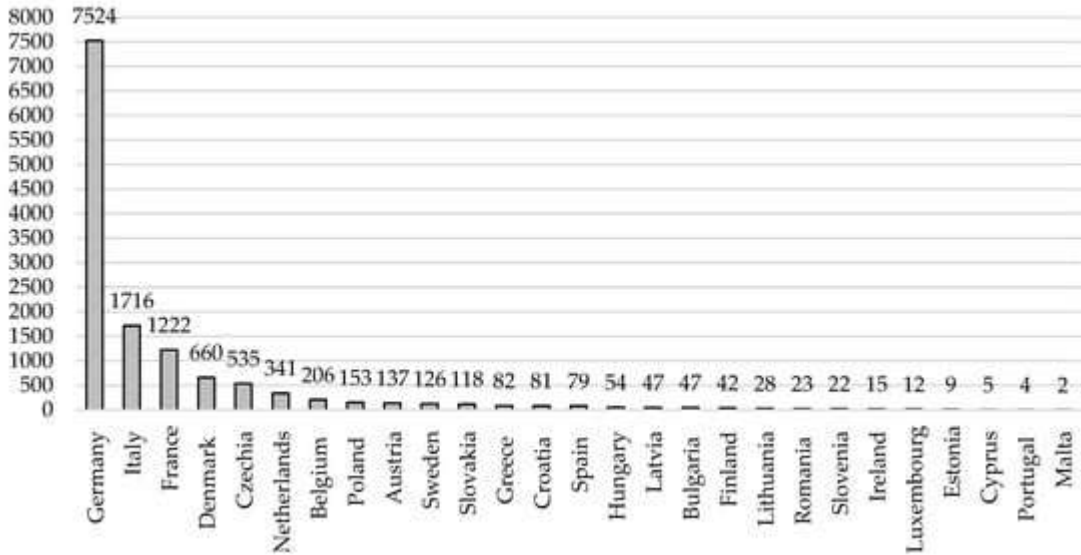


Figura 1. Produção primária de outros biogases provenientes da fermentação anaeróbica nos países da União Europeia em 2022 (em ktoe).

Embora a maioria das usinas de biogás em todo o mundo esteja localizada na União Europeia, o potencial dos fluxos de resíduos existentes é insuficientemente utilizado no atual cenário industrial [56]. Os fatores que determinam o nível de desenvolvimento do mercado de gás renovável incluem a disponibilidade de matérias-primas e a estrutura geográfica e econômica do país [17]. Portanto, as transformações no setor energético da UE são espacialmente diversificadas, tanto em termos de escopo quanto de ritmo de mudança [57]. As usinas de biogás agrícolas na Europa Ocidental foram projetadas principalmente para substratos derivados das culturas-alvo.

Atualmente, o melhor substrato para usinas de biogás está disponível localmente na fazenda e não envolve custos adicionais de transporte [35]. Portanto, o setor agrícola desempenha um papel fundamental e continuará a ganhar importância na produção de biogás, visto que grande parte do potencial reside em substratos agrícolas, incluindo resíduos animais [58].

As possibilidades de utilização de resíduos animais da agricultura para a produção de biogás são influenciadas pela estrutura da agricultura e pelas políticas de apoio em cada país.

De acordo com o Censo Agropecuário, a área média das explorações agrícolas na UE é de 17,4 hectares (apenas 18% das explorações têm essa dimensão ou mais). Quase dois terços das explorações agrícolas na UE têm menos de 5 hectares.

As pequenas explorações agrícolas combinam frequentemente diferentes culturas e criações de animais, apresentam diferentes tipos de propriedade da terra e condições topográficas diversas e limitadas. Além disso, as pequenas explorações agrícolas situam-se na extremidade inferior da escala da agricultura comercial, produzindo principalmente para subsistência. A fragmentação agrária é particularmente visível nos países da Europa Central e Oriental (Roménia, Hungria, Bulgária, Polónia) e nos países mediterrânicos (Mata, Chipre, Grécia, Portugal, Croácia, Espanha, Itália).

É importante salientar que a maioria das explorações agrícolas nos países da UE são explorações familiares, principalmente de pequena e média dimensão.

As explorações agrícolas de maior dimensão (50 hectares ou mais) são típicas dos países da Europa Ocidental (Luxemburgo, França, Alemanha) e dos países escandinavos (Finlândia, Dinamarca). As grandes explorações agrícolas estão orientadas para a produção de mercado e têm, mais frequentemente, uma forma jurídica específica ou são cooperativas [59 , 60].

A produção pecuária desempenha um papel importante no setor agrícola da UE, mas existem diferenças significativas entre os países. Em geral, nos países mediterrâneos, assim como na Finlândia, o tipo de exploração agrícola dominante é a produção de culturas especializadas. No entanto, na Europa Ocidental, a pecuária especializada é a atividade predominante. Noutras regiões, a produção agrícola é mista. O elevado grau de especialização na criação de animais ocorre principalmente nas regiões costeiras do Atlântico e nas regiões montanhosas do norte.

No que diz respeito aos bovinos, a criação concentra-se principalmente nos países da Europa Ocidental, caracterizados por um clima moderado e uma pluviosidade relativamente elevada. Estas condições favorecem a pecuária em pastagens, tanto para gado leiteiro como para gado de corte. As maiores populações de bovinos encontram-se na Irlanda e no noroeste de França. Também é característica a área que abrange o noroeste de Espanha, o centro de França, as regiões alpinas do sul da Alemanha e o norte de Itália. Além disso, o norte da Alemanha e algumas regiões da Polónia estão entre as regiões de criação de bovinos mais intensiva. A suinocultura na UE ocorre principalmente em regiões caracterizadas pela produção pecuária intensiva.

Esta produção realiza-se, em grande parte, em explorações comerciais de grande escala. A suinocultura intensiva é típica do norte de Espanha, bem como de uma área que abrange a Dinamarca, o norte da Alemanha e os Países Baixos. A criação de suínos também se concentra no noroeste da França e no norte da Itália. Já a criação de aves se concentra principalmente na França, Polónia e Espanha. Outros países incluem Alemanha, Itália e Holanda [59 , 61].

O apoio ao investimento na produção de biogás está incluído na Política Agrícola Comum. No entanto, os países da UE estão a implementar diferentes estratégias de apoio ao desenvolvimento do setor do biogás, incluindo o biometano. A maioria dos países centra-se na transformação do biogás em biometano e na sua injeção na rede de gás. A Dinamarca pretende aumentar a quota de biometano na sua rede de gás para 100% até 2030. Alguns países concentram-se no apoio à oferta. Isto inclui o estabelecimento de tarifas e prémios de incentivo, bem como subsídios ao investimento.

Estas formas de apoio são características principalmente dos países da Europa Ocidental e da Escandinávia. Contudo, um número crescente de países procura promover incentivos do lado da procura, particularmente através de quotas e da organização do mercado. Os países da Europa Central e Oriental têm metas mais flexíveis, mas mostram-se otimistas em relação ao desenvolvimento do biogás. Alguns destes países, como a Polónia, procuram aumentar a produção de biogás através da redução dos requisitos de licenciamento e da introdução de vários regimes de apoio, incluindo apoio financeiro.

Em alguns países, como a Roménia, o apoio ao desenvolvimento de centrais de biogás é limitado [62 , 63].

4. Materiais e Métodos

O biogás é uma mistura de gases produzida pela decomposição de substâncias orgânicas em condições anaeróbicas, constituída principalmente por metano, dióxido de carbono e água, mas a composição final depende do substrato utilizado [64]. O biogás, por vezes referido como agrogás na literatura, é produzido por fermentação metânica. Este processo é um método para neutralizar excrementos animais, produzindo simultaneamente biogás. A fermentação metânica pode ser aplicada a quase todos os resíduos orgânicos da produção agrícola [65 , 66 , 67]. O processo de fermentação metânica é composto por quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O processo de fermentação metânica ocorre em três etapas: hidrólise, fermentação ácida e fermentação metanogênica. Uma vez que este processo é realizado por bactérias, é necessário proporcionar-lhes as melhores condições de vida possíveis para maximizar a produção de biogás.

Os parâmetros mais importantes que determinam a correta condução da fermentação e a quantidade de biogás obtida são [68]:

- Temperatura (deve ser adaptada ao tipo de bactéria envolvida no processo);
- O tempo de retenção é determinado pela proporção entre o fluxo de substrato e a capacidade do digestor (deve ser suficientemente longo para evitar que as bactérias sejam lavadas do tanque);

- Carga ideal de matéria orgânica (uma carga muito alta pode sobrecarregar o sistema, e uma carga muito baixa pode resultar em falha da reação);
- Conteúdo de inibidores de processo, como antibióticos ou produtos fitossanitários.

Resíduos da produção animal, como chorume, estrume e excrementos de galinha, são particularmente úteis para a produção de metano. Resíduos com maior teor de lignina são menos úteis devido à sua taxa de decomposição mais lenta [67]. Portanto, este artigo concentra-se na estimativa da quantidade de biogás agrícola que pode ser obtida da produção animal, ou seja, da criação de bovinos, suínos e aves.

Neste artigo, avalia-se o potencial teórico de produção de biogás nos países da UE. Portanto, esse potencial não leva em consideração requisitos relacionados ao processo microbiológico, como a relação carbono/nitrogênio (C:N) ou sistemas de produção animal – com ou sem cama (devido à significativa variação nesse aspecto entre os países, essa determinação é difícil e pode levar a erros de estimativa consideráveis [38]).

O potencial estimado indica possibilidades de produção resultantes da energia armazenada em fertilizantes naturais. Nos países da União Europeia, de acordo com a Diretiva do Nitrogênio [69], a dose máxima é de $170 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Deve-se ressaltar que, nos países da União Europeia, os excedentes dessa matéria-prima são pequenos, considerando-se a priorização do uso da biomassa como fertilizante (em vez de fertilizantes minerais).

Consequentemente, o potencial energético também é limitado. Portanto, neste estudo, assume-se que as necessidades de fertilizantes resultantes da produção vegetal serão atendidas pelo uso da massa pós-fermentação, que é um subproduto da operação da planta de biogás.

Para atingir o objetivo da pesquisa, a quantidade teórica potencial de biogás foi estimada com base nos resíduos da produção animal. As análises abrangeram 27 países da União Europeia. Os dados sobre a população de cada espécie pecuária foram obtidos da base de dados do Gabinete de Estatística da União Europeia (Eurostat) [70].

A produção potencial teórica de biogás agrícola foi estimada separadamente para cada espécie animal, com base nas seguintes suposições [71 , 72]:

$$P_{br} = L \cdot W_{d.m.} \cdot 365 / 1000 \cdot P_b$$

onde P_{br} — produção potencial de biogás agrícola para uma determinada espécie animal — bovinos, suínos e aves (em $m^3 \cdot ano^{-1}$); L — número de unidades de gado de uma determinada espécie animal (UGG); $W_{d.m.}$ — produção média diária de esterco expressa em kg de matéria seca convertida em UDG ($kg_{dm} \cdot UGG^{-1} \cdot d^{-1}$); 365 — número de dias em um ano; P_b — produção média de biogás a partir de uma tonelada de matéria seca de esterco (m^3 / t_{dm}).

A produção teórica de biometano para cada espécie animal foi estimada utilizando a seguinte fórmula:

$$P_{ba} = L \cdot W_{d.m.} \cdot 365 / 1000 \cdot P_m$$

onde P_{ba} — produção potencial de biometano para uma determinada espécie animal — bovinos, suínos e aves ($m^3 \cdot ano^{-1}$); L — número de unidades de gado de uma determinada espécie animal (LSU); $W_{d.m.}$ — produção média diária de esterco expressa em kg de matéria seca convertida em LSU ($kg_{dm} \cdot LSU^{-1} \cdot d^{-1}$); 365 — número de dias em um ano; P_m — produção média de biometano a partir de uma tonelada de matéria seca de esterco (m^3 / t_{dm}).

Os dados sobre bovinos e suínos referem-se a 2024. No entanto, devido à falta de dados completos sobre a população de aves para 2024 na base de dados, foram utilizados dados do censo agropecuário geral realizado em 2020. Os dados descarregados sobre o número de espécies individuais de animais foram convertidos em unidades de gado. Uma unidade de gado (UG) é uma unidade de referência que facilita a agregação de animais de diferentes espécies e idades, utilizando coeficientes específicos estabelecidos com base nas necessidades nutricionais ou alimentares de cada tipo de animal.

A unidade de referência utilizada para calcular as unidades de gado ($=1$ UG) é o equivalente em pastagem de uma vaca leiteira adulta que produz 3000 kg de leite por ano, sem adição de concentrados alimentares [73].

Para converter as unidades físicas da população pecuária em unidades pecuárias (UP), utilizou-se a metodologia do Instituto Europeu de Estatística (Eurostat), considerando as espécies pecuárias individuais.

As seguintes conversões foram utilizadas para cada espécie bovina: menores de 1 ano — 0,4; de 1 a menos de 2 anos — 0,7; machos com 2 anos ou mais — 1; novilhas com 2 anos ou mais — 0,8; vacas leiteiras — 1; búfalas — 1; outras vacas com 2 anos ou mais — 0,8. Os seguintes indicadores foram utilizados para cada espécie suína: leitões com peso vivo inferior a 20 kg — 0,027; matrizes com peso igual ou superior a 50 kg — 0,5; outros suínos — 0,3. As espécies de aves foram convertidas de acordo com os seguintes indicadores: frangos de corte — 0,007; galinhas poedeiras — 0,014; outras aves (perus, patos, gansos, avestruzes, outras aves de criação não especificadas) — 0,03 [74]. Os dados empíricos para calcular o potencial teórico de biogás e biometano a partir de estrume animal para espécies individuais de animais de criação.

O poder calorífico é um dos fatores que determinam a qualidade do combustível. O poder calorífico é a quantidade de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume de combustível em atmosfera de oxigênio, com as substâncias iniciais e os produtos da combustão em condições padrão (1013,25 hPa, 298,15 K) [77]. O poder calorífico do metano puro é de aproximadamente $36 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ (PCI) [78].

O poder calorífico do biogás bruto depende do teor de metano, que pode variar de 45 a 70% [67], embora alguns autores também apresentem outras porcentagens, por exemplo, 52–85% [79 , 80] ou 55–85% [81]. Portanto, o poder calorífico inferior (PCI) geralmente varia de $16,7$ a 23 MJ m^{-3} [77], alguns autores também fornecem faixas mais amplas, ou seja, 17 – 25 MJ m^{-3} [82] ou 16 – 28 MJ m^{-3} [64].

Tipicamente, o potencial energético é calculado para uma participação de metano de 65% e um poder calorífico de 23 MJ/m³ [79 , 81 , 83] . No entanto, o artigo apresenta três cenários de possibilidades de produção de biogás: o de menor potencial (poder calorífico do biogás de 16 MJ/m³) , o de potencial médio (poder calorífico do biogás de 22 MJ/m³) e o de alto potencial (poder calorífico do biogás de 28 MJ/m³) . A pesquisa sobre a composição do biogás mostra que um valor de aquecimento de 28 MJ/m⁻³ é característico do biogás com um teor de metano de aproximadamente 75% [84] .

5. Resultados

Na União Europeia, o rebanho bovino totaliza 95.320,26 mil unidades de gado (UG). O gado bovino predomina, representando 54,39%. As populações de suínos e aves correspondem a 25,41% e 20,20%, respectivamente (Tabela 2). O rebanho bovino na União Europeia é de 51.847,87 mil unidades de gado. O tamanho dos rebanhos em cada país varia de 10,32 a 11.739,67, com uma média de 1.920,29 unidades de gado. A França detém as maiores participações na pecuária bovina, com 22,64% (11.739,67 UG), a Alemanha, com 14,72% (7.629,82 UG), e a Itália, com 8,76% (4.539,50 UG). O rebanho suíno na União Europeia é de 24.220,06 mil UG.

O tamanho da população de aves em cada país varia de 6,78 mil habitantes por unidade de produção (LSU) a 6.203,32 LSU, com uma média de 897,04 LSU.

A maior participação na criação de suínos é da Espanha — 25,61% (6.203,32 LSU), seguida pela Alemanha — 16,83% (4.075,89 LSU) e pela França — 8,75% (2.118,46 LSU).

A população de aves na União Europeia totaliza 19.252,33 mil LSU. O tamanho da população de aves em cada país varia de 1,79 mil a 4.414,39 LSU, com uma média de 713,05 LSU.

A maior participação na criação de aves é da França — 22,93% (4.414,39 LSU), seguida pela Polônia — 13,62% (2.621,73 LSU) e pela Espanha — 11,92% (2.295,06 LSU).

Com base nas premissas adotadas, estimou-se o potencial de produção de biogás a partir da produção animal.

Considerando os recursos agrícolas existentes gerados pela produção animal, um total de 68.714,1 milhões de m³ de biogás poderia ser produzido em todos os países da União Europeia.

Como o biogás pode conter quantidades variáveis de metano, seu potencial energético também pode variar. Estimou-se que, dependendo do poder calorífico assumido (16 MJ/m³, 22 MJ/m³, 28 MJ/m³), o potencial energético do biogás proveniente de dejetos animais pode variar de 1.099.425,9 a 1.923.995,3 milhões de TJ.

No entanto, apenas o biometano, que constitui aproximadamente 63% do biogás, pode ser diretamente injetado na rede (após purificação adequada).

Portanto, o potencial total de biometano nos países da União Europeia é de 43.216,5 milhões de m³ .

O valor energético estimado do biometano é de 1.555.782,4 TJ. Os valores potenciais identificados em cada país variaram de 496,0 TJ a 314.872,5 TJ, com uma média de 57.621,6 TJ.

O maior potencial energético para biometano proveniente de estrume animal foi identificado na França — 314.872,5 TJ (20,2%), Alemanha — 206.853,1 TJ (13,3%) e Espanha — 199.299,1 TJ (12,8%). Vale ressaltar que, juntos, esses países acumulam 46,3% do potencial total de biometano identificado nos países da União Europeia. O menor potencial foi identificado nos menores países da União Europeia, ou seja, Malta — 496,0 TJ (0,0%), Luxemburgo — 1836,8 TJ (0,1%) e Chipre — 2690,8 TJ (0,2%).

A Figura 2 apresenta a densidade de produção potencial de biogás por 100 km² da área do país. Os valores para este indicador variaram de 0,2 milhões de m³ / 100 km² a 11,4 milhões de m³ / 100 km² , com uma média geral de 2,31 milhões de m³ / 100 km² . Apenas oito países apresentaram valores acima da média. Os valores mais baixos foram registrados no nordeste da Europa (Finlândia, Suécia, Estônia, Letônia e Lituânia) e no sudeste da Europa (Bulgária e Grécia). Os valores mais baixos foram registrados no noroeste da Europa (Países Baixos, Bélgica, Dinamarca, Irlanda e Luxemburgo) e em Malta.

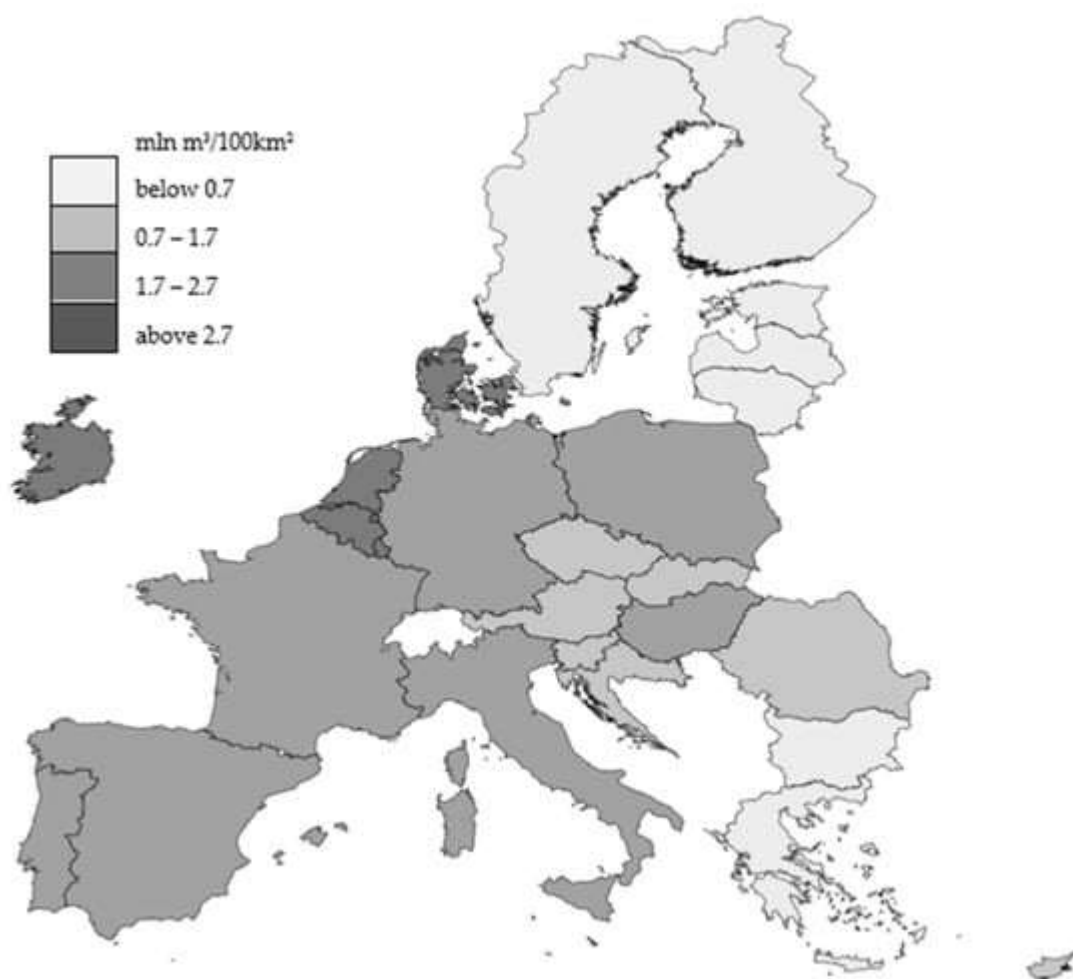


Figura 2. Potencial de produção de biogás em milhões de m³ por 100 km² da área do país.

Do ponto de vista econômico, também é importante determinar qual parcela das necessidades energéticas pode ser suprida pelo potencial energético identificado nos fertilizantes naturais derivados dos principais grupos de animais de criação.

Na União Europeia, o consumo de energia proveniente do gás natural foi de 12.835.046,08 TJ em 2024. Isso significa que o potencial identificado de biometano proveniente de dejetos animais poderia suprir aproximadamente 12,1% da demanda por esse recurso.

Essa participação variou entre os países, com valores entre 0,00% e 61,9%, com uma média de 16,4%.

O maior potencial para suprir a demanda de gás natural com biometano proveniente de dejetos animais foi observado na Suécia (61,9%), Dinamarca (43,9%) e Irlanda (31,5%).

Participações significativamente menores foram registradas em países como Chipre (0,00% – segundo dados do Eurostat, o país não utiliza gás natural), Malta (3,4%) e Eslováquia (5,4%).

A Figura 3 apresenta o potencial energético do biometano em TJ por 100 km² de área.

Os valores do índice variaram de 4,2 TJ/100 km² a 257,9 TJ/100 km² , com uma média de 52,3 TJ/100 km² .

Apenas oito países apresentaram valores acima da média.

Os valores mais altos foram registrados em países do noroeste europeu (Países Baixos, Bélgica, Dinamarca, Irlanda, Luxemburgo e Alemanha) e em Malta.

Os valores mais baixos foram registrados em países do noroeste europeu (Finlândia, Suécia, Estônia, Letônia e Lituânia) e do sudeste europeu (Grécia e Bulgária).

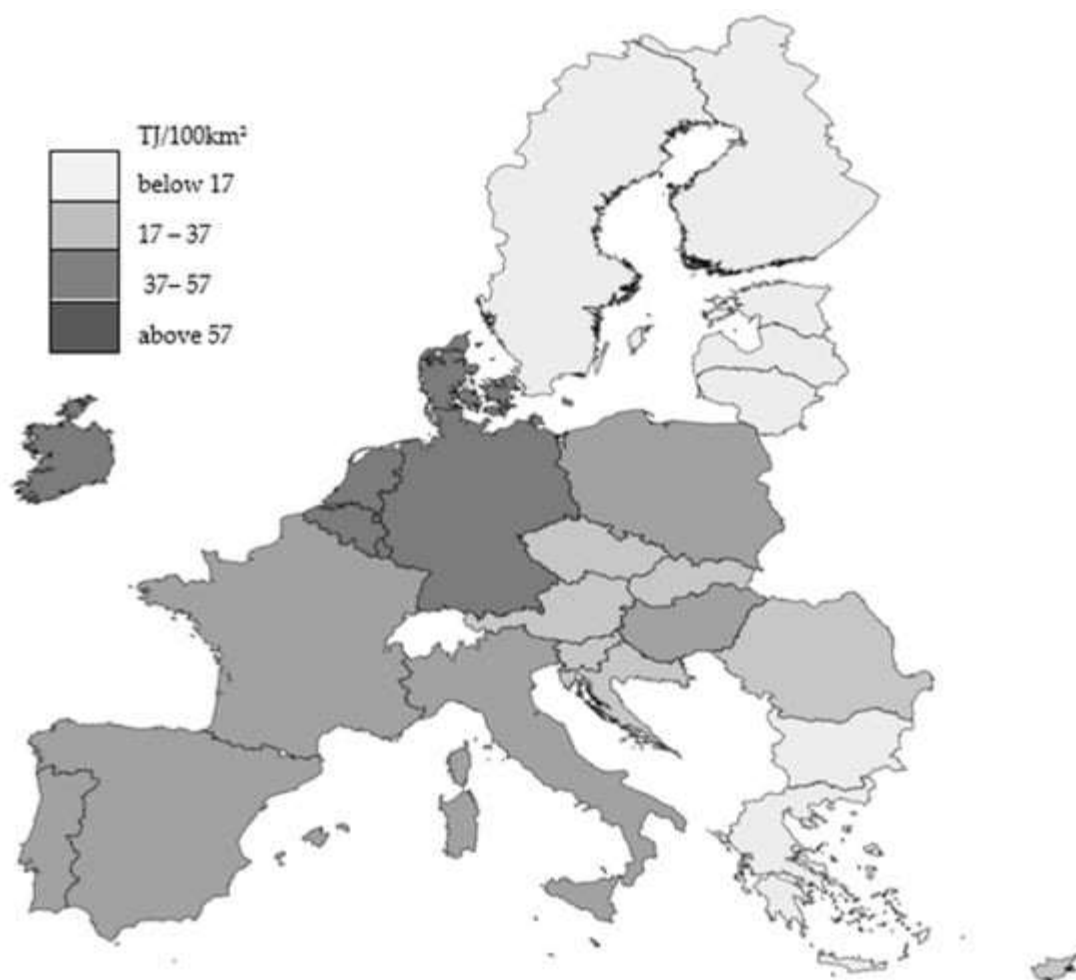


Figura 3. Potencial energético do biometano em TJ por 100 km² da área do país.

A Figura 4 apresenta o potencial energético do biometano em TJ por mil unidades de gado (UG). Os valores do índice variaram de 12,3 TJ/mil UG a 19,2 TJ/mil UG, com uma média de 16,2 TJ/100 km² .

Nesse caso, mais da metade dos países da União Europeia ficaram acima da média. Os valores mais altos foram registrados nos países do Leste Europeu (Hungria, Polônia, Grécia e Eslováquia), Malta e Portugal.

Os valores mais baixos foram registrados nos países do Norte Europeu (Luxemburgo, Irlanda, Dinamarca e Estônia).

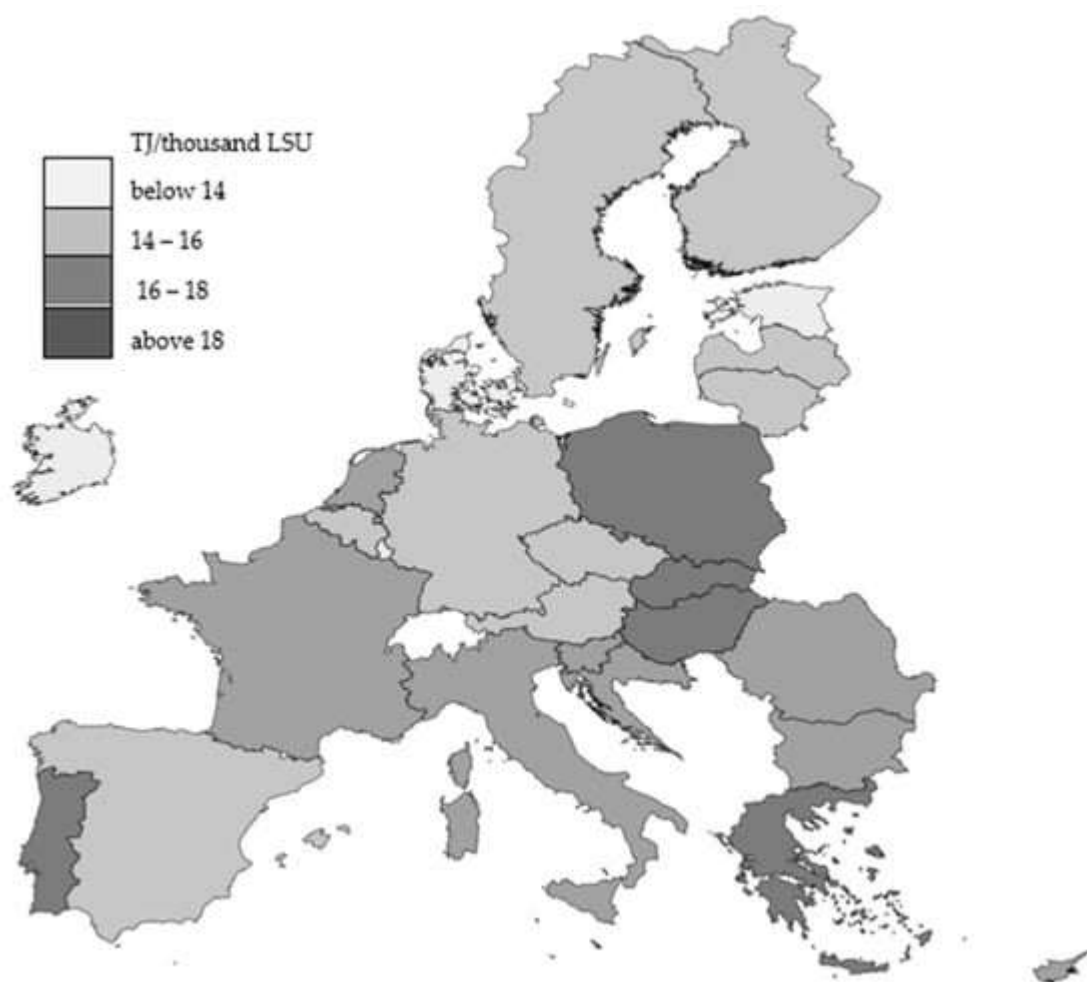


Figura 4. Potencial energético do biometano em TJ por mil LSU.

As análises mostram que o biometano produzido a partir de estrume animal representa uma pequena parte da estratégia energética de biogás da União Europeia.

No entanto, deve-se enfatizar que o biogás também pode ser produzido a partir de muitos outros substratos, como resíduos de culturas (por exemplo, resíduos de trigo, milho, arroz e outras culturas de grãos grossos, beterraba sacarina, etc.), substâncias orgânicas de origem agrícola geradas como resíduos na indústria agroalimentar ou culturas energéticas provenientes de cultivos energéticos específicos [85].

O aproveitamento do potencial dessas fontes pode satisfazer outra parte das necessidades energéticas de gás dos países da União Europeia.

6. Discussão

Em consonância com o objetivo da pesquisa, avaliou-se o potencial da biomassa animal para fins energéticos nos países da UE. O estudo incluiu fertilizantes naturais dos principais grupos de animais de criação — bovinos, suínos e aves. Um resumo dos resultados da pesquisa é apresentado na Tabela 5. A pesquisa realizada indica que essas matérias-primas têm potencial para serem utilizadas para fins energéticos. Esses resultados são consistentes com a pesquisa de Sher et al. [53], que indicam que o biogás é uma fonte de energia significativa nos países da União Europeia devido ao amplo acesso à biomassa. Além disso, considerando a produção atual de biogás nos países da União Europeia e o potencial identificado, nossos resultados são consistentes com Bórawski et al. [30], segundo os quais essa fonte também tem potencial para aumentar no futuro. No contexto da atual política climática e da crise energética [18 , 86], a produção de energia renovável a partir do biogás pode contribuir para a independência energética.

No entanto, deve-se notar que os recursos identificados para a produção de biogás são espacialmente dispersos, como também apontado por outros pesquisadores [36 , 87 , 88]. Conforme apontado por Singh et al. [21], a disponibilidade de matérias-primas para a produção de biogás é um dos principais fatores que determinam o nível de desenvolvimento de gases renováveis. Por essa razão, a disponibilidade de matérias-primas para a produção de biogás deve ser levada em consideração no planejamento de investimentos.

Concordando com Gustafsson e Anderberg [13], deve-se enfatizar que existe um potencial significativo para a produção e utilização de maiores quantidades de biogás nos países da UE, mesmo em países com produção relativamente alta, como Alemanha, Itália e França. O nível alcançado na Alemanha é considerado atingível por outros países no futuro. Países como Espanha, Portugal, Romênia e Polônia, com um grande número de pequenas propriedades rurais, possuem um potencial significativo ainda não explorado para a produção de biogás a partir de resíduos animais.

De acordo com nossas descobertas, alguns países da União Europeia são caracterizados tanto pela fragmentação agrícola quanto pela produção animal dispersa. O potencial geral de biomassa proveniente de resíduos animais nesses países é relativamente pequeno, mas merece ser considerado no contexto da construção de microcentrais de biogás. Isso se aplica principalmente aos países da Europa Central e Oriental e da Europa Meridional.

Para esses países, as microcentrais de biogás podem se revelar uma solução multifacetada para os problemas ambientais e energéticos em microescala, permitindo o fechamento do ciclo. Como Levstek e Rozman [89] enfatizam, alcançar as metas climáticas requer não apenas grandes investimentos, mas também investimentos menores, como as microcentrais de biogás. Sua importância para o futuro dos setores agrícola e energético em países da UE com pecuária fragmentada e dispersa deve ser destacada. Tais instalações podem se tornar não apenas instrumentos de transformação energética, mas também catalisadores para o desenvolvimento de áreas rurais e da agricultura do futuro.

A produção de energia integrada aos ciclos de materiais locais promove uma utilização mais eficiente dos resíduos e o desenvolvimento de modelos agrícolas mais sustentáveis [32]. As principais vantagens das microcentrais de biogás são a independência das flutuações de preço da biomassa e a garantia da autossuficiência energética das explorações agrícolas [90]. A alocação de terrenos para a instalação de uma microcentral de biogás geralmente não é um problema, mesmo para pequenos agricultores [33]. Além disso, nos países do sul, todo o biogás produzido pode ser utilizado como fonte de energia devido aos custos de aquecimento insignificantes [7].

Sobczak et al. [35] apontam outro benefício das microcentrais de biogás: o auxílio na comercialização de produtos graças à possibilidade de rotulagem da sua pegada de carbono (as expectativas das grandes cadeias de retalho em relação aos produtores a este respeito já são visíveis).

Para satisfazer estas necessidades, é necessário desenvolver um modelo de negócio simplificado para microcentrais de biogás agrícolas para explorações agrícolas individuais [91].

O apoio institucional à produção e ao consumo de biogás é uma condição necessária devido aos elevados custos de investimento e também por razões tecnológicas [23].

Gustafsson e Anderberg [13] salientam que estratégias e instrumentos políticos a longo prazo podem ser uma boa forma de criar condições favoráveis para o setor do biogás. É importante assegurar condições estáveis e previsíveis tanto para os produtores como para os consumidores.

Contudo, é importante lembrar que as estratégias e os instrumentos políticos que estimulam o desenvolvimento do biogás não devem ser transferidos diretamente de um país para outro, uma vez que dependem do contexto e das condições nacionais. No entanto, como Chodkowska-Miszczuk et al. [57] enfatizam, um grande desafio, especialmente para os países da Europa Central e Oriental, é a transição de incentivos públicos diretos para um modelo de negócio mais autossuficiente, centrado na colaboração entre as partes interessadas locais e na utilização da energia proveniente de resíduos agrícolas locais. Medidas de apoio, como fundos de investigação e desenvolvimento, isenções fiscais e incentivos, também são necessárias [34]. Neste contexto, parece razoável disseminar conhecimento sobre os benefícios ambientais e económicos que podem ser obtidos com o desenvolvimento da indústria de biogás agrícola [23].

O exemplo polonês demonstra que procedimentos e regulamentações simplificados para usinas de biogás apoiam a criação de energia renovável e contribuem para o aumento da independência energética dos agricultores. Os procedimentos de construção de microusinas de biogás são otimizados para minimizar a burocracia e se adaptar às necessidades específicas dos agricultores. Os agricultores podem acelerar e facilitar o processo de investimento utilizando procedimentos simplificados para a construção de microusinas de biogás [92]. Alguns tipos de biomassa são isentos das regulamentações de resíduos mais restritivas graças a regulamentações específicas [93]. A isenção da biomassa em relação às regulamentações aplica-se principalmente a materiais considerados seguros e fáceis de reciclar, como resíduos agrícolas.

De acordo com dados do Centro Nacional de Apoio à Agricultura, essas regulamentações contribuíram para o aumento do número de microusinas de biogás em áreas rurais da Polônia [94]. O estudo realizado apresenta algumas limitações. Em primeiro lugar, o potencial de biogás identificado foi estimado com base em dados secundários, que constituem um recurso limitado sobre o fenómeno em estudo. Estes dados são recolhidos e padronizados pelo Eurostat. A necessidade de o Eurostat introduzir critérios padronizados decorre da diversidade entre os países. Isto leva a simplificações que facilitam as comparações, mas, por outro lado, limita o detalhe dos dados recolhidos. Este compromisso permite uma visão geral dos países da UE na área em estudo, mas requer análises complementares mais detalhadas.

Em segundo lugar, devido à diversidade das práticas de criação de animais entre os países, é difícil determinar a dimensão das frações individuais dos fertilizantes naturais, o que pode influenciar as diferenças nas estimativas do potencial de biogás existente a partir desta fonte. Deve-se salientar que o potencial de biomassa é estimado com base na dimensão das unidades pecuárias (UP). Um panorama mais detalhado e realista incluiria a dimensão real dos resíduos animais nas explorações agrícolas.

Portanto, a investigação futura deverá concentrar-se em análises mais detalhadas a nível regional e local. Os métodos de investigação propostos podem ser aplicados ao nível das NUTS 2, NUTS 3 e até mesmo ao nível das Unidades Administrativas Locais. A análise regional e local é mais detalhada do que a análise nacional e permite identificar as características específicas de uma determinada área.

Permite considerar as diferenças entre regiões e áreas não só em termos de substratos, mas também em termos de procura de energia e do potencial de utilização prática da biomassa proveniente de resíduos animais.

Com base em análises regionais e locais mais detalhadas, é possível formular programas e estratégias de apoio adaptados às necessidades reais das áreas apoiadas. Isto traduz-se numa maior eficácia do apoio e numa melhor utilização dos substratos disponíveis. Isto permitirá uma melhor localização dos investimentos em cada país da UE. Além disso, apenas as instalações locais cumprem os princípios da economia circular.

No entanto, devido aos custos significativos associados à construção de instalações de produção de biogás e biometano, a investigação futura deverá também centrar-se na análise de possíveis fontes de financiamento do investimento. O apoio institucional e financeiro ao setor do biogás varia entre países, impactando as oportunidades de desenvolvimento do setor. Estes investimentos estão normalmente associados a custos iniciais relativamente elevados, o que torna a superação desta barreira difícil, senão impossível, para muitos agricultores. Um apoio adequado pode melhorar a rentabilidade e reduzir o risco financeiro. Nesse sentido, também é importante identificar boas práticas que possam ser disseminadas para outros países.

7. Conclusões

A utilização de esterco natural proveniente da produção animal para fins energéticos traz muitos benefícios, tanto económicos (produção de energia renovável) quanto ambientais (gestão adequada de resíduos, mitigação das mudanças climáticas). Essas atividades contribuem para o alcance das metas de baixa emissão e economia circular.

Outra vantagem do biogás como fonte de energia renovável é a sua versatilidade. Ele pode ser utilizado para produzir calor e eletricidade, bem como combustível para veículos.

Estimativas indicam que existe um potencial significativo para a produção de biogás a partir de dejetos gerados na pecuária nos países da União Europeia.

Considerando a população dos principais grupos de animais (bovinos, suínos e aves), é possível produzir 68.714,1 milhões de m³ de biogás, dos quais 63% são biometano (26.993,43 milhões de m³), que pode ser injetado diretamente na rede de distribuição. O potencial identificado poderia suprir aproximadamente 12,1% da demanda de gás dos países da União Europeia.

Em 2022, foram produzidos 12.287,5 ktoe de energia a partir de biogás nos países da União Europeia, o que indica um significativo potencial de desenvolvimento para esta fonte de energia renovável. Além disso, a crise energética resultante da conjuntura geopolítica, bem como as expectativas da União Europeia em relação ao aumento da produção de biometano e ao investimento nesta área, demonstram a importância crucial desta fonte no futuro. Isto é especialmente relevante, dado que o biogás é uma fonte de energia estável, devido à sua dependência da produção pecuária, que deve ser implementada em níveis adequados para satisfazer as necessidades alimentares de cada país da União Europeia.

A ampla aplicação do potencial da biomassa proveniente de resíduos animais requer apoio institucional.

Além do quadro da UE, são necessárias regulamentações nacionais que levem em consideração as condições específicas. Alguns países estão implementando tais regulamentações e sistemas de apoio, e os efeitos positivos já são visíveis. Portanto, esse fenômeno deve se tornar mais disseminado, com base nas melhores práticas.

Em particular, são necessários procedimentos universais para simplificar o uso da biomassa animal proveniente da agricultura e facilitar o investimento em usinas de biogás, incluindo microusinas de biogás. De forma geral, o apoio universal ao desenvolvimento do setor de biogás nos países da UE requer um sistema de incentivos, incluindo subsídios e empréstimos, bem como mecanismos relacionados aos preços de compra (por exemplo, a garantia de um preço de compra fixo). Além disso, o conhecimento sobre o potencial de uso da biomassa deve ser disseminado entre os diversos grupos de partes interessadas, especialmente em nível local. A conscientização é uma ferramenta que influencia o desenvolvimento do setor de biogás. Atividades de pesquisa e desenvolvimento também são necessárias para aprimorar as soluções tecnológicas existentes. Portanto, são necessários esforços abrangentes e interdisciplinares.

Contribuições dos autores

Conceitualização: DJ e LO; metodologia: DJ e LO; software: DJ e LO; análise formal: DJ e LO; investigação: DJ e LO; recursos: DJ e LO; curadoria de dados: DJ e LO; redação – preparação do rascunho original: DJ e LO; redação – revisão e edição: DJ e LO; visualização: DJ e LO. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Declaração do Comitê de Revisão Institucional

Não aplicável.

Declaração de Disponibilidade de Dados

As contribuições originais apresentadas neste estudo estão incluídas no artigo. Para mais informações, entre em contato com o autor correspondente.

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

- Mignogna, D.; Ceci, P.; Cafaro, C.; Corazzi, G.; Avino, P. Produção de biogás e biometano como fontes de energia renováveis: uma revisão. *Appl. Sci.* 2023 , 13 , 10219. [Google Scholar] [CrossRef]
- Okeke, UG Energia renovável a partir de resíduos agrícolas: potencial do biogás para geração de energia sustentável em comunidades agrícolas rurais da Nigéria. *J. Eng. Res. Rep.* 2024 , 26 , 341–367. [Google Scholar] [CrossRef]
- Motevakel, P.; Roldán-Blay, C.; Roldán-Porta, C.; Escrivá-Escrivá, G.; Dasí-Crespo, D. Planejamento Estratégico de Recursos para Integração Sustentável de Biogás em Sistemas Híbridos de Energia Renovável. *Apl. Ciência.* 2025 , 15 , 642. [Google Scholar] [CrossRef]
- Yang, Y.; Tilman, D.; Jin, Z.; Smith, P.; Barrett, CB; Zhu, YG; Burney, J.; D'Odorico, P.; Fantke, P.; Fargione, J.; et al. As mudanças climáticas exacerbam os impactos ambientais da agricultura. *Science* 2024 , 385 , 6713. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Padhiary, M.; Kumar, R. Avaliando os impactos ambientais da agricultura, operações industriais e mineração em agroecossistemas. Em *Internet das Coisas Inteligente para o Meio Ambiente e Saúde ; Estudos em Inteligência Computacional*; Azrour, M., Mabrouki, J., Alabdulatif, A., Guezzaz, A., Amounas, F., Eds.; Springer Nature: Cham, Suíça, 2024; pp. 107–126. [Google Scholar] [CrossRef]
- Aksay, MV; Abdulsamed Tabak, A. Mapeamento do potencial de biogás de resíduos animais e agrícolas na Turquia. *Biomass Convers. Biorefinery* 2022 , 12 , 5345–5362. [Google Scholar] [CrossRef]
- Atilgan, A.; Saltuk, B.; Ertop, H.; Aksoy, E. Determinação do valor energético potencial do biogás de resíduos animais: caso de Antalya. *Eur. J. Sci. Tech.* 2021 , 22 , 263–272. [Google Scholar] [CrossRef]
- Vărzaru, AA. Avaliando o impacto da agricultura nos gases de efeito estufa na União Europeia: uma perspectiva de agricultura inteligente em relação ao clima. *Agronomy* 2024 , 14 , 821. [Google Scholar] [CrossRef]
- Ma, B.; Karimi, MS; Si Mohammed, K.; Shahzadi, I.; Dai, J. Nexos entre mudanças climáticas, produção agrícola, uso de fertilizantes e emissões do solo agrícola: novas implicações no contexto da gestão ambiental. *J. Clean. Prod.* 2024 , 450 , 141801. [Google Scholar] [CrossRef]

Weiland, P. Produção de biogás: estado atual e perspectivas. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010 , 85 , 849–860. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Murray, BC; Galik, CS; Vegh, T. Biogás nos Estados Unidos: Estimando a produção futura e aprendendo com experiências internacionais. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 2017 , 22 , 485–501. [Google Scholar] [CrossRef]

Jameel, MK; Mustafa, MA; Ahmed, HS; Mohammed, AJ; Ghazy, H.; Shakir, MN; Lawas, AM; Mohammed, SK; Idan, AH; Mahmoud, ZH; et al. Biogás: Produção, propriedades, aplicações, aspectos econômicos e desafios: Uma revisão. *Results Chem.* 2024 , 7 , 101549. [Google Scholar] [CrossRef]

Gustafsson, M.; Meneghetti, R.; Souza Marques, F.; Trim, H.; Dong, R.; Al Saedi, T.; Rasi, S.; Thual, J.; Kornatz, P.; Wall, D.; et al. Uma perspectiva sobre o estado da indústria de biogás em países membros selecionados. *IEA Bioenergy Task* 2024 , 37 , 2. [Google Scholar]

Pilarski, K.; Pilarska, AA; Dach, J. Biogás como fonte de energia renovável: uma breve visão geral. *J. Ecol. Eng.* 2025 , 26 , 408–416. [Google Scholar] [CrossRef]

Bentivoglio, D.; Chiaraluce, G.; Finco, A. Avaliação econômica da valorização de resíduos vegetais por meio da cadeia biogás-biometano na Itália com uma abordagem de economia circular. *Front. Sustain. Food Syst.* 2022 , 6 , 1035357. [Google Scholar] [CrossRef]

Honcharuk, I.; Tokarchuk, D.; Gontaruk, Y.; Kolomiiets, T. Produção e uso de biogás e biometano a partir de resíduos para neutralidade climática e desenvolvimento de economia verde. *J. Ecol. Eng.* 2024 , 25 , 20–32. [Google Scholar] [CrossRef]

Sesini, M.; Cretì, A.; Massol, O. Desbloqueando o biogás e o biometano europeus: insights políticos a partir de análises comparativas. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2024 , 199 , 114521. [Google Scholar] [CrossRef]

Em forma para pessoas com 55 anos. Disponível online: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> (acessado em 20 de junho de 2025).

Comissão Europeia. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, Plano REPowerEU ; 18.5.2022 COM(2022) 230 Final; Comissão Europeia: Bruxelas, Bélgica, 2022. [Google Scholar]

Comissão Europeia. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, Um novo plano de ação para a economia circular para uma Europa mais limpa e competitiva ; Bruxelas, 11.3.2020 COM(2020) 98 Final; Comissão Europeia: Bruxelas, Bélgica, 2020. [Google Scholar]

Singh, AK; Pal, P.; Rathore, SS; Sahoo, UK; Sarangi, PK; Prus, P.; Dziekański, P. Utilização sustentável de recursos de biorresíduos para produção de biogás para atender às necessidades de bioenergia rural. *Energies* 2023 , 16 , 5409. [Google Scholar] [CrossRef]

Ellacuriaga, M.; García-Cascallana, J.; Gómez, X. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: integrando conceitos de economia circular. *Fuels* 2021 , 2 , 144–167. [Google Scholar] [CrossRef]

Ignaciuk, W.; Sulewski, P. Condições de desenvolvimento da indústria de biogás agrícola na Polônia no contexto das experiências históricas e desafios do Pacto Ecológico Europeu. *Probl. Agric. Econ.* 2021 , 3 , 55–77. [Google Scholar] [CrossRef]

Xu, X.; Ma, Z.; Chen, Y.; Gu, X.; Liu, Q.; Wang, Y.; Sun, M.; Chang, D. Padrão de economia circular do manejo de dejetos animais em Longyou, China. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2018 , 20 , 1050–1062. [Google Scholar] [CrossRef]

Szymańska, EJ; Mroczek, R.; Drożdż, J. Uma economia de ciclo fechado na indústria da carne para geração de energia alternativa a partir de usinas de biogás. *Energies* 2024 , 17 , 6172. [Google Scholar] [CrossRef]

Szara, E. Potencial fertilizante dos principais resíduos na Polônia. Em *Fertilizantes de Resíduos como Fonte de Nutrientes na Fertilização de Culturas — Uso Agrícola de Resíduos e Subprodutos como Elo na Economia Circular* ; Łabętowicz, J., Stępień, W., Eds.; Editora da Universidade de Ciências da Vida de Varsóvia e Fundação Pro Civis: Varsóvia, Polônia; Kielce, Polônia, 2020; pp. 29–70. (Em polonês) [Google Scholar]

Dhungana, B.; Lohani, SP; Marsolek, M. Codigestão anaeróbica de resíduos alimentares com esterco animal à temperatura ambiente: uma economia circular baseada em biogás e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. *Sustainability* 2022 , 14 , 3307. [Google Scholar] [CrossRef]

Kapoor, R.; Ghosh, P.; Kumar, M.; Sengupta, S.; Gupta, A.; Kumar, SS; Vijay, V.; Kumar, V.; Kumar Vijay, V.; Pant, D. Valorização de resíduos agrícolas para economia circular baseada em biogás na Índia: uma perspectiva de pesquisa. *Bioresour. Technol.* 2020 , 304 , 123036. [Google Scholar] [CrossRef]

Lubańska, A.; Kazak, JK. O papel da produção de biogás na abordagem da economia circular sob a perspectiva da localidade. *Energies* 2023 , 16 , 3801. [Google Scholar] [CrossRef]

Bórawski, P.; Beldycka-Bórawska, A.; Kapsdorferová, Z.; Rokicki, T.; Parzonko, A.; Holden, L. Perspectivas da produção de eletricidade a partir de biogás na União Europeia. *Energies* 2024 , 17 , 1169. [Google Scholar] [CrossRef]

Sica, D.; Esposito, B.; Supino, S.; Malandrino, O.; Sessa, MS. Sistemas baseados em biogás: uma oportunidade para uma perspectiva pós-fóssil e de economia circular na Itália. *Energy Policy* 2023 , 182 , 113719. [Google Scholar] [CrossRef]

Kochanek, A.; Ciula, J.; Cembruch-Nowakowski, M.; Załona, T. Percepções dos agricultores poloneses sobre os benefícios e riscos do investimento em usinas de biogás e o papel dos SIGs na seleção de locais. *Energies* 2025 , 18 , 3981. [Google Scholar] [CrossRef]

Khan, MU; Ahmad, M.; Sultão, M.; Sohoo, eu.; Ghimire, PC; Zahid, A.; Sarwar, A.; Farooq, M.; Sajjad, U.; Abdeslahian, P.; e outros. Potencial de produção de biogás a partir de esterco de gado no Paquistão. *Sustentabilidade* 2021 , 13 , 6751. [Google Scholar] [CrossRef]

Ardebili, SMS; Khademalrasoul, A. Uma avaliação da viabilidade e do potencial da produção de biocombustíveis gasosos a partir de resíduos agrícolas/animais: um estudo de caso. *Biomass Convers. Biorefin.* 2022 , 12 , 5105–5114. [Google Scholar] [CrossRef]

Sobczak, A.; Chomać-Pierzecka, E.; Kokieli, A.; Różycka, M.; Stasiak, J.; Soboń, D. Condições econômicas de utilização de resíduos biodegradáveis para produção de biogás, usando o exemplo da Polônia e da Alemanha. *Energias* 2022 , 15 , 5239. [Google Scholar] [CrossRef]

Scarlat, N.; Martinov, M.; Dallemand, JF. Avaliação da disponibilidade de resíduos de culturas agrícolas na União Europeia: potencial e limitações para o uso em bioenergia. *Waste Manag.* 2010 , 30 , 1889–1897. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Gavrilescu, M. Energia de biomassa para energia e desenvolvimento sustentável. *Environ. Eng. Manag. J.* 2008 , 7 , 617–640. [Google Scholar] [CrossRef]

Pudółko, R. Avaliação do potencial de biomassa de subprodutos e resíduos na UE-27 e na Suíça e sua regionalização ; Instituto de Ciência do Solo e Cultivo de Plantas, Instituto Estadual de Pesquisa: Puławy, Polônia, 2013; pp. 40–57. (Em polonês) [Google Scholar]

Dahlin, J.; Nelles, M.; Herbes, C. Gestão do digestato de biogás: Avaliando as atitudes e percepções de jardineiros alemães em relação a corretivos de solo à base de digestato. *Resour. Conserv. Recycl.* 2017 , 118 , 27–38. [Google Scholar] [CrossRef]

Abliieva, IY; Geletukha, G. G.; Kucheruk, PP; Enrich-Prast, A.; Carraro, G.; Berezhna, IO; Berezhnyi, DM Digestate potencial para substituir fertilizantes minerais: abordagens de engenharia. *Internacional J. Eng. Ciência.* 2022 , 9 , H1–H10. [Google Scholar] [CrossRef]

Arthurson, V. Fechando o ciclo global de energia e nutrientes através da aplicação de resíduos de biogás em terras agrícolas — Benefícios e desvantagens potenciais. *Energies* 2009 , 2 , 226–242. [Google Scholar] [CrossRef]

Akpan, JF; Isong, IA; Asikong, EBE. Digestão anaeróbica de resíduos orgânicos para a produção de biogás em Calabar, Estado de Cross River, Nigéria. *World News Nat. Sci.* 2019 , 24 , 9–21. [Google Scholar]

Nabel, M.; Schrey, SD; Poorter, H.; Koller, R.; Jablonowski, AD. Efeito da fertilização com digestato em *Sida hermaphrodita*: impulsionando a biomassa em solos marginais através do aumento da fertilidade do solo. *Biomass Bioenergy* 2017 , 107 , 207–213. [Google Scholar] [CrossRef]

Hupfauf, S.; Bachmann, S.; Fernandez-Delgado, JM; Insam, H.; Eichler-Löbermann, B. Biogas digestate affect crop P uptake and soil microbial community composition. *Sci. Total Environ.* 2016 , 542 , 1144–1154. [Google Scholar] [CrossRef]

Manasa, MRK; Katukuri, NR; Xu, X.; Guo, R. Reabilitação de solo salino com digestato de biogás, ácido húmico, humato de cálcio e suas misturas. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.* 2020 , 51 , 1707–1724. [Google Scholar] [CrossRef]

Różyło, K.; Oleszczuk, P.; Kraska, P.; Kiecińska-Poppe, E.; Andruszczak, S. Avaliação ecotoxicológica do solo fertilizado com resíduos de biogás ou resíduos de mineração. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015 , 22 , 7833–7842. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Galvez, A.; Sinicco, T.; Cayuela, ML; Mingorance, MD; Fornasier, F.; Mondini, C. Efeitos de curto prazo de subprodutos da bioenergia na dinâmica de C e N do solo, disponibilidade de nutrientes e propriedades bioquímicas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2012 , 160 , 3–14. [Google Scholar] [CrossRef]

Odlare, M.; Pell, M.; Svensson, K. Alterações nas propriedades químicas e microbiológicas do solo durante 4 anos de aplicação de vários resíduos orgânicos. *Waste Manag.* 2008 , 28 , 1246–1253. [Google Scholar] [CrossRef]

Elsayed, M.; Abomohra, AEF; Ai, P.; Jin, K.; Fan, Q.; Zhang, Y. Digestatos líquidos de acetogênese e metanogênese para pré-tratamento de palha de arroz: uma abordagem holística para produção eficiente de biometano e reciclagem de nutrientes. *Energy Convers. Manag.* 2019 , 195 , 447–456. [Google Scholar] [CrossRef]

Szymańska, M. Fermentação metanogênica e utilização de digestato como fertilizante. Em *Fertilizantes de Resíduos como Fonte de Nutrientes na Fertilização de Culturas — Uso Agrícola de Resíduos e Subprodutos como Elo na Economia Circular* ; Łabętowicz, J., Stępień, W., Eds.; Editora da Universidade de Ciências da Vida de Varsóvia e Fundação Pro Civis: Varsóvia, Polônia; Kielce, Polônia, 2020; pp. 157–172. (Em polonês) [Google Scholar]

Pivato, A.; Vanin, S.; Raga, R.; Lavagnolo, MC; Barausse, A.; Rieple, A.; Laurent, A.; Cossu, R. Uso de digestato de uma planta de biogás descentralizada em fazenda como fertilizante em solos: um estudo ecotoxicológico para futuros indicadores em avaliação de risco e ciclo de vida. *Waste Manag.* 2016 , 49 , 378–389. [Google Scholar] [CrossRef]

Schlacke, S.; Wentzien, H.; Thierjung, EM; Köster, M. Implementando a Lei Climática da UE através do pacote 'Fit for 55'. *Oxf. Open Energy* 2022 , 1 , oiab002. [Google Scholar] [CrossRef]

Sher, F.; Smječanin, N.; Hrnjić, H.; Karadža, A.; Omanović, R.; Šehović, E.; Sulejmanović, J. Tecnologias emergentes para produção de biogás: Uma revisão crítica sobre progressos recentes, desafios e perspectivas futuras. *Processo Seguro. Meio Ambiente. Prot.* 2024 , 188 , 834–859. [Google Scholar] [CrossRef]

Comissão Europeia. Relatório da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões: Relatório sobre o Estado da União da Energia 2023 (nos termos do Regulamento (UE) 2018/1999 relativo à governação da União da Energia e à ação climática) ; COM/2023/650 Final; Comissão Europeia: Bruxelas, Bélgica, 2023. [Google Scholar]

Relatório do Barômetro de Biogás. EUROBSERV'ER. 2023. Disponível online: <https://www.euroobserver.org/biogas-barometer-2023/> (acessado em 20 de junho de 2025).

Bumharter, C.; Bolonio, D.; Amez, I.; García Martínez, MJ; Ortega, MF. Novas oportunidades para a indústria europeia de biogás: uma revisão sobre o desenvolvimento atual das instalações, potenciais de produção e melhorias de rendimento para misturas de estrume e resíduos agrícolas. *J. Clean. Prod.* 2023 , 388 , 135867. [Google Scholar] [CrossRef]

Chodkowska-Miszczuk, J.; Martinat, S.; Kulla, M.; Novotný, L. Projetos de energias renováveis nas periferias: Determinantes, desafios e perspectivas das usinas de biogás — Insights de países da Europa Central. *Reg. Stud. Reg. Sci.* 2020 , 7 , 362–381. [Google Scholar] [CrossRef]

Gustafsson, M.; Anderberg, S. Políticas de biogás e desenvolvimento da produção na Europa: uma análise comparativa de oito países. *Biofuels* 2022 , 13 , 931–944. [Google Scholar] [CrossRef]

Estatísticas Explicadas. Fazendas e Terras Agrícolas na União Europeia — Estatísticas. Disponível online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Farms_and_farmland_in_the_European_Union_-_statistics (acessado em 7 de novembro de 2025).

Um olhar sobre as explorações agrícolas europeias — Resultados do Censo Agrícola. Eurostat. 2025. Disponível online: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-catalogues/w/ks-01-24-024> (acessado em 7 de novembro de 2025).

Serviço de Publicações da União Europeia. Anuário Regional do Eurostat - Edição de 2025 ; Serviço de Publicações da União Europeia: Luxemburgo, 2025; pp. 216–241. [Google Scholar]

Van Gelder, JW; Boev, P.; Laplane, J.; Sanchez, J.; Schepers, D.; Stravens, M.; Witkowska, A. Biogás na UE: Uma Análise Política e Financeira ; Relatório Profundo: Amsterdã, Holanda, 2025; pp. 11–16. Disponível online: <https://changingmarkets.org/report/biogas-in-the-eu-a-policy-and-financial-analysis/> (acessado em 7 de novembro de 2025).

De Lorgerile, C. European Biometane Benchmark ; Relatório da Sia-Partners: Paris, França, 2022; Disponível online: https://www.sia-partners.com/system/files/document_download/file/2022-05/Sia%20Partners%20Benchmark%20Europe%20Biomethane.pdf (acessado em 7 de novembro de 2025).

Chmielewski, A. Análise técnica e econômica do uso de biogás agrícola. *Gaz Woda I Tech. Sanit. (Gas Water Sanit. Technol.* 2024 , 11 , 28–36. (Em polonês) [Google Scholar] [CrossRef]

Szlachta, J. Possibilidades de obtenção de biogás agrícola como fonte de energia renovável. Em *Engenharia Agrícola Moderna — Conquistas e Novos Desafios* ; Hołownicki, R., Kuboń, M., Eds.; Sociedade Polonesa de Engenharia Agrícola: Cracóvia, Polônia, 2013; pp. 385–425. (Em polonês) [Google Scholar]

Kuczyńska, I.; Nogaj, A.; Pomykała, R. Resíduos na produção de biogás. Parte II. Reciclagem 2011 , 10 , 23–26. (Em polonês) [Google Scholar]

Igras, J. Fertilizantes naturais — O uso de subprodutos da indústria agrícola e agroalimentar para a produção de energia renovável. Em *Fontes de Energia Renovável — Recursos Energéticos Agrícolas* ; Kołodziej, B., Matyka, M., Eds.; Editora Agrícola e Florestal: Poznan, Polônia, 2012; pp. 467–472. (Em polonês) [Google Scholar]

Oniszk-Popławska, A.; Zowsik, M.; Wisniewski, G. *Produção e Utilização de Biogás Agrícola* ; Centro Europeu de Energias Renováveis e Instituto de Construção; Mecanização e Eletrificação da Agricultura: Gdańsk, Polônia; Varsóvia, Polônia, 2003; pp. 14–16. (Em polonês) [Google Scholar]

Diretiva do Conselho de 12 de dezembro de 1991 relativa à proteção das águas contra a poluição causada por nitratos de origem agrícola (91/676/CEE) (1991L0676—EN—11.12.2008—002.001—2). Disponível online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:01991L0676-20081211> (acessado em 24 de novembro de 2025).

Base de dados da agricultura. Disponível online: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture/database> (acessado em 7 de novembro de 2025).

Marczak, H. Aspectos do uso energético do biogás proveniente de resíduos no exemplo da Voivodia de Lubuskie. *Inżynieria Ekol. (Engenharia Ecológica)* 2009 , 21 , 97–108. (Em polonês) [Google Scholar]

Curkowski, A.; Mroczkowski, P.; Oniszk-Popławska, A.; Wiśniewski, G. Biogás agrícola – Produção e uso. No *Guia do Biogás* ; Agência de Energia da Masóvia: Varsóvia, Polónia, 2009; pág. 64. (Em polonês) [Google Scholar]

Klugmann-Radziemska, E. *Fontes de energia renováveis — Exemplos de cálculo* ; Editora da Universidade de Tecnologia de Gdańsk: Gdańsk, Polônia, 2009; pp. 50–55. (Em polonês) [Google Scholar]

Estatísticas Explicadas. Glossário: Unidade Pecuária (UP). Disponível online: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Livestock_unit_\(UP\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Livestock_unit_(UP)) (acessado em 7 de novembro de 2025).

Schulz, E.; Eder, B. *Práxis do Biogás* ; Oekobuch: Hemsbach, Alemanha, 2001; pág. 237. [Google Acadêmico]

Skoczkowski, T.; Mikucki, O.; Choromański, P.; Grzybek, A.; Kaniszewska, A.; Ludwicka, A.; Mazurkiewicz, M.; Wasiak, A.; Wnuk, R. Avaliação Jurídica e Análise Econômica das Possibilidades de Alcançar os Objetivos Decorrentes da Estratégia de Energias Renováveis e da Diretiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de setembro de 2001, sobre a Promoção da Eletricidade Produzida a partir de Fontes de Energia Renovável no Mercado Interno de Eletricidade ; Agência Nacional de Conservação de Energia: Varsóvia, Polónia, 2007; p. 76. (Em polonês) [Google Scholar]

Wiącek, D.; Tytus, J. *Biogás—Produção e Possibilidades de seu Uso* ; Instituto de Agrofísica da Academia Polonesa de Ciências: Lublin, Polónia, 2015; p. 9. (Em polonês) [Google Scholar]

Kowalczyk-Juško, A. Avaliação de recursos de biomassa para produção de biogás — Organização da produção de energia renovável. Em *Fontes de Energia Renovável — Recursos Energéticos Agrícolas* ; Kołodziej, B., Matyka, M., Eds.; Editora Agrícola e Florestal: Poznan, Polônia, 2012; pp. 445–449. (Em polonês) [Google Scholar]

Gostomczyk, W. Matérias-primas para a produção de biogás e sua eficiência de uso (em polonês). Em *Potencial Energético Regional e Local da Biomassa* ; Jasiulewicz, M., Ed.; Editora da Universidade de Tecnologia de Koszalin: Koszalin, Polônia, 2010; p. 119. [Google Scholar]

Paska, J.; Sałek, M.; Surma, T. Geração de energia elétrica com o uso de recursos de energia renovável. *Energetyka* 2005 , 3 , 153–172. (Em polonês) [Google Scholar]

Avaliação da estratégia de desenvolvimento de energias renováveis e diretrizes para o desenvolvimento do uso energético do biogás, juntamente com ações propostas ; Análise; Fundo Nacional para a Proteção Ambiental e Gestão da Água: Varsóvia, Polônia, 2005; p. 90. (Em polonês)

Rejman-Burzyńska, A.; Maksymiak-Lach, H.; Jędrysik, E. O potencial energético do biogás – Uma estimativa dos recursos de produção de biogás na Polónia. *Chemik (Química)* 2013 , 67 , 446–453. [Google Acadêmico]

Szubska-Włodarczyk, N. Produção de biogás a partir de resíduos de produção animal como apoio à neutralidade climática numa perspectiva regional — O exemplo de Wielkopolska. *Rozw. Reg. Eu Polityka Reg. (Reg. Dev. Reg. Política)* 2024 , 72 , 193–211. (Em polonês) [Google Scholar] [CrossRef]

Wojtowicz, R. Análise da possibilidade de fornecimento de dispositivos de gás certificados com biogás agrícola tratado. *Nafta-Gaz (Óleo-Gás)* 2022 , 8 , 608–617. (Em polonês) [Google Scholar] [CrossRef]

Ministério do Desenvolvimento Regional. Determinação do Potencial Energético das Regiões Polonesas no Domínio das Fontes de Energia Renovável — Solicitações de Programas Operacionais Regionais para o Período de Programação 2014–2020 ; Ministério do Desenvolvimento Regional: Varsóvia, Polônia, 2011; p. 146. (Em polonês) [Google Scholar]

Nagy, D.; Princz-Jakovics, T. Marcos regulatórios do biogás na Europa: análise comparativa do uso de biometano no transporte. *Energy Rep.* 2025 , 13 , 6397–6410. [Google Scholar] [CrossRef]

Hamelin, L.; Borzęcka, M.; Kozak, M.; Pudelko, R. Uma abordagem espacial para a bioeconomia: Quantificando o potencial residual de biomassa na UE-27. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019 , 100 , 127–142. [Google Scholar] [CrossRef]

Ericsson, K.; Nilsson, L.J. Avaliação do potencial de fornecimento de biomassa na Europa usando uma abordagem focada em recursos. In *Anais da Conferência Mundial e Exposição de Tecnologia sobre Biomassa para Energia e Indústria ETA Florence Renewable Energies*, Roma, Itália, 10–14 de maio de 2004. [Google Scholar]

Levstek, T.; Rozman, Č. Um modelo para encontrar uma localização adequada para uma planta de microbiogás usando ferramentas SIG. *Energies* 2022 , 15 , 7522. [Google Scholar] [CrossRef]

Rozakis, S.; Bartoli, A.; Dach, J.; Jędrejek, A.; Kowalczyk-Juśko, A.; Mamica, L.; Pochwatka, P.; Pudelko, R.; Shu, K. Impacto da política no biogás regional usando uma ferramenta de modelagem modular. *Energias* 2021 , 14 , 3738. [Google Scholar] [CrossRef]

Klimek, K.; Kaplan, M.; Syrotyuk, S.; Bakach, N.; Kapustin, N.; Konieczny, R.; Dobrzyński, J.; Borek, K.; Anders, D.; Dybek, B.; e outros. Modelo de investimento de centrais de biogás agrícola para explorações agrícolas individuais na Polónia. *Energias* 2021 , 14 , 7375. [Google Scholar] [CrossRef]

Lei de 7 de julho de 1994 — Lei da Construção. Preparada com base em: Diário Oficial Consolidado de 2025, Item 418, 1080. Disponível online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu19940890414> (acessado em 10 de novembro de 2025). (Em polonês)

Lei de 13 de julho de 2023 sobre a Facilitação da Preparação e Implementação de Investimentos em Usinas de Biogás Agrícolas, bem como sua Operação, elaborada com base no Diário Oficial de 2023, item 1597, de 2025, item 527. Disponível online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20230001597> (acessado em 10 de novembro de 2025). (Em polonês)

Serviço da República da Polónia — Centro Nacional de Apoio à Agricultura. Disponível online: <https://www.gov.pl/web/kowr/odnawialne-zrodla-energii-zyskuja-sprzymierzencow2> (acessado em 10 de novembro de 2025). (Em polonês)

Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais, e não dos editores. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.





Estado atual e perspectivas da produção e utilização de biometano — uma revisão sistemática



Estado atual e perspectivas da produção e utilização de biometano — uma revisão sistemática.

Małgorzata Pawłowska * Magdalena Zdeb Marta Bis e Lucjan Pawłowski

Faculdade de Engenharia Ambiental e Energia, Universidade Tecnológica de Lublin, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, Polônia

Resumo

Diante da crescente frequência de desastres naturais resultantes das mudanças climáticas e das interrupções nas cadeias de suprimento de recursos energéticos, a demanda por vetores energéticos baseados em recursos renováveis de origem local está aumentando. O biometano, derivado da biomassa e com múltiplas aplicações no setor energético, atende plenamente a essas condições. Este artigo analisa o desenvolvimento e a distribuição espacial das usinas de produção de biometano, a prevalência dos métodos de produção e as direções de aplicação, com base em dados obtidos de bancos de dados oficiais e artigos científicos. Além disso, são consideradas as vantagens e desvantagens da produção de biometano, levando em conta os resultados das avaliações do ciclo de vida, e as perspectivas de desenvolvimento do mercado de biometano, diante dos desafios regulatórios e políticos. Os resultados da revisão indicam que a produção de biometano está atualmente concentrada na Europa e na América do Norte, que juntas geram mais de 80% do biometano produzido globalmente. Observou-se um crescimento exponencial no número de usinas de biometano e em suas capacidades de produção na última década. Partindo do pressuposto de que as estratégias globais atualmente adotadas e as regulamentações regionais e nacionais resultantes em matéria de políticas ambientais e socioeconômicas sejam mantidas, espera-se um desenvolvimento ainda mais intenso do mercado de biometano num futuro próximo.

Palavras-chave: biometano ; biocombustível gasoso ; purificação de biogás ; metanação

1. Introdução

A preocupação com o meio ambiente e a necessidade de garantir o funcionamento seguro das sociedades, especialmente diante de conflitos armados e de uma situação geopolítica incerta, tornam a transformação energética e a diversificação das fontes de energia uma prioridade na atualidade. A principal forma de alcançar esses objetivos é substituir as fontes de energia fóssil por fontes renováveis, incluindo a biomassa, que é amplamente disponível. O atual nível da tecnologia de processamento de biomassa cria amplas possibilidades para seu uso energético, tanto em instalações estacionárias quanto em motores que alimentam meios de transporte [1 , 2]. Um produto do processamento de biomassa particularmente vantajoso, do ponto de vista prático, é o combustível gasoso na forma de biometano. O prefixo “bio” indica que esse gás, diferentemente do “petrometano” derivado do petróleo bruto e produzido em processos termoquímicos, é produzido a partir da decomposição da biomassa.

O termo “biometano” surgiu na literatura científica na segunda metade da década de 1940 [3 , 4] em referência ao principal componente da mistura gasosa gerada como resultado do processo de fermentação metanogênica (CH_4) da matéria orgânica, embora o próprio processo de digestão anaeróbica, no qual o metano é produzido, já fosse bem compreendido naquela época. Sir Humphry Davy descobriu que o metano é um componente dos gases produzidos durante a digestão anaeróbica de esterco bovino já em 1808, e a primeira planta de digestão funcionou em uma colônia de leprosos em Bombaim (Índia) em 1859.

Os primeiros artigos em que o termo “biometano” foi usado tratavam principalmente da radioatividade do metano proveniente de fontes biológicas e não biológicas [3 , 4 , 5 , 6].

De acordo com os resultados da revisão de bases de dados cientométricas, cujos dados são apresentados na Figura 1a , o termo “biometano” começou a aparecer na literatura científica a partir de 2010. Anteriormente, era raro. Nos anos seguintes, o número de publicações contendo esse termo cresceu gradualmente até 2022. O maior aumento de interesse no tema do biometano ocorreu na segunda década do século XXI. Esse tema ainda está no centro dos interesses de pesquisa, embora em 2024 o aumento no número de artigos não tenha sido significativo em comparação com 2022, quando foi registrado o maior número. A média de artigos publicados por ano no período de 2021 a 2024 é de duas a três vezes maior (dependendo da base de dados) do que no período de 2011 a 2020.

Na década de 1980, o termo “biometano” começou a adquirir um significado adicional, relacionado à implementação de soluções que permitissem novas aplicações do biogás, como a incorporação na rede de gás natural ou o uso no transporte. Nesse sentido, o biometano é um produto gasoso do aprimoramento do biogás [7] ou produzido por transformação termoquímica, constituído principalmente de metano. De acordo com a definição do Departamento de Energia dos EUA, o biometano é “um gás com qualidade para distribuição em gasodutos, totalmente intercambiável com o gás natural convencional e, portanto, pode ser usado em veículos movidos a gás natural”.

Trata-se de um gás natural renovável (GNR), que foi devidamente preparado para atender a altos padrões de pureza [8].

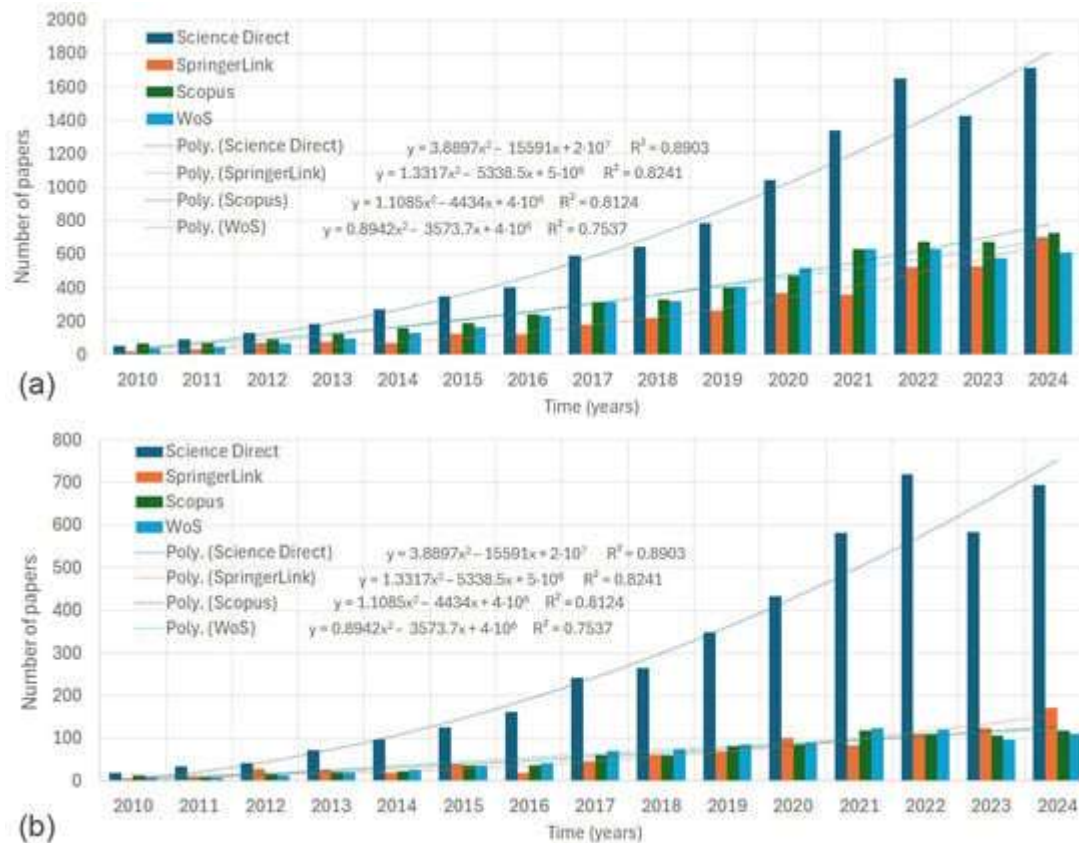


Figura 1. Resultados da pesquisa em bases de dados cientométricas para o termo “biometano” (a) e “biometano E melhoramento” (b).

O biometano normalmente contém 95–99% de metano e 1–6% de dióxido de carbono (CO_2) [9] e não difere significativamente do gás natural em termos de poder calorífico (PC) (o valor deste parâmetro é de 33 MJ/m^3 e $34\text{--}35 \text{ MJ/m}^3$ para CH_4 e gás natural, respectivamente) ou outras propriedades, podendo ser injetado sem qualquer transformação na infraestrutura de transmissão e distribuição ou nos equipamentos do usuário final [10]. É neste sentido que o termo biometano é utilizado neste artigo.

A utilização do biogás através do seu processamento em um produto com maior poder calorífico é praticada há cerca de 30 anos. Em um relatório de 1998 sobre fontes de energia limpa no transporte, Mansson mencionou o biometano produzido a partir do biogás como uma fonte de energia para o transporte, apresentou as condições para sua utilização como combustível para transporte e citou os resultados de testes com ônibus movidos a biogás realizados na Suécia [11]. No entanto, o biometano ainda é uma fonte de energia insignificante em escala mundial. O consumo global de energia primária em 2023 foi estimado em cerca de 165.000 TWh, dos quais o gás natural forneceu mais de 40.100 TWh [12], ou seja, cerca de 24%. Naquela época, a produção global estimada de biometano era de cerca de 100 TWh (estimativa baseada em dados da CEDIGAZ [13] sobre a produção de biometano em 2023, que foi de 9,5 bilhões de metros cúbicos). Assim, o biometano representou apenas 0,25% da demanda global de gás em 2023.

O interesse dos cientistas na produção de combustíveis de alto poder calorífico a partir de biogás tem crescido desde 2010. No período anterior, era insignificante. Isso é evidenciado pelo número cada vez maior de publicações encontradas em diversas bases de dados cientométricas, contendo os termos “biometano E melhoramento” (Figura 1b).

De forma semelhante ao número de artigos encontrados na busca pelo termo “biometano”, a média de artigos publicados no período de 2021 a 2024 é de duas a três vezes maior (dependendo da base de dados) do que no período de 2011 a 2020.

Artigos sobre biometano publicados nos últimos anos abordam tecnologias avançadas de pré-tratamento com o objetivo de aumentar a produção de gás [14 , 15 , 16 , 17 , 18 , 19], o desenvolvimento de novos adsorventes e materiais híbridos para o aprimoramento do biogás [20 , 21 , 22] e métodos inovadores baseados em injeções de hidrogênio [23 , 24 , 25] ou dióxido de carbono [26 , 27] em processos de biometanização in situ, o que leva ao aumento da produção de metano [28 , 29 , 30]. Detalhes sobre as atuais linhas de pesquisa no campo de métodos individuais de produção de biometano são discutidos na Seção 3 .

Atualmente, muitos métodos de produção de biometano são utilizados, e suas características são o tema de inúmeros artigos de revisão publicados ao longo dos últimos doze anos [31 , 32 , 33 , 34 , 35 , 36 , 37 , 38 , 39 , 40 , 41 , 42 , 43 , 44] . A maioria dos artigos de revisão se concentra na discussão de vários métodos de aprimoramento do biogás, mas também existem aqueles que levam em consideração métodos selecionados, por exemplo, membrana [45], lavagem com água [46], adsorção por oscilação de pressão [47], absorção química [48 , 49], métodos biológicos [50 , 51 , 52], métodos que utilizam adsorventes [53] ou se concentram em métodos termoquímicos de produção de biometano [54 , 55]. Em alguns dos artigos, foi realizada a revisão das direções das aplicações do biometano e das condições de qualidade que ele deve atender para ser aprovado para uma aplicação específica [34 , 37 , 56 , 57 , 58].

Muitos autores de artigos sobre biometano referem-se, na introdução, ao estado de disseminação desse biocombustível no mercado de energia.

No entanto, considerações específicas sobre as mudanças temporais em sua produção e métodos de uso são poucas e dizem respeito principalmente a países da União Europeia [59 , 60]. Uma perspectiva mais ampla foi demonstrada por Schmid et al. [61], que apresentaram mercados nacionais selecionados na Europa (Alemanha, Reino Unido e Suécia), Ásia (China, Japão e Coreia do Sul) e Américas do Norte e do Sul (Canadá, Estados Unidos da América e Brasil). Contudo, a maioria dos dados apresentados neste artigo refere-se aos anos anteriores a 2018. De acordo com o melhor conhecimento dos autores, não existem artigos que sintetizem os estudos que visem avaliar a rentabilidade da produção de biometano e seu impacto no meio ambiente.

Devido aos numerosos artigos de revisão publicados na literatura científica sobre métodos de produção de biometano, que foram mencionados anteriormente [31 , 32 , 33 , 34 , 35 , 36 , 37 , 38 , 39 , 40 , 41 , 42 , 43 , 44 , 45 , 46 , 47 , 48 , 49 , 50 , 51 , 52 , 53 , 54 , 55 , 56 , 57 , 58 , 59 , 60 , 61] , os autores deste artigo não se concentraram em revisões detalhadas do estado da arte das tecnologias de limpeza e aprimoramento do biogás e dos métodos termoquímicos. Eles são apresentados apenas brevemente para fornecer uma ordem lógica ao artigo. O objetivo deste artigo é avaliar o estado atual de disseminação e distribuição espacial da produção de biometano no mundo e apresentar as direções de suas aplicações.

Além disso, o escopo do artigo inclui uma análise das vantagens e desvantagens da implementação do biometano no mercado de energia, com base em dados disponíveis na literatura sobre instalações reais de produção de biometano e nos resultados da análise do ciclo de vida de instalações de produção e utilização de biometano.

2. Materiais e Métodos

Para encontrar informações que foram usadas para preparar este artigo (1) artigos científicos revisados por pares indexados nas bases de dados cientométricas Scopus, Web of Science, Science Direct, SpringerLink e Google Scholar; (2) bases de dados globais e europeias oficiais e confiáveis sobre a produção e uso de biometano; e (3) outros documentos relevantes e fontes de informação geralmente reconhecidas, disponibilizadas online pela Associação Europeia de Biogás (EBA, uma rede internacional de organizações nacionais, institutos científicos e empresas, comprometidas com a promoção da implantação da produção e utilização de biogás e biometano [7]), a Agência Internacional de Energia (IEA, uma organização internacional afiliada à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) [62], o Centro Internacional de Informação sobre Gás Natural (CEDIGAZ, a fonte de dados referenciada pelas organizações internacionais, por exemplo, IEA) [10], a Rede Europeia de Operadores de Sistemas de Transmissão de Gás (ENTSOG, uma associação responsável por uma série de tarefas regulatórias na Europa) [63], e (4) sites de instituições governamentais nacionais (por exemplo, Departamento de Energia dos EUA) foram pesquisados.

Durante a busca em bases de dados cientométricas, “biometano” (ou “biogás”, no caso da Seção 3) foi inserido como palavra-chave principal. Em seguida, dependendo do escopo da informação buscada, os seguintes termos secundários detalhados, mencionados abaixo, foram adicionados (utilizando a conjunção “e”): “métodos biológicos”, “digestão anaeróbica”, “métodos termoquímicos”, “gaseificação”, “aprimoramento” e “remoção de H₂S” (Seções 3.1 e 3.2); “produção mundial”, “produção europeia” e “número de instalações” (Seção 3.3); “biocombustível”, “combustível para transporte”, “rede de gás”, “gasoduto”, “padrões de qualidade”, “requisitos de qualidade”, “reforma a vapor”, “processos Fischer-Tropsch” e “célula de combustível” (Seção 4); “desenvolvimento de mercado”, “perspectivas de produção” (Seção 5); “pegada de carbono”, “avaliação do ciclo de vida”, “vantagens” e “desvantagens” (Seção 6). Além disso, para melhor compreender os conceitos e mecanismos dos processos de produção e aplicação de biometano, as bases de dados foram pesquisadas utilizando os seguintes termos individuais: “metanação química”, “metanação biológica”, “metanógenos hidrogenotróficos”, “fermentação acetogênica de gás”, “células eletroquímicas microbianas”, “células de eletrólise microbiana” e “metanotróficos”.

Ao preparar a introdução, a pesquisa nas bases de dados foi restringida a artigos de revisão, adicionando o termo "revisão" como palavra-chave detalhada.

De um modo geral, o foco foi na literatura dos últimos 10 anos, mas em situações justificadas, por exemplo, quando foi necessário obter uma resposta à questão sobre a evolução da pesquisa sobre “biometano” e o desenvolvimento

da tecnologia de produção de biometano, foram utilizadas fontes mais antigas, a mais antiga das quais data de 1947. Os dados bibliométricos dos artigos que continham os termos especificados mencionados na Introdução foram coletados em janeiro de 2025.

3. Métodos de produção de biometano e sua aplicação prática

A matéria-prima para a produção de biometano é a biomassa de diversas características e origens, incluindo resíduos orgânicos e subprodutos, como esterco animal, culturas energéticas, resíduos agrícolas, resíduos alimentares, lodo de esgoto, resíduos florestais e resíduos orgânicos industriais [64]. No entanto, a forma de produção de biometano pode variar significativamente. Pode basear-se em transformações biológicas ou termoquímicas, em que a biomassa (seca ou com vários graus de hidratação) é convertida em produtos gasosos, que por sua vez são processados para se obter um produto constituído principalmente de metano. Uma visão geral esquemática dos métodos de produção de biometano é apresentada na Figura 2 .

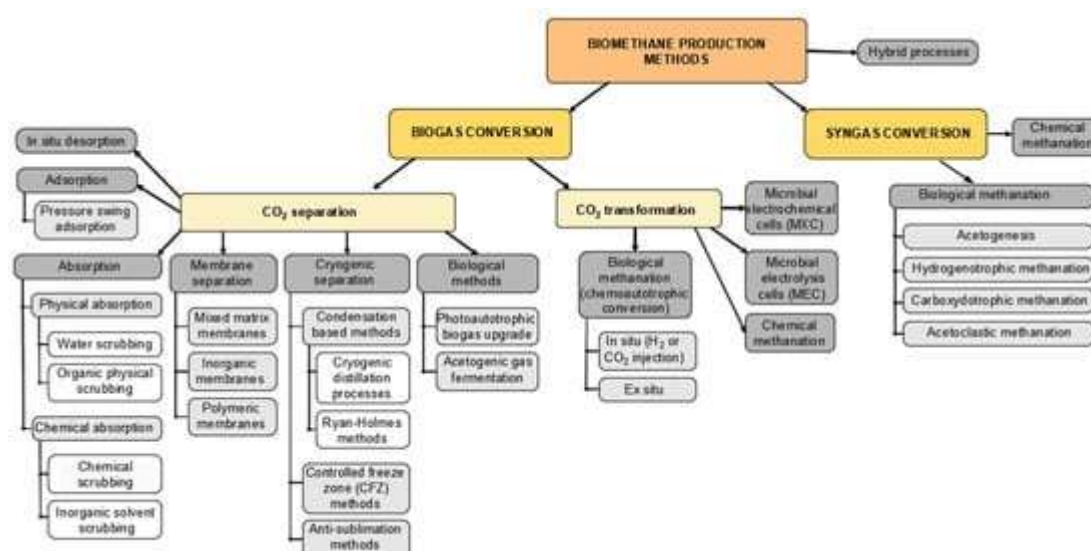


Figura 2. Visão geral esquemática dos métodos de produção de biometano.

3.1. Métodos de produção de biometano a partir de biogás

A produção de biometano, baseada em transformações biológicas, inicia-se com o processo de fermentação metânica.

Este processo, conduzido em condições estritamente anaeróbicas por um complexo consórcio de microrganismos, leva à conversão da matéria orgânica biodegradável contida na biomassa em produtos gasosos, denominados biogás. A mistura pós-fermentação — o digestato, constituído pelos compostos dissolvidos em água e resíduos sólidos da biomassa não decomposta — é o segundo produto do processo. Dependendo do tipo de tecnologia, pode-se utilizar biomassa com diferentes teores de água no processo. A biomassa utilizada na digestão anaeróbica úmida deve ter menos de 15% de sólidos totais. Em contraste com este tipo de processo, a operação com biomassa com teor de sólidos totais superior a 15% é classificada como digestão anaeróbica seca [65]. A digestão anaeróbica é geralmente conduzida em condições mesofílicas (20–43 °C, ótimas a 35–37 °C) ou termofílicas (50–60 °C, ótimas a 55 °C), mas também ocorre em temperaturas mais baixas (<20 °C), em condições psicrófilas [66].

O biogás, sendo um produto da atividade de um complexo consórcio de microrganismos que realizam os processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e fermentação [64], é uma mistura de muitos componentes.

Tipicamente, consiste em metano (40–75%), dióxido de carbono (25–50%), nitrogênio (2–8%) e muitos componentes em nível de traços, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), monóxido de carbono e vários compostos orgânicos voláteis, por exemplo, hidrocarbonetos ou siloxanos [67 , 68]. Como resultado da “limpeza” e do “enriquecimento” do biogás, essa mistura é transformada em biometano.

A limpeza do biogás visa remover impurezas indesejáveis devido à ameaça que podem causar na rede de gás natural ou nos equipamentos em que o gás será queimado. O enriquecimento do biogás envolve a remoção de CO_2 para aumentar o poder calorífico e reduzir a densidade para atender a um índice de Wobbe específico [9]. A remoção do CO_2 pode ser obtida através de sua transformação ou separação dos outros componentes do biogás [69].

Nos processos de purificação do biogás, como filtração, secagem e dessulfurização, partículas sólidas, vapor de água e sulfeto de hidrogênio são removidos. Esses procedimentos são aplicados conforme a necessidade (dependendo da concentração de poluentes, da forma de utilização do biogás, do método de purificação planejado e de condições não técnicas, como, por exemplo, econômicas). Um processo de condensação simples pode ser usado para eliminar o vapor de água, geralmente diminuindo a temperatura ou aumentando a pressão. Métodos de adsorção (por exemplo, com o uso de géis de sílica, carvão ativado ou peneiras moleculares [70]), absorção (por exemplo, com o uso de trietilenoglicol), separadores ciclônicos ou armadilhas de umidade [32] também podem ser usados.

A seleção do método apropriado de remoção de sulfeto de hidrogênio também depende da concentração da contaminação no biogás e do método de utilização do biogás, do método de purificação do biogás, da capacidade financeira, etc. O H_2S pode ser removido diretamente dentro do digestor por precipitação in situ de H_2S usando cloreto de ferro, o que resulta na formação de sulfetos metálicos insolúveis [35].

No entanto, a obtenção de gás que atenda aos requisitos rigorosos quanto ao teor de H_2S requer o uso de métodos mais eficazes baseados em processos físicos, químicos ou biológicos. Os contadores gás-líquido (lavadores) que funcionam como leitos fixos ou torres de pulverização, com água ou solvente orgânico (por exemplo, uma mistura de éteres dimetílicos de polietilenoglicol, metildietanolamina (MDEA)) atuando como líquidos de lavagem, são usados em métodos baseados em absorção física e química [33 , 71]. A adição de substâncias, como NaOH e Fe^{3+} / EDTA (ácido etilenodiaminotetracético), ao líquido de lavagem permite a alteração da relação líquido-gás devido à aceleração das reações químicas [32] . Os nanofluidos são formados pela dispersão de compostos inorgânicos (por exemplo, SiO_2 e Al_2O_3) na forma de nanopartículas ou óxido de grafeno e nanotubos de carbono em solventes orgânicos (monoetanolamina, dietanolamina, etc.) e também surgiram como potenciais absorventes para H_2S [72] . A vantagem de usar solventes orgânicos, além da alta eficiência de remoção de H_2S , é a possibilidade de remoção simultânea de CO_2 . 2 [35].

O H_2S também pode ser removido por meio de processos físico-químicos (adsorção física e quimissorção) em materiais sólidos. Óxidos de metais (como Al, Fe, Mn, Co, Cu e Zn), carvão ativado natural ou impregnado e zeólitas são frequentemente usados como adsorventes [71 , 73 , 74]. Novos tipos de adsorventes, sejam modificações de materiais existentes ou novos materiais, ainda estão sendo buscados. Alguns dos estudados recentemente incluem hematita (Fe_2O_3) ativada com óxido de cobre (II) [75], zeólitas sintéticas, por exemplo, produzidas a partir de cinzas de fundo [76], carvões ativados impregnados cataliticamente [35], estruturas metalorgânicas (MOFs) [77], por exemplo, MOFs funcionalizadas com poliaminas [78], biochar [79 , 80], biochar ativado por vapor [81].], e nanopartículas de ferro zero-valente encapsuladas em carbono [82].

O H_2S também pode ser removido do biogás devido à atividade de quimiolitotróficos e fotoautotróficos anoxigênicos [83]. A dessulfurização biológica pode ser realizada em biofiltros (por exemplo, com materiais de enchimento inovadores, como biochar modificado com magnetita ou resíduos de concreto celular) [84 , 85 , 86], bioscrubbers [32 , 35] ou biofiltros de gotejamento, por exemplo, trabalhando em condições anóxicas e inoculados com lodo ativado [87].

Também é possível utilizar métodos eletroquímicos para a remoção de H_2S da água que sai do lavador. A remoção eletroquímica de sulfeto em meio líquido pode ocorrer por oxidação ou eletroprecipitação (também chamada de eletrocoagulação).

Duas formas de processos de oxidação podem ser utilizadas: oxidação direta na superfície anódica e oxidação indireta com oxidantes gerados in situ, como O_2 , OH^- e Cl_2 [88]. Borgquist et al. [89] desenvolveram uma tecnologia baseada na forma de oxidação indireta. Em seu estudo, o cloro gerado eletroquimicamente oxidou o H_2S a enxofre sólido. O processo foi realizado em um lavador no qual o biogás entrava em contato com um líquido contendo cloro. Em tecnologias baseadas em eletroprecipitação, ânodos de sacrifício são usados para fornecer íons metálicos (por exemplo, ferro), que reagem com o sulfeto para produzir sólidos de sulfeto metálico insolúveis [90].

3.1.1. Aprimoramento do biogás por meio da separação de CO_2 . As tecnologias de purificação de biogás utilizam diferentes propriedades de componentes específicos do biogás, como a solubilidade em água ou solventes específicos, diferenças no tamanho das partículas ou no ponto de ebulição. O principal objetivo desses métodos é a separação do CO_2 , resultando na concentração de metano. Ao mesmo tempo, outros componentes indesejáveis do gás podem ser removidos, embora a eficácia dessa remoção varie de acordo com o método. Em alguns casos, a pré-limpeza do biogás para remover contaminantes residuais é necessária, pois suas altas concentrações afetam negativamente a eficácia do processo de purificação e a vida útil da instalação. Dependendo do tipo de processo subjacente ao método de purificação, eles são divididos em físicos, químicos e biológicos. Tecnologias como lavagem com água, lavagem orgânica, lavagem com aminas, PSA (aglomerante de solventes) e separação

por membranas são bem estabelecidas, enquanto processos biológicos e destilação criogênica ainda estão em desenvolvimento [91].

Os princípios básicos dos métodos de purificação de biogás mais comuns e inovadores, bem como um breve relato de estudos recentes sobre eles, são discutidos a seguir.

A adsorção por oscilação de pressão (PSA, na sigla em inglês) é um método baseado na adsorção física, no qual se utiliza a diferença no tamanho das partículas de um componente específico do biogás. As partículas de CH_4 , que são maiores do que as partículas de outros gases, não ficam retidas nos microporos da peneira e permanecem na fase gasosa, ao contrário das partículas de gases com diâmetros menores, como o CO_2 , que ficam retidas nos poros da micropeneira.

O dispositivo utilizado neste método funciona ciclicamente (adsorção-dessorção). A adsorção é realizada sob pressão elevada (4–10 bar) em um tanque (coluna) onde os gases entram em contato com um adsorvente que retém seletivamente o CO_2 . Quando o adsorvente está saturado com CO_2 , a dessorção é realizada reduzindo-se a pressão, geralmente até o vácuo [47 , 92]. Os adsorventes mais populares são peneiras moleculares de carbono, carvões ativados, zeólitas e titanossilicatos. Devido à natureza irreversível da adsorção de H_2S em adsorventes usados, é necessário pré-tratar o biogás removendo o H_2S antes de introduzi-lo na coluna de absorção, a fim de evitar perturbações neste método de melhoria [92]. Também é aconselhável remover o vapor de água do biogás antes da adsorção.

A PSA é considerada uma tecnologia madura e comumente utilizada para a separação de gases. Levando em consideração o aprimoramento do biogás, é possível produzir biometano com alta pureza e menor consumo de energia em comparação com outros processos [47]. Existem muitas unidades de PSA operando em escala industrial ao redor do mundo, com uma ampla gama de capacidades (de 400 a 15.000 m³ de biogás aprimorado por dia). As pesquisas realizadas nos últimos anos concentram-se em estudos experimentais nos quais projetos e adsorventes inovadores são testados. Abd et al. [93] estudaram o projeto não adiabático e não isotérmico de sistemas e adsorventes à base de biomassa não modificados. Canevesi et al. [94] testaram o adsorvente zeólito 4A em substituição à peneira molecular de carbono comercialmente utilizada no processo de PSA.

Considerando condições operacionais semelhantes às utilizadas em sistemas comerciais, eles obtiveram uma concentração de CH₄ superior a 98% e uma recuperação de biometano de aproximadamente 90%. Os resultados mostraram que a zeólita examinada pode ser considerada uma alternativa aos adsorventes comerciais. A modelagem de processos de purificação de biogás, que visa desenvolver as condições operacionais que garantam a obtenção de gás de alta qualidade [93 , 95], é a segunda direção importante da pesquisa em tecnologia PSA. Esses estudos se concentram em avaliar as possibilidades de conduzir o processo de forma economicamente viável em pequenas instalações (<100 m³ / dia) [96], bem como em comparações da eficiência e do consumo de energia de processos realizados em diferentes modificações tecnológicas (por exemplo,

PSA convencional, adsorção por oscilação de pressão e vácuo PVSA e processos PSA duplos) e condições operacionais [97]. De acordo com os resultados de estudos comparativos de Abd et al. [98], a tecnologia de absorção por amina é mais favorável em termos de pureza e recuperação de produtos, mas o processo PSA apresentou menor necessidade de energia com pureza de biometano comparável.

A lavagem com água, um método baseado na absorção física, utiliza a diferença na solubilidade dos componentes do biogás em água. O biogás comprimido (7–10 bar) passa em contracorrente a um fluxo de água fria. Este processo é geralmente implementado em uma coluna de enchimento [99]. Devido ao contato entre o gás e a água, substâncias com alto coeficiente de solubilidade em água, como CO_2 , H_2S e NH_3 , são dissolvidas, enquanto poeira e microrganismos são retidos [47].

O metano, que possui solubilidade muito baixa em água, é separado dos demais componentes. O biogás não requer preparação prévia para este processo. A lavagem com água é uma das principais tecnologias implementadas para o aprimoramento do biogás e um dos métodos mais econômicos [100]. Embora pesquisas ainda estejam em andamento para melhorar sua eficiência, especialmente no caso de instalações de pequena escala [100]. Nos últimos anos, as pesquisas têm se concentrado na intensificação da dissolução de componentes gasosos e no aumento da eficiência da regeneração da água.

As modificações tecnológicas para aumentar a solubilidade de compostos adversos dizem respeito principalmente à melhoria das condições de operação do lavador de gases, por exemplo, alterando suas dimensões, pressão de absorção e tipo de material de enchimento. Materiais inovadores com alta área superficial e excelente transferência de massa, como anéis Raschig super de polipropileno, resistentes a ambientes agressivos, lã de ferro, mármore calcítico e tela de arame de aço [99 , 101 , 102] foram testados como materiais de enchimento. Wantz et al. [100] propuseram o uso de enchimento anisotrópico, cujas propriedades variam com a altura da coluna, e o uso de vácuo para melhorar a regeneração da água. Essas operações resultaram na obtenção de um gás com concentração de CH₄ superior a 97%. Os estudos foram conduzidos em uma instalação protótipo em escala real, desenvolvida e implementada em um digestor anaeróbio em escala agrícola.

A lavagem física orgânica é um método baseado na absorção física, no qual se utiliza a diferença de solubilidade dos componentes do biogás em solventes polares ou apolares.

A solubilidade do CO₂ no solvente orgânico é significativamente maior do que na água; portanto, o lavador requer uma vazão volumétrica muito menor do que quando se utiliza um lavador de água [103]. O gás é comprimido a 7–8 bar e resfriado a cerca de 20 °C antes de entrar no lavador para aumentar a solubilidade do CO₂. O lavador é preenchido com um material que aumenta a superfície de troca. A regeneração do solvente é obtida pelo aquecimento do líquido a cerca de 80 °C [56 , 91].

O biogás não precisa ser pré-tratado para esse processo de purificação, embora a pré-remoção de H_2S facilite a regeneração do solvente [57]. Os principais processos de purificação de biogás disponíveis comercialmente utilizam os solventes específicos Genosorb, Purisol, Selexol, Rectisol ou Sepasolv [37].

A lavagem química, um método baseado na absorção química, utiliza a diferença na reatividade dos componentes do biogás com aminas (monoetilamina (MEA), dimetilamina (DEA), metildietanolamina (MDEA), diglicolamina (DGA), diisopropanolamina (DIPA) e aminometilpropanol (AMP) que constituem o solvente [104 , 105]. O estudo conduzido por Morero et al. [106] mostrou que a DGA foi a mais vantajosa em comparação com as outras três aminas devido ao maior nível de purificação do biogás (concentração de CH_4 97,3%) e ao menor consumo de energia do refulvedor. Além disso, a DGA é seletiva para a absorção de CO_2 na presença de H_2S [104]. O CO_2 contido no biogás que passa em contracorrente com a corrente de uma solução contendo aminas reage com elas, formando sais de amina. O gás que entra no lavador é comprimido para atingir a pressão de aproximadamente 2 bar, e a temperatura varia de 20 °C até 65 °C, dependendo tipo de amina selecionada [56 , 91].

O absorvente saturado é aquecido em uma torre de regeneração, liberando CO_2 . A remoção preliminar de H_2S do biogás é crucial para evitar a degradação da amina [32 , 47 , 107]. A lavagem com amina líquida demonstrou fornecer a maior pureza de CH_4 , superior a 99%, com a maior recuperação de CH_4 em comparação com outras tecnologias [5 , 6 , 7 , 97].

De acordo com um estudo comparativo de Jabraeelzadeh et al. [105], os maiores custos totais de capital para a implementação do sistema de lavagem química foram observados quando se utilizou MEA, enquanto os menores foram observados quando se utilizou AMP. A diferença foi estimada em mais de 40%. O uso de MEA resulta nos maiores lucros operacionais.

A dessorção in situ é um método que utiliza a solubilidade significativamente maior do CO₂ em água em comparação com o CH₄ . O lodo com dióxido de carbono dissolvido é transportado do biorreator para a coluna de dessorção, onde o CO₂ é removido do lodo por meio de um fluxo contracorrente de ar ou nitrogênio. O lodo livre de CO₂ retorna ao biorreator [108].

A separação por membrana é um método que utiliza as diferenças nos potenciais químicos das substâncias em ambos os lados da membrana, causadas por diferenças de pressão, concentração ou temperatura. A estrutura da membrana permite que apenas algumas moléculas passem para o lado do permeado, enquanto outras moléculas saem das fibras pelo lado retentor. A capacidade de passagem através da membrana depende do tamanho e da hidrofiliicidade das moléculas. No caso dos componentes do biogás, essa capacidade aumenta na seguinte ordem: CH₄ < CO₂ .

O retentado é, portanto, enriquecido com CH₄ , enquanto o permeado coletado no lado oposto da membrana contém gases ácidos [33 , 47]. A pré-remoção de H₂S e H₂O do biogás é recomendada neste método de purificação [57].

A tecnologia de membranas é amplamente implementada em aplicações em escala real. O desenvolvimento dessas tecnologias em processos de purificação de metano está caminhando para a busca de membranas novas, mais eficientes e duráveis. Koutsiantzi et al. [109] examinaram o uso de membranas comerciais de poliimida de fibra oca em uma planta piloto para purificação de biogás em uma estação de tratamento de esgoto municipal em Thessaloniki. Os resultados mostraram uma recuperação média de CH_4 de 95,7% e a concentração média de CH_4 no produto final foi de aproximadamente 82,4%. A baixa pureza resultou da alta concentração de N_2 , proveniente do método aplicado de remoção de H_2S do biogás. No entanto, o N_2 não afetou a permeação de CO_2 através da membrana. A concentração esperada de CH_4 , assumindo a ausência de N_2 no biogás, seria de 99,8%. De acordo com Rodero et al. [110], poliimidas à base de 6FDA e polímeros de microporosidade intrínseca são materiais promissores para o desenvolvimento de tecnologias de membrana na purificação de biogás. Além disso, a formação de membranas de matriz mista (MMMs) pela incorporação de cargas como estruturas metalorgânicas ou zeólitas na matriz polimérica aumenta significativamente o desempenho geral, incluindo a permeabilidade ao CO_2 e a seletividade $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$.

A separação criogênica é um grupo de métodos que se baseia na diferença de condições (temperatura e pressão) das mudanças de fase do CO_2 e do CH_4 .

Podem ser considerados os métodos baseados em condensação (por exemplo, o processo de destilação criogênica e os métodos de Rayan-Holmes), o método da zona de congelamento controlada (ZCC) e os métodos antissublimação.

No caso do método baseado em condensação, a diferença nos pontos de ebulição do metano e do dióxido de carbono é a base para a separação desses gases.

O método ZCC baseia-se no congelamento e derretimento controlados do CO_2 em uma coluna de destilação especialmente projetada [111]. No método baseado em antissublimação, a solidificação do CO_2 ocorre nas superfícies do trocador de calor ou em uma caixa fria [91 , 112 , 113]. Uma das soluções utilizadas em tecnologias convencionais é a redução gradual da temperatura a pressão constante [114].

Gradualmente, com a redução da temperatura, o vapor de água, o H_2S e os siloxanos são removidos do biogás, seguidos pelo CO_2 , com ponto de ebulição de $-78\text{ }^\circ\text{C}$ (para o metano, esse parâmetro é igual a $-160\text{ }^\circ\text{C}$) [35 , 115].

Outra opção tecnológica de separação criogênica consiste na compressão em múltiplos estágios, até 80 bar, do biogás previamente seco [45]. A comparação da eficiência e do consumo de energia de três métodos de separação criogênica: o método de Ryan-Holmes, o processo de destilação a baixa temperatura com dupla pressão e o processo de antissublimação, mostrou que o processo de destilação a baixa temperatura com dupla pressão apresenta as características mais favoráveis nesses aspectos [112]. O processo criogênico de purificação do biogás atrai atenção devido à possibilidade de produção de biometano de alta pureza e ao potencial de integração com o processo de produção de bio-GNL.

Nos últimos anos, tecnologias baseadas em processos híbridos de separação de gases criogênicos-membrana têm sido implementadas para fins de separação de gases, sendo também eficazes no caso do aprimoramento do biogás. Elas são caracterizadas por alta relação custo-benefício e eficiência energética [116].

Os métodos biológicos incluem o método de purificação de biogás fotossintético (fotoautotrófico), que envolve a captura de CO_2 do biogás por microalgas eucarióticas ou cianobactérias procarióticas, utilizando a luz como fonte de energia. O carbono contido no CO_2 é então incorporado por esses microrganismos em sua biomassa [51 , 117 , 118]. Como resultado desse processo, o metano no biogás é concentrado e as algas sintetizam diversos produtos, considerados de valor agregado, que podem ser utilizados nas etapas subsequentes do processo. De acordo com Mendez et al. [119], a concentração máxima de CH_4 no biogás produzido a partir de lodo misto purificado em um sistema algal-bacteriano piloto ao ar livre foi de 91%. A tecnologia de algas é considerada mais ecológica e economicamente viável do que o processo de purificação de biogás quimioautotrófico, devido à sua capacidade de remover CO_2 e H_2S em um único estágio. Outro método biológico de remoção de CO_2 do biogás é a fermentação acetogênica do gás. Este processo envolve a conversão de CO_2 em líquidos valiosos por microrganismos, incluindo homoacetógenos (que usam hidrogênio para reduzir o dióxido de carbono a ácido acético através da via do acetil-CoA) e acetógenos sintróficos (que usam AGVs como substratos para a produção de ácido acético).

Nos últimos anos, têm sido procurados adsorventes novos, baratos e de fácil acesso que possam ser usados em instalações de pequena escala ou em países em desenvolvimento. Esses materiais incluem solos naturais, argilas, materiais derivados de resíduos, carvão ativado produzido a partir de resíduos sólidos, limalha de ferro residual e cinzas de biomassa, composto e biochar [121 , 122 , 123]. Jepleting et al. [121] mostraram que, por meio de preparações preliminares adequadas desses materiais, modificações das propriedades da superfície, combinação com outros materiais e regeneração, sua eficiência na remoção de impurezas aumenta, chegando a mais de 90%. Por exemplo, a eficiência de remoção do solo marrom da Nova Zelândia, rico em ferro, foi de 93,8%. Sorbentes híbridos, como carvões ativados derivados de bambu, sorventes de estruturas metalorgânicas, suspensão porosa formada com zeólita ZIF-8 e isoparafina C16 e misturas líquidas porosas de zeólita Rho com solvente Genosorb também foram usados para remoção de CO₂ [124 , 125 , 126].

3.1.2. Aprimoramento do biogás via transformação de CO₂

Em contraste com os métodos discutidos anteriormente para aumentar o poder calorífico do biogás pela remoção de CO₂ e outros componentes, estes métodos baseiam-se na conversão de CO₂ em metano através de um processo conhecido como metanação. Dependendo do catalisador utilizado, este processo é classificado como metanação química ou biológica. A metanação pode ser realizada diretamente no biogás ou indiretamente (no fluxo de CO₂ separado durante os processos descritos na Secção 3.1.1 [141]).

A metanação química utiliza catalisadores para aumentar significativamente a taxa de reação de óxidos de carbono (CO_2 ou CO) com hidrogênio (H_2), para produzir metano e água (Equações (1) e (2)). Este processo permite a produção de gás natural substituto (GNS) não apenas a partir de biogás, mas também, principalmente, a partir de gás sintético (syngas) e CO_2 de exaustão capturado [142].



(1)



(2)

A metanação catalítica normalmente ocorre em uma faixa de temperatura de 200 a 550 °C e sob pressões que variam de 1 a 100 bar [52 , 143]. Comparada à metanação de CO , que é operada comercialmente a 300 °C e 25 bar, a metanação de CO_2 pode exigir condições operacionais mais severas [144]. A metanação química de CO_2 em temperaturas elevadas (em torno de 400 °C) foi demonstrada pela primeira vez por Sabatier e Senderens em 1902 usando um catalisador de níquel (Ni) [145]. Muitos outros catalisadores, como rutênio (Ru), ródio (Rh), cobalto (Co), platina (Pt), paládio (Pd), manganês (Mn), cobre (Cu) e lantânio (La) suportados em vários óxidos metálicos, como SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 e CeO_2 , foram testados para a metanação de CO_2 como catalisadores básicos [146, 147, 148, 149, 150] .

No entanto , os catalisadores à base de Ni continuam sendo os mais utilizados devido à sua alta atividade , seletividade e custo-benefício [151]. Geralmente, os mesmos catalisadores são eficazes tanto para a metanação de CO quanto para a de CO₂ , embora o CO₂ ofereça maior seletividade para CH₄ [152] .

O principal obstáculo ao crescimento e comercialização dos processos de metanação é a obtenção de hidrogênio [153], que se deve em grande parte aos elevados custos de produção. A fonte de hidrogênio utilizada no processo impacta significativamente tanto os custos como a pegada de carbono [92].

O custo de produção de hidrogênio varia de 1,3 a 2,13 USD/kg H₂ , dependendo do método de produção. Os métodos que permitem a obtenção de combustível renovável, como gaseificação ou pirólise, e aqueles baseados em processos biológicos são os mais caros [154]. Devido à ampla gama de aplicações do hidrogênio, a competição no mercado pode ser um importante fator limitante para a disseminação dos processos de metanação. O hidrogênio é utilizado como fonte de energia em transportes, produção de calor e energia, em metalurgia como agente redutor (por exemplo, na produção de ferro e aço), como agente em processos de hidrocracking e hidrotratamento no refino de petróleo, como substrato para a produção de amônia, etc. [155 , 156 , 157 , 158 , 159]. O transporte e o armazenamento de hidrogênio também apresentam desafios. O hidrogênio deve ser mantido sob altíssima pressão de compressão ou a baixíssima temperatura [160].

A liquefação do hidrogênio ocorre a uma temperatura de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, a essa temperatura, o gás deve ser armazenado em um tanque isolado. O H_2 comprimido requer o uso de tanques pesados e pressurizados. O custo do transporte é, portanto, muito alto [161].

Uma fonte eficiente de hidrogênio é necessária para garantir a estabilidade e a continuidade do processo de metanação. Na maioria das vezes, o hidrogênio é produzido por eletrólise da água [92]. No entanto, para manter a sustentabilidade do processo, a eletricidade utilizada deve provir de fontes renováveis, como a solar e a eólica [162]. A tecnologia na qual o hidrogênio usado para a metanação do CO_2 é produzido por eletrólise da água utilizando energia de uma fonte renovável é denominada Power-to-Gas (PtG). A tecnologia PtG integra sistemas elétricos e de combustível, armazenando o excesso de eletricidade renovável na forma de CH_4 [52]. A combinação da produção de LBM com o conceito PtG oferece um caminho para reduzir as emissões de CO_2 e aumentar a produção de biocombustível que substitui o gás natural. Estudos de Hashemi et al. [163], incorporando análises de exergia e custo, demonstraram que a metanação direta integrada do biogás é mais vantajosa do que a metanação indireta do CO_2 capturado durante os processos de purificação do biogás.

O esquema integrado com metanação direta de biogás aumentou a produção de LBM em 52,2% em comparação com uma instalação convencional de produção de LBM, embora com métodos de menor eficiência exergética.

A aplicação da metanação de CO_2 em plantas de produção de biometano liquefeito (LBM) é um método para reduzir sua pegada de carbono, visto que o CO_2 capturado durante o aprimoramento do biogás é normalmente liberado na atmosfera. As vantagens da metanação direta do biogás usando hidrogênio da eletrólise em relação à metanação do dióxido de carbono separado do biogás também foram observadas por Calbry-Muzyka e Schildhauer [141] e Chatzis et al. [52].

Os pesquisadores destacam os custos mais baixos devido à eliminação da etapa de separação de CO_2 e ressaltam o papel promissor do biometano no armazenamento sazonal de energia renovável na rede de gás natural.

Como parte da pesquisa sobre a tecnologia Power to Gas (PtG), Mercader et al. [164] examinaram a adequação da zeólita 5A para uso na tecnologia de Reação de Sabatier Aprimorada por Sorção (SESaR), que é uma alternativa aos processos convencionais de metanação química. Essa tecnologia utiliza a adição de um absorvente de água a um leito catalítico. A remoção da água, que é um dos produtos da reação, pode acelerar a conversão dos reagentes, mesmo além dos limites resultantes do equilíbrio da reação. Os resultados do estudo confirmaram que a adição da zeólita LTA 5A ao catalisador $\text{Ni-Fe/Al}_2\text{O}_3$ melhorou o desempenho do catalisador e minimizou a produção de CO.

A metanação biológica também se baseia na reação de Sabatier (Equação (1)) [52].

No entanto, as fontes de H_2 que participam no processo variam, desde fontes externas, por exemplo, eletrólise da água, até à produção interna em biorreatores de metanação. São conhecidos vários métodos de metanação que empregam microrganismos.

Os métodos de aprimoramento de biogás quimioautotróficos, também chamados de bioconversão de CO_2 assistida por H_2 , baseiam-se na atividade de metanogênicos hidrogenotróficos que podem utilizar H_2 para converter CO_2 em CH_4 [51]. Os metanogênicos hidrogenotróficos pertencem a arqueias estritamente anaeróbias que utilizam H_2 como doador de elétrons e CO_2 como fonte de carbono [165].

As espécies mais comuns de metanogênicos hidrogenotróficos encontradas em digestores anaeróbios pertencem aos gêneros *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanothermus*, *Methanococcus*, *Methanogenium* e *Methanothermobacter* [166, 167]. A metanação biológica ocorre em condições mesofílicas ou termofílicas (35–65 °C) e a pressões de até 10 bar [168]. Apresenta alta tolerância a contaminantes como sulfeto de hidrogênio (H_2S) e amônia (NH_3), reduzindo a necessidade de extenso pré-tratamento de biogás [52].

De acordo com Strübing et al. [169], a produção de biometano altamente eficiente pode ser obtida em reatores de leito fixo (RLFs). Feickert Fenske et al. [170] examinaram a possibilidade de melhorar a eficiência da metanação biológica em um reator de leito fixo em escala piloto, alterando o fluxo de gás através do reator para um fluxo em pistão.

Eles afirmaram que a aplicação do gás de alimentação na direção de cima para baixo e a interrupção do gotejamento do líquido de processo através do leito de enchimento melhoraram o fluxo de gás. Os resultados da metanação biológica realizada em um RLF em escala piloto, sob condições reais de uma estação de tratamento de águas residuais, mostraram a possibilidade de obter produção de gás a longo prazo com qualidade de gás natural sintético [171]. Chatzis et al. [52] fizeram uma revisão do estado do conhecimento e da implementação da metanação biológica na Europa. Eles confirmaram que o reator de leito fixo é o tipo de reator mais promissor para a biometanação. Thema et al. [172] examinaram a metanação biológica de CO_2 em TBR usando uma cultura pura de arqueas metanogênicas termofílicas *Methanothermobacter thermoautotrophicus* IM5.

A concentração de CH_4 no produto final foi superior a 98%. A adição de N_2 como gás de arraste durante a fase inicial, o fornecimento de amônio e sulfeto de sódio como fontes de nitrogênio e enxofre e o controle de espuma foram fatores importantes para melhorar a eficiência do processo.

As tecnologias de metanação biológica podem ser divididas em (a) metanação in situ, na qual H_2 ou CO_2 são injetados diretamente em um digestor anaeróbio, onde são convertidos em CH_4 por bactérias hidrogenotróficas, e (b) metanação ex situ, na qual hidrogênio e biogás são injetados em um biorreator separado no qual bactérias hidrogenotróficas convertem CO_2 e H_2 derivados do biogás em CH_4 [91 , 173].

A injeção de dióxido de carbono no digestor anaeróbio é outro tipo de metanação direta. A pesquisa sobre os mecanismos desse processo e seus determinantes ainda está em andamento, e os resultados obtidos em escala laboratorial e piloto indicam o significativo potencial desse método de produção de biometano. Muitos pesquisadores [174 , 175 , 176] demonstraram um aumento na eficiência da produção de biometano sob a influência da injeção de CO_2 em digestores anaeróbios. Tao et al. [176] observaram um processo estável de produção de biogás com teor de CH_4 superior a 90% durante a digestão de resíduos alimentares e lodo de esgoto. No entanto, nem todos os pesquisadores obtiveram um aumento na produção de metano após a aplicação de CO_2 . Castel et al. [27], que realizaram estudos piloto utilizando CO_2 exógeno em plantas de biogás com matérias-primas agrícolas padrão, não demonstraram nenhuma melhoria significativa nos rendimentos de biometano. Além disso, eles observaram um efeito prejudicial da injeção de CO_2 em alta taxa (12 NL/h), mantida por 3 h por semana, na produção de metano.

A redução de CO_2 a acetatos por homoacetógenos, seguida da conversão em metano via metanogênese acetoclástica, é um mecanismo proposto para o processo [177]. Estudos indicam que o processo requer tamponamento de pH devido a alterações na solubilidade do CO_2 e na estabilidade dos consórcios microbianos no reator. Pesquisas adicionais na área de métodos de produção de metano utilizando injeção de CO_2 estão direcionadas para a modificação das condições favoráveis ao desenvolvimento de metanogênicos hidrogenotróficos.

Para esse fim, modificadores como ferro zero-valente [29] e biochar de bambu [30], que alteram as condições no reator, estão sendo estudados. O ferro zero-valente é um doador de elétrons com melhores capacidades em comparação com outros materiais à base de ferro. Observou-se que a injeção de CO_2 e a introdução de ferro zero-valente no biorreator de fermentação metanogênica aumentaram a produção de metano a partir de resíduos alimentares em até 44% em comparação com a amostra controle. Isso foi possível devido a um aumento significativo na eficiência da hidrólise de proteínas, polissacarídeos e lipídios, e consequentemente na sua acidogênese. Observou-se um aumento no número de *Methanobacterium* [29], que pertence ao grupo de metanogênicos redutores de CO_2 . A possibilidade de obtenção de ferro a partir dos resíduos reduz os custos e representa uma vantagem adicional [178]. O biochar melhora as condições de solubilidade do CO_2 e aumenta a estabilidade microbiana, atuando como estabilizador de pH e transportador de elétrons.

O uso combinado de biochar e injeção de CO_2 levou a um aumento de aproximadamente 43% na produção específica de metano [30]. Yang et al. [179] estudaram a adaptação de bactérias em um reator de fermentação às mudanças nas condições resultantes de alterações na razão molar H_2 / CO_2 . Microorganismos adaptados foram introduzidos em um sistema de digestão anaeróbia intermitente com alta concentração de sólidos. Observou-se um efeito benéfico da bioaugmentação com esses metanogênicos hidrogenotróficos altamente eficientes na produção de metano. Esta aumentou em aproximadamente 34%. A

vantagem de usar CO_2 como fator de intensificação da produção de biometano em comparação com H_2 é a maior disponibilidade de CO_2 , que também pode ser um subproduto de outros processos, por exemplo, combustão de biomassa. O upcycling deste gás é, portanto, possível, o que contribui para a sustentabilidade ambiental [174].

Apesar das limitações resultantes do efeito distorcivo do H_2 ou CO_2 na atividade dos microrganismos metanogênicos, a pesquisa indica que a metanação in situ pode ser usada com sucesso. Embora a metanogênese não seja perturbada pela injeção de hidrogênio na metanação ex situ, o processo é limitado pelos custos de instalação mais elevados resultantes de biorreatores adicionais [91].

As células eletroquímicas microbianas (MXC) — a produção de metano a partir de CO contido no biogás — são suportadas por um sistema bioeletroquímico chamado eletrometanogênese (EM) [180]. Nesse processo, o CO_2 é reduzido a CH_4 por um biocátodo usando elétrons ou H_2 produzido por eletrólise da água alimentada por energia renovável [181].

Metanogênicos hidrogenotróficos foram identificados como os microrganismos dominantes atuantes no cátodo neste sistema [182].

Células de eletrólise microbiana (MEC) — neste sistema, os elétrons usados para a redução de CO_2 são liberados por bactérias durante a oxidação de compostos orgânicos no ânodo e então combinados com prótons para produzir H_2 .

O H_2 produzido é então utilizado no cátodo para reduzir CO_2 , resultando na produção de biometano ou outras matérias-primas, como acetato [50].

Devido às condições amenas de temperatura e pressão, os métodos biológicos são mais vantajosos, pois reduzem significativamente o consumo de energia e os requisitos de equipamentos. Isso resulta em custos mais baixos e menor impacto ambiental. Além disso, as tecnologias biológicas demonstram maior tolerância a contaminantes do gás de alimentação, como sulfeto de hidrogênio ou amônia, resultando em custos mais baixos de preparação preliminar do gás [52].

3.2. Produção de biometano a partir de gás de síntese

A produção de biometano, que se baseia fundamentalmente em transformações termoquímicas, inicia-se com processos de gaseificação ou pirólise conduzidos a altas temperaturas, variando de algumas centenas a $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [183]. Para resultados ótimos, a biomassa utilizada nesses processos não deve conter mais de 15% de água [184]. Assim, a etapa de pré-secagem é frequentemente necessária.

Nos processos de gaseificação e pirólise, que ocorrem sob diferentes condições quanto à disponibilidade de oxigênio, a gaseificação requer o fornecimento de oxigênio (na forma de ar, oxigênio puro ou vapor de água, mas em quantidades limitadas abaixo dos valores estequiométricos de oxidação) [184 , 185]. A pirólise ocorre em atmosfera inerte [186]. Os processos termoquímicos produzem produtos de fases e composições químicas variadas.

Na gaseificação, predominam os produtos gasosos, constituídos principalmente por H_2 , CO , CO_2 e CH_4 [184]. Em contraste, a pirólise produz predominantemente produtos líquidos ou sólidos, com o gás de pirólise resultante contendo H_2 , CH_4 , gases de hidrocarbonetos ($C_2 - C_4$), CO , CO_2 e H_2S [186]. A mistura gasosa produzida a partir do processamento termoquímico da biomassa, conhecida como gás de síntese, pode ser utilizada como fonte de biometano através de conversão termoquímica ou biológica [10].

As vias de conversão do gás de síntese em metano ocorrem por meio de metanação química ou biológica.

Os processos de metanação química do gás de síntese seguem as reações apresentadas nas Equações (1) e (2). Para a metanação termoquímica, o gás de síntese deve ser pré-tratado por meio da remoção de alcatrão e água, condicionamento do gás e limpeza (por exemplo, remoção de H_2S e HCl) antes do processo de metanação [183]. Após a metanação, qualquer CO_2 e água remanescentes são removidos [10]. Os processos de metanação química são amplamente utilizados para produzir gás natural sintético (GNS) a partir de gás de síntese derivado de combustíveis fósseis [187 , 188].

A experiência sueca adquirida durante a operação de longo prazo de uma planta produtora de gás de síntese a partir de biomassa lenhosa em Gotemburgo — com capacidade de produção de 20 MW de biometano injetado na rede de gás natural — demonstrou que a tecnologia na qual o gás de síntese produzido a partir de biomassa é convertido em CH_4 por meio de metanação química pode ser implementada de forma eficiente em escala comercial.

A qualidade do biometano resultante atendeu ao padrão europeu para injeção na rede de gás natural [189].

Os métodos biológicos para converter os componentes do gás de síntese (CO , CO_2 e H_2) em metano envolvem vários processos, incluindo acetogênese, metanação hidrogenotrófica, metanação carboxidotrófica e metanação acetoclástica [190].

Uma via para a produção de biometano segue a rota do acetato, onde os componentes do gás de síntese são primeiro convertidos em acetatos (acetogênese), que são então transformados em metano (metanação acetoclástica).

No estágio inicial do processo, acetógenos como *Acetobacterium woodii* e *Enbacterium limosum* desempenham um papel fundamental. Os acetatos, que são produtos do seu metabolismo, são posteriormente convertidos em metano por bactérias metanogênicas, como *Methanosarcina barkeri*. Outra via — quimioautotrófica — depende da capacidade dos metanogênicos hidrogenotróficos de converter H_2 e CO_2 em CH_4 [191].

O CO presente no gás de síntese pode ser convertido diretamente em CH_4 por metanogênicos carboxidotróficos ou indiretamente através de sua conversão em acetatos por acetógenos carboxidotróficos, que são então submetidos à metanação acetoclástica [191 , 192].

Aryal et al. [193] investigaram a eficiência da produção de biometano a partir de gás de síntese usando um método biológico em um sistema de reator de leito fixo alimentado. O estudo utilizou esterco ou lodo como inóculo microbiológico. O gás de síntese metanizado resultante ainda continha uma alta concentração de CO_2 e não atendia aos padrões para biometano com qualidade de gás natural. Portanto, H_2 exógeno foi introduzido no reator, resultando em um aumento na concentração de CH_4 para $95,3 \pm 1,0\%$.

Uma abordagem combinada termoquímica e biológica também pode ser usada na produção de biometano, por exemplo, usando a reação de deslocamento do gás de água (WGS) para produzir CO_2 e H_2 a partir da reação de CO com H_2O . Esta reação ocorre em temperaturas que variam de 200 a 500 °C na presença de um catalisador, frequentemente à base de Fe ou Cu [194]. Os produtos da reação resultantes são então convertidos em metano por metanogênicos hidrogenotróficos [191].

Apesar de diversas vantagens em comparação com os processos termoquímicos — incluindo versatilidade quanto às proporções dos componentes individuais do gás de síntese (CO/CO_2 e H_2) , o uso de biocatalisadores de baixo custo, condições operacionais mais brandas, maior tolerância a contaminantes do gás de síntese e baixa sensibilidade a alterações na relação C/H [195 , 196].

A metanação biológica permanece em estágio de laboratório e demonstração. Uma das principais limitações dos processos biológicos é a baixa taxa de transferência de massa de H_2 e CO para o ambiente de reação. Isso se deve à baixa solubilidade desses gases em água e à lenta taxa de crescimento dos

microrganismos anaeróbios. Como resultado, a produção volumétrica de metano permanece baixa [190].

Em resumo, os substratos para o processo de metanação, que resulta na produção de biometano, podem ter diversas origens, e processos de naturezas distintas podem ser combinados em várias configurações. A fonte de CO_2 pode ser o biogás (o CO_2 pode ser utilizado tanto de forma separada durante o processo de purificação quanto como componente remanescente na mistura gasosa), os gases de combustão da biomassa ou o gás de síntese produzido pela conversão termoquímica da biomassa. Além disso, o CO_2 pode ter origem em processos biológicos, como a fermentação alcoólica ou a fermentação escura. A principal fonte de CO é o gás de síntese produzido a partir da biomassa, enquanto o H_2 pode ser obtido por meio de processos termoquímicos (a partir do gás de síntese produzido a partir da biomassa) ou em processos biológicos, como a fermentação escura ou a fermentação clara (fotofermentação). O hidrogênio também pode ser gerado por meio da fotólise da água, embora nesse processo o substrato não seja a biomassa — o método de produção de hidrogênio é simplesmente de natureza biológica. No entanto, a eletrólise da água é considerada o método mais promissor para a produção de hidrogênio.

Embora esse hidrogênio não seja classificado como bio-hidrogênio, se a eletricidade utilizada em sua produção provém de fontes renováveis, ele não impacta negativamente o meio ambiente (hidrogênio verde).

Além disso, quando combinado com CO₂ produzido a partir de biomassa, possibilita a produção de biocombustível.

3.3. Divulgação dos Métodos de Produção de Metano

O principal método de produção de biometano em todo o mundo é o aprimoramento do biogás. Em 2018, cerca de 90% do biometano foi produzido dessa forma [10]. De acordo com dados da AIE, em 2018, as tecnologias para produção de biometano utilizando gaseificação de biomassa em escala técnica estavam operacionais apenas na Europa e na América Central e do Sul. Na Europa, aproximadamente 10% do biometano foi produzido dessa forma, enquanto na América Central e do Sul, representou cerca de 12% da produção total da região [10].

De acordo com a IEA Bioenergy Task 37, no final de 2019, existiam 606 instalações de produção de biometano nos 15 países membros (10 países europeus, Canadá, Coreia do Sul e Brasil), em comparação com 428 em 2015 [10 , 197].

Ao longo de quatro anos, o número de instalações de purificação de biogás para injeção na rede ou utilização como combustível aumentou em cerca de 40%. A maioria destas instalações na Europa está localizada na Alemanha, no Reino Unido e na Suécia [198].

No entanto, esta análise não inclui instalações em países não membros da Task 37, que somavam 72 no final de 2019.

De acordo com a CEDIGAZ [13], quase 60% do biometano produzido globalmente foi purificado utilizando tecnologias de lavagem com água e separação por membrana. Esses dados estão em consonância com a análise realizada pela IEA Bioenergy Task 37 com base nos dados dos países membros em 2015 e 2019 (Figura 2). A participação combinada das tecnologias de lavagem com água e separação por membrana representou aproximadamente 56,1% e 58,4% em 2015 e 2019, respectivamente. Essas tecnologias também predominaram entre as instalações relatadas por países não membros, como China, Japão, Hungria, Islândia, Noruega, Luxemburgo, Espanha e EUA.

Em 2019, o número de instalações que utilizavam essas tecnologias era semelhante, embora em 2015 as instalações de lavagem com água superassem as baseadas em membranas em 72%. Assim, entre 2015 e 2019, houve um aumento de 97% nas instalações baseadas em membranas, enquanto as instalações de lavagem com água cresceram apenas 20%. Deve-se notar, no entanto, que esses dados estavam incompletos [198]. Além disso, parece haver pouco interesse em tecnologias que utilizam solventes orgânicos (Figura 3).

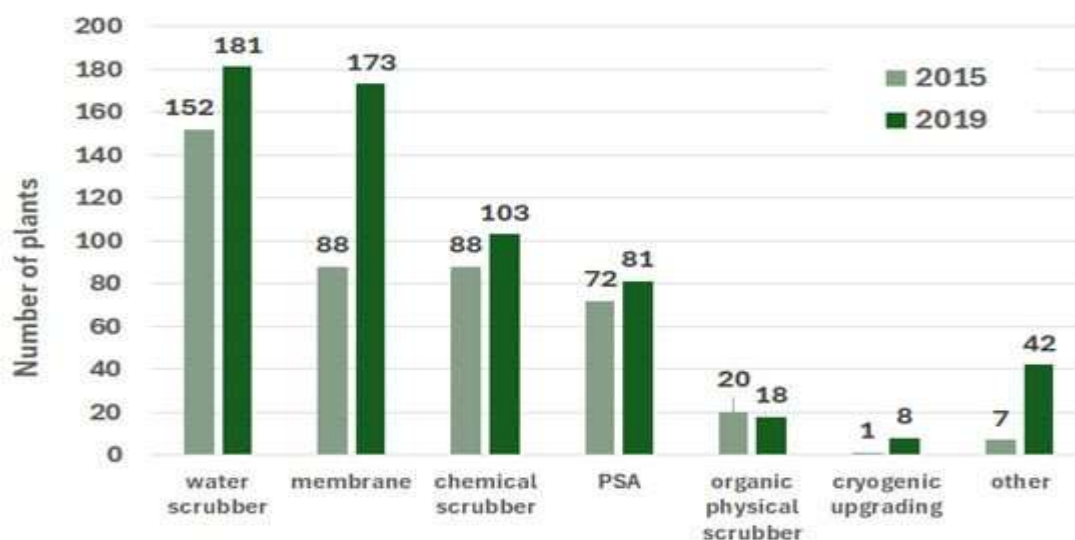


Figura 3. Número de usinas de melhoramento de biogás nos países membros da IEA Task 37: dados até o final de 2015 [197]; dados até o final de 2019 [198].

Como pode ser observado nos dados apresentados na Figura 4 , a tecnologia de lavagem com água detém a maior participação no mercado global (cerca de 30%), enquanto a tecnologia de membrana vem ganhando popularidade nos últimos anos (cerca de 29%).

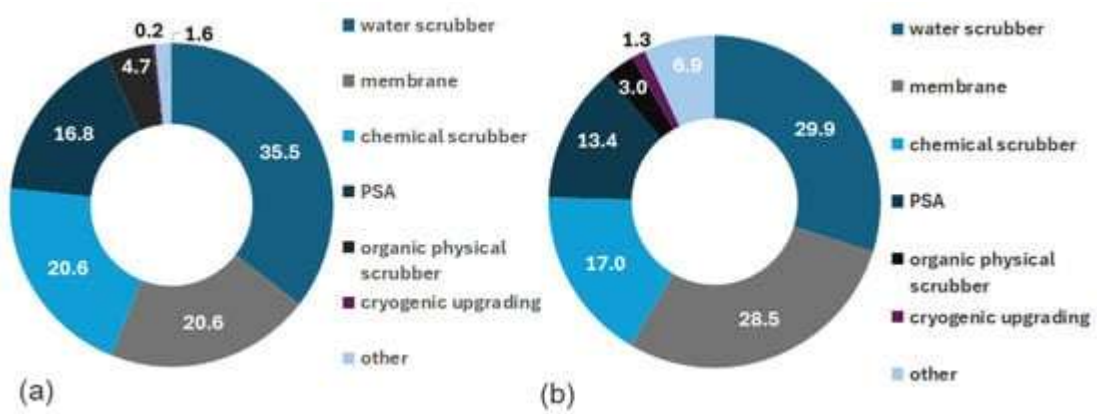


Figura 4. Participação das tecnologias de aprimoramento do biogás entre os países membros da IEA Task 37 (a) até o final de 2015 [197] e (b) até o final de 2019 [198].

Levando em consideração os dados coletados pela IEA Task 37 [198], que são apresentados graficamente na Figura 5 , pode-se notar a disseminação desigual de diferentes tipos de tecnologia de aprimoramento de biogás em uma perspectiva geográfica em escala global. A maior diversidade de tecnologias ocorre na Europa, mas também se observa uma grande variação na participação de tecnologias específicas em países individuais nessa região (Figura 6).

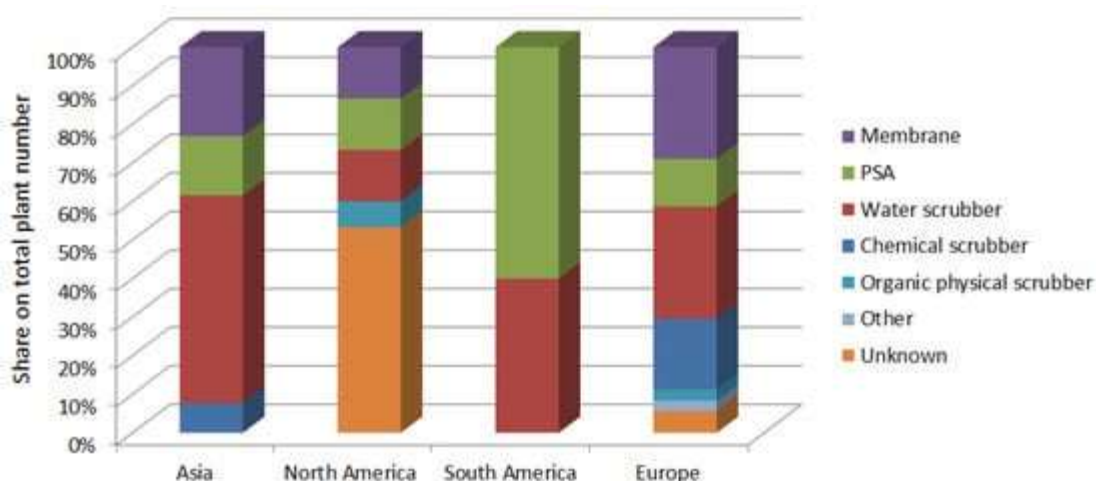


Figura 5. Participação das tecnologias de aprimoramento do biogás em continentes específicos com base nos dados da IEA Task 37 [198].

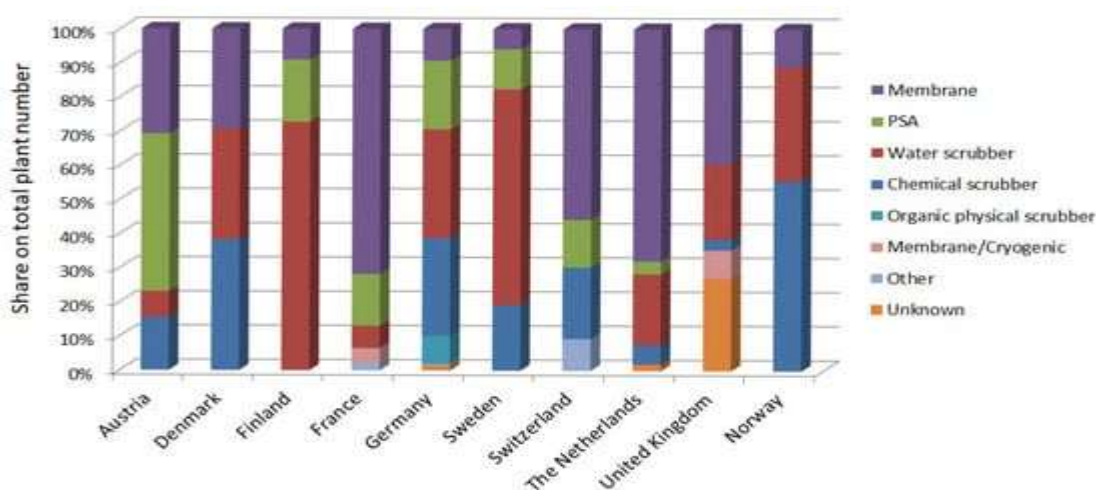


Figura 6. Participação das tecnologias de aprimoramento do biogás na Europa com base nos dados da IEA Task 37 [198].

A distribuição desigual das instalações pode estar relacionada a fatores econômicos, que se relacionam ao nível de desenvolvimento econômico dos países [91].

Levando em consideração a classificação dos países por renda [199], pode-se afirmar que na China (Ásia) e no Brasil (América do Sul), classificados como países de renda média-alta, predominam as instalações de lavagem de água e PSA, consideradas mais baratas.

No entanto, é difícil avaliar a importância desse fator na escala do continente europeu, pois todos os países europeus são classificados como de alta renda. Nesse caso, outros fatores, como a qualidade do biogás e do produto final, e a disponibilidade de matérias-primas necessárias para garantir a operação da instalação (por exemplo, fontes de água e energia) podem ser significativos [91].

Outros fatores que podem influenciar a escolha do método de purificação do biogás são a disponibilidade e a competitividade dos preços dos combustíveis fósseis ou as regulamentações legais, bem como outros fatores específicos da região, como o acesso às matérias-primas a partir das quais o biometano é produzido.

O acesso a matérias-primas depende principalmente do setor econômico dominante do país, da zona climática e da disponibilidade de terras [200 , 201]. Regiões densamente povoadas têm maior potencial para o uso de resíduos sólidos urbanos; regiões industrializadas, para o uso de fluxos de resíduos orgânicos; regiões agrícolas, para o uso de resíduos agrícolas (esterco, palha) e culturas [10 , 43 , 200]; e regiões florestais, para o uso de biomassa lignocelulósica em processos termoquímicos.

O clima e o tipo de solo influenciam o crescimento das plantas. Regiões caracterizadas por um clima estável e temperado podem oferecer condições naturais mais favoráveis à digestão anaeróbia, potencialmente reduzindo a necessidade de energia externa para aquecimento ou resfriamento dos digestores, levando a menores custos operacionais [202].

Além disso, a disponibilidade de água, que depende do clima, afeta a viabilidade do processo de produção de biogás [200].

As diferenças regionais também estão relacionadas à disponibilidade de infraestrutura técnica, tanto na etapa de produção de biogás quanto na produção e distribuição de biometano. A proximidade de infraestruturas essenciais, como gasodutos, a direção predominante do desenvolvimento da tecnologia automotiva no país e as estradas para o transporte de matéria-prima influenciam significativamente a viabilidade dos projetos de produção de biometano.

Como mencionado anteriormente, o biometano é produzido principalmente a partir do biogás; portanto, uma causa significativa da desproporção na disseminação do biometano pode ser vista na abordagem da produção de biogás. Esse problema foi analisado por Biro et al. [203]. Com base na literatura, os pesquisadores avaliaram que os fatores mais importantes que determinam a adoção da tecnologia de produção de biogás em escala global são fatores sociais, como confiança pública, justiça processual e envolvimento da comunidade.

Aspectos financeiros, incluindo incentivos, custos operacionais e condições de mercado, também foram importantes, enquanto fatores ambientais, incluindo redução da emissão de gases de efeito estufa, compatibilidade de recursos e impacto no uso da terra, foram os menos importantes. Observou-se também que a importância de cada fator dependia da região. Na Europa, a ênfase está no alinhamento de políticas, gestão de partes interessadas e infraestrutura avançada, enquanto em regiões em desenvolvimento, acessibilidade, educação e acesso a recursos são prioridades. Além disso, a falta de conhecimento tecnológico sobre como construir e operar instalações, bem como a competição com a madeira gratuita como fonte de energia, são mais comuns em países em desenvolvimento [204].

4. Alternativas para Aplicações do Biometano

As propriedades do biometano variam dependendo do substrato utilizado em sua produção e do método de produção, enquanto o gás destinado a um uso específico deve atender aos padrões de qualidade que permitam sua aplicação eficaz e segura. Os padrões de qualidade para o biometano variam entre os países, dependendo da finalidade de uso do gás.

4.1. Transporte de Biocombustíveis

Assim como o gás natural convencional, o biometano que atende a padrões de qualidade pode ser usado como combustível para transporte na forma de biometano comprimido (CBM) ou biometano liquefeito (LBM), que são substitutos do GNL e também chamados de bio-GNV ou bio-GNL.

Portanto, ele pode ser aplicado em veículos movidos a gás natural [8 , 10] e armazenado e distribuído da mesma forma [205]. O biometano comprimido ou liquefeito pode ser entregue a postos de abastecimento a partir de uma fábrica próxima ou de uma distância maior na forma líquida (semelhante ao GNL). O biometano também pode ser entregue a um posto de gasolina por meio de gasodutos, onde é misturado com gás natural.

O biometano comprimido tem um poder calorífico cerca de 275 vezes maior do que o biometano gasoso, enquanto o processo de liquefação permite aumentar o poder calorífico do combustível em 637 vezes em comparação com o biometano gasoso e 2,3 vezes em comparação com o biometano comprimido em relação à unidade de volume.

O poder calorífico inferior (PCI) do biometano gasoso é 94–97% do valor deste parâmetro para o gás natural, que é de 34–35 MJ/m³ [206] .

O biometano comprimido tem um valor energético inferior ao dos combustíveis líquidos: cerca de 4 vezes inferior ao do diesel (36.000 MJ/m³) e do querosene (35.300 MJ/m³) , 3,5 vezes inferior ao da gasolina (32.000 MJ/m³) e 2,3 vezes inferior ao do etanol (21.100 MJ/m³) (os valores energéticos são dados de acordo com [207]), o que limita as suas possibilidades de aplicação no transporte. Além disso, o armazenamento e o transporte de biometano comprimido requerem condições especiais. Devido à elevada pressão do biometano comprimido, que é de 200–300 bar (50–100 bar acima do valor num tanque de veículo), é necessário armazená-lo em tanques pesados de aço ou compósitos, o que limita as possibilidades de transporte [198].

Apesar desses problemas, tais soluções são praticadas, por exemplo, em Reykjavik (Islândia), o biometano comprimido produzido a partir de resíduos municipais é fornecido aos consumidores em recipientes de gás, que são feitos de cilindros de fibra de vidro ou aço [208].

O biometano na forma de biometano líquido (BML) oferece maiores possibilidades de uso no transporte. Essa forma de biometano possui maior densidade energética, o que aumenta o alcance potencial de veículos movidos a BML e facilita o transporte de combustível em longas distâncias [198].

O biometano líquido também pode ser misturado com gás natural liquefeito (GNL), sendo utilizado no transporte rodoviário e marítimo. O poder calorífico inferior (PCI) do BML e do GNL é semelhante: o PCI do BML é de 21.000 MJ/m³ [198] e o do GNL é de 20.800 MJ/m³ [207] .

Os requisitos especificados para o biometano como combustível utilizado no transporte em países europeus estão definidos na norma EN 16723-2:2017 [209].

Considerando a necessidade de comprimir o biometano utilizado para fins de transporte, o ponto de orvalho exigido pela norma 16723-2:2017 é inferior ao do uso na rede de gás e é de menos 2 °C a uma pressão de 7 MPa, independentemente da estação do ano. Os requisitos aumentados nesta área visam evitar problemas operacionais relacionados com a formação de hidratos e hidratos de gás nos componentes da estação de abastecimento, que ocorrem após o compressor de biometano [205].

Nos EUA, não existe um padrão nacional de qualidade para o biometano usado em motores automotivos, mas o American Biogas Council desenvolveu recomendações para a qualidade do GNR usado no transporte em casos em que não é fornecido aos postos de abastecimento por meio de um gasoduto convencional. Esses requisitos são menos restritivos em comparação com o gás injetado na rede de gás, inclusive em termos do limite inferior do poder calorífico, teor de oxigênio, H_2S e siloxanos [210].

4.2. Injeção na Rede de Gás

O biometano comprimido que atenda aos padrões de qualidade apropriados pode ser introduzido na rede de gás. No entanto, os requisitos relativos à qualidade do gás não são universais. Eles diferem, entre outros fatores, dependendo do tipo de rede na qual o gás é injetado. Por exemplo, na Europa, existem dois tipos de redes de gás, caracterizadas por diferentes parâmetros técnicos do gás transportado nelas e com diferentes gestores.

Existem redes de transmissão, que compreendem gasodutos de alta pressão responsáveis pelo transporte de gás por longas distâncias, gerenciadas por operadores de sistemas de transmissão (OSTs), e redes de distribuição, compostas por gasodutos de baixa pressão projetados para fornecer gás aos consumidores finais, gerenciadas por operadores de sistemas de distribuição (OSDs) [211]. As diferenças na qualidade do gás injetado nessas redes dizem respeito aos valores do ponto de orvalho da água, temperatura de injeção, teor de enxofre total, O_2 , CO_2 e H_2 [212].

Na prática, a injeção de biometano na rede depende não apenas de fatores técnicos, mas também de fatores legislativos, logísticos e econômicos. De acordo com as avaliações da EBA [213], as regulamentações relativas aos padrões de qualidade do gás injetado na rede, as taxas de conexão à rede e a possibilidade de compartilhamento de custos entre o operador da rede de gás e o produtor de biometano são de particular importância. Os custos de conexão à rede dependem em grande parte do tamanho da instalação e da distância da infraestrutura de gás existente.

Não existem normas internacionais para a qualidade do biometano introduzido na rede de gás. Os requisitos na Europa estão especificados na norma EN 16723-1:2016 [214]. No entanto, o gás transportado no gasoduto, que também contém metano injetado, deve atender aos requisitos especificados na norma EN 16726:2015+A1:2018 [215]. Contudo, a gama e os valores dos parâmetros especificados nas normas EN 16723-1:2016 [214] e EN 6726:2015+A1:2018 [215] diferem entre si, uma vez que o biometano, devido à sua origem, possui componentes específicos, como siloxanos, terpenos e aminas.

Esses componentes devem ser monitorados devido ao seu potencial para criar desafios tecnológicos e ambientais específicos, tanto no caso da incorporação do biometano na rede quanto no seu uso no transporte. Por exemplo, compostos orgânicos contendo silício durante a combustão são convertidos em dióxido de silício microcristalino, que pode ser depositado nas superfícies dos fios, caldeiras ou motores [216].

As normas de qualidade europeias desenvolvidas pelo Comité Europeu de Normalização (CEN) não constituem, contudo, requisitos obrigatórios que devam ser seguidos por todos os Estados-Membros da UE. Cada país europeu tem a liberdade de determinar os seus próprios parâmetros de qualidade do gás natural ou do biometano, podendo cada um ter em conta regulamentos, normas ou requisitos específicos das empresas de gás relativamente ao biometano, tanto nacionais como internacionais. Alguns países não consideram o índice de Wobbe, a densidade relativa ou o teor de água nas normas de qualidade do gás adotadas. Os valores dos níveis permitidos de hidrogénio, oxigénio, enxofre, siloxanos, etc., também variam de país para país. Como se pode verificar numa comparação detalhada dos requisitos de qualidade do biometano em 14 países europeus, realizada pela associação internacional MARCOGAZ, o teor máximo de hidrogénio varia entre 0,01% mol (na rede de distribuição da República Checa) e 6% mol (em França), embora na Áustria e na Dinamarca não seja sequer considerado. Os níveis de tolerância mais elevados de oxigénio no biometano, 1% e 0,6% mol, são encontrados na Suécia e na Itália, com um valor ligeiramente inferior — 0,5% mol — na Dinamarca, Suíça e Holanda (neste último caso, em situações com uma rede de baixa pressão <40 bar), na Áustria é de apenas 0,02% mol, mas o limite mais baixo — 0,0005% mol — é observado em um caso de rede de alta pressão na Holanda [212]. As diferenças nos parâmetros de qualidade em cada país dificultam o comércio transfronteiriço de biometano.

Na Austrália, o biometano deve atender aos requisitos estabelecidos na norma australiana AS 4564:2020 [217] para a qualidade do gás natural, o que dificulta o desenvolvimento do mercado de biometano, enquanto nos EUA, nenhum padrão de qualidade uniforme para biometano foi estabelecido até o momento, e as especificações para GNR variam dependendo das concessionárias de gás, e, por exemplo, o nível limite de O₂ neste gás varia de 0,0005 a 1% vol., e o valor máximo de CO₂ varia de 1 a 3% vol. [218].

4.3. Plataforma Química e Bioquímica para Diversos Produtos de Biorrefinaria

O metano é uma importante matéria-prima para a indústria química, incluindo a produção de hidrogênio, metanol e outros combustíveis. O uso industrial do metano para a produção de combustível envolve sua conversão em gás de síntese (syngas), uma mistura de CO e H₂ em processos de reforma a vapor ou de metano seco [219] de acordo com as Equações (3) e (4), que é então usado para produzir metanol ou combustíveis sintéticos [220].



(3)



(4)

O dióxido de carbono gerado na reforma do metano a vapor reage com o vapor e hidrogênio adicional é produzido como resultado [Equação (5)].



(5)

A reforma a vapor do metano é a principal forma de produção industrial de hidrogênio [221]. Atualmente, são produzidos 70 Mt de hidrogênio em todo o mundo, e 76% deste é produzido utilizando gás natural, o que corresponde a 6% do consumo global de gás natural [222].

Para garantir as condições em que o metano pode reagir com o vapor, é necessário manter uma pressão na faixa de 3 a 25 bar e uma temperatura do vapor de 700–1000 °C [222]. Esse processo causa emissões de CO₂ de cerca de 7 kg desse gás por kg de H₂ produzido e é a fonte de quase 3% das emissões globais de CO₂ no setor industrial [221]. Substituir, pelo menos parcialmente, o metano petroquímico por biometano, especialmente nesses processos de produção de vetores energéticos limpos, reduzirá efetivamente a pegada de carbono da indústria de combustíveis [223].

Os produtos da reforma do metano são uma matéria-prima para a produção de combustíveis líquidos, como o metanol ou hidrocarbonetos renováveis - diesel Fischer-Tropsch [224].

O metanol é produzido a partir de produtos de reforma do metano através da hidrogenação de óxidos de carbono sobre um catalisador à base de óxido de cobre, óxido de zinco ou óxido de cromo [225]:



(6)

Os hidrocarbonetos renováveis são produzidos em processos Fischer-Tropsch, que são classificados como tecnologia Fischer-Tropsch de baixa temperatura (LTFT), na qual são utilizados catalisadores à base de cobalto, e tecnologia Fischer-Tropsch de alta temperatura (HTFT), na qual são utilizados catalisadores à base de ferro. Os principais produtos dos processos LTFT são parafinas, olefinas e compostos oxigenados, enquanto no HTFT são produzidas alfa-olefinas. Os produtos dos processos LTFT são refinados em nafta ou querosene (óleo diesel) por meio de hidrogenação catalítica de olefinas e compostos oxigenados ou hidrocrackeamento catalítico de ceras [225 , 226].

Como os combustíveis produzidos em processos Fischer-Tropsch podem substituir os combustíveis fósseis líquidos sem necessidade de adaptação do motor, eles podem ser incluídos na categoria de combustíveis “drop-in”. Esses combustíveis são definidos como “bio-hidrocarbonetos líquidos que são funcionalmente equivalentes aos combustíveis derivados do petróleo e totalmente compatíveis com a infraestrutura existente de refino e distribuição de petróleo” [227].

Atualmente, os combustíveis drop-in são produzidos principalmente pela conversão de matérias-primas oleoquímicas, como óleos vegetais ou óleos de cozinha usados, em produtos totalmente saturados, mas espera-se que as tecnologias termoquímicas, como gaseificação, pirólise ou liquefação hidrotérmica (HTL), baseadas em matérias-primas de biomassa amplamente disponíveis, desempenhem um papel maior no futuro [227 , 228].

O metano pode servir como plataforma em diversos processos bioquímicos, como a conversão envolvendo metanotróficos, que leva à geração de diferentes produtos, por exemplo, polissacarídeos, polihidroxialcanoatos e proteínas, isoprenoides e vitaminas [220 , 229]. Os polissacarídeos extracelulares (EPSs) podem ser utilizados nas indústrias farmacêutica, têxtil, de petróleo e de processamento de alimentos. Os polihidroxialcanoatos (PHAs) acumulados dentro das células podem ser utilizados na indústria biomédica e de embalagens biodegradáveis [230 , 231]. Os metanotróficos são reconhecidos como potenciais produtores de proteínas, que podem ser utilizadas na indústria de alimentos e rações [232]. Entre as outras substâncias valiosas produzidas a partir do metano por metanotróficos está o lactato — um substrato na indústria química e um precursor do polilactato utilizado na produção de bioplásticos [233].

O metanol também pode ser produzido a partir do metano por meio de uma via de oxidação biológica, mas como ele é rapidamente convertido em formaldeído como o primeiro intermediário formado durante a conversão de metano em dióxido de carbono, esse processo não tem significado prático [220].

4.4. Matéria-prima para produção de energia

O biometano pode ser usado para produzir eletricidade em uma célula de combustível. Nesses dispositivos, a energia química do combustível e do oxidante é convertida em energia elétrica [234]. Nesse processo, não há combustão do combustível, portanto a produção de poluentes é limitada.

As células de combustível são células galvânicas nas quais o combustível é fornecido ao ânodo e o oxigênio/ar ao cátodo. Como resultado da reação eletroquímica do hidrogênio e do oxigênio, são produzidas corrente elétrica, água e calor [235]. Nas células de combustível modernas, o combustível mais comumente usado é o hidrogênio (H_2), mas outras substâncias também podem ser usadas, por exemplo, CH_4 , amônia e metanol.

Na prática, são utilizadas diversas soluções técnicas para células a combustível, como células a combustível de óxido sólido condutoras de prótons (SOFCs), células a combustível cerâmicas de prótons (PCFCs) e células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs), que também foram testadas para metano [236 , 237 , 238]. O metano também pode ser usado para produzir energia em sistemas de produção combinada de calor e energia em dispositivos de turbina a gás (TG) operando em várias escalas [239 , 240].

O calor produzido durante a combustão de biogás ou biometano pode ser convertido em trabalho e, posteriormente, em energia elétrica em ciclos termodinâmicos, como o ciclo Kalina (KC) ou o ciclo Rankine orgânico (ORC).

Essas soluções permitem o aproveitamento de fontes de calor de baixa temperatura e também são adequadas para aplicações de recuperação de calor residual. Podem ser utilizadas, por exemplo, para aumentar a eficiência da produção de eletricidade em usinas de biogás, onde a produção de energia em motores de cogeração é caracterizada por baixa eficiência [241].

De acordo com Benato e Macor [242], a aplicação do ORC pode aumentar a produção líquida de energia elétrica a partir da combustão de biogás em 30% em comparação com o valor nominal indicado na placa de identificação dos motores de combustão interna. O ciclo Kalina é um ciclo Rankine modificado que utiliza uma mistura de água e amônia como fluido de trabalho, enquanto no ORC são utilizados compostos orgânicos, como clorofluorocarbonos e hidrofluorocarbonos, como fluidos de trabalho. Em comparação com a água utilizada em um ciclo Rankine convencional, os compostos orgânicos possuem maior massa molar e menores temperaturas de evaporação. Isso permite a recuperação de calor de fontes de temperatura mais baixa [243]. Guerron et al. [244] mostraram nos resultados da pesquisa em escala piloto que o ciclo Rankine orgânico regenerativo combinado com armazenamento de energia térmica baseado em materiais de mudança de fase, que permitem obter a inércia térmica no sistema, pode ser usado para armazenamento de energia derivada de fontes renováveis.

5. Evolução e Perspectivas do Mercado de Biometano

5.1. Situação atual e desenvolvimento

Atualmente, o principal método de produção de biometano é o aprimoramento do biogás. De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA) [10], em 2018, mais de 92% do biometano mundial foi produzido dessa forma, e cerca de 9% do biogás produzido globalmente foi utilizado para esse fim.

No entanto, essa participação variou de acordo com a região: na América Central e do Sul, foi de cerca de 35%; na América do Norte, cerca de 15%; na Europa, região que mais produz biogás e biometano, apenas cerca de 10%, embora em países como Dinamarca e Suécia, essas participações tenham sido muito maiores; e na Ásia, esse indicador foi o mais baixo, chegando a 2% [10].

Em 2018, a via termoquímica foi utilizada apenas na África e na Europa (com participações de 12% e 10%, respectivamente).

A produção global de biometano poderia ser significativamente aumentada se as tecnologias baseadas em gás de síntese derivado de biomassa se tornassem amplamente disponíveis no mercado.

Plantas de demonstração em grande escala na Suécia e na França demonstraram a viabilidade técnica de diferentes vias de gaseificação para SNG [245].

De acordo com dados da associação internacional CEDIGAZ [13], a produção global de biometano em 2022 foi de 7,7 bilhões de metros cúbicos (bcm) e aumentou 20% em comparação com 2021.

Previu-se que a produção em 2023 aumentaria para 9,5 bcm (ou seja, 23% em comparação com 2022) (Figura 7).

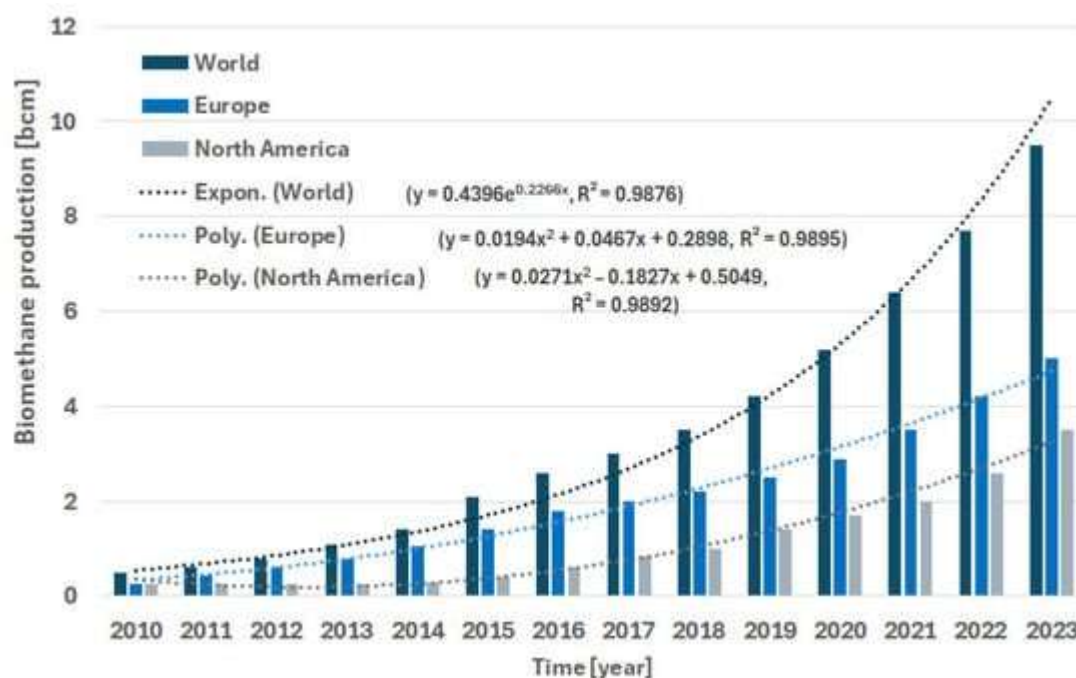


Figura 7. Alterações dependentes do tempo na produção de biometano entre 2010 e 2023 (estimadas com base em dados do CEDIGAZ [13]).

A produção de biometano está concentrada na Europa e na América do Norte. Em 2022, cerca de 55% do biometano foi produzido em países europeus. A produção europeia cresceu quase 20%, atingindo 4,2 bilhões de metros cúbicos em 2022 (com 3,4 bilhões de metros cúbicos na UE), impulsionada principalmente pelo crescimento na França, Dinamarca, Itália e Reino Unido [32]. Em 2023, a produção de biometano na Europa aumentou para 4,9 bilhões de metros cúbicos [246], valor ligeiramente inferior à previsão da CEDIGAZ. Os dados para 2024 ainda não estão disponíveis.

Na América do Norte, a posição de liderança na produção de biometano é ocupada pelos EUA, que em 2022 produziram 2,5 bilhões de metros cúbicos (em 275 instalações), o que representou cerca de 33% da produção global [32].

A participação da América do Norte na produção de biometano aumentou em comparação com anos anteriores; por exemplo, em 2018, atingiu cerca de 29% (Figura 7). Apesar do aumento observado na produção mundial de biometano, sua participação na demanda total de gás ainda é pequena. De acordo com dados da AIE (Agência Internacional de Energia), o biometano representou cerca de 0,1% da demanda mundial de gás natural [10]. O biometano tem uma participação maior no atendimento à demanda de gás natural nos países europeus. Em 2022, estimou-se uma média de 1%, embora em alguns países seja maior. Na Dinamarca, o uso de biogás/biometano já é equivalente a quase 40% do uso de gás, enquanto na Suécia (21%) e na Finlândia (16%) são atingidos níveis substanciais [247 , 248].

O aumento na produção de biometano está associado ao aumento no número de instalações de produção de biometano. A variação no número dessas usinas na Europa no período de 2011 a 2023 é apresentada na Figura 8. Nos anos de 2022 e 2023, o número de usinas de biometano aumentou em quase 30% em comparação com o relatório da Associação Europeia de Biogás (EBA) de 2021 [249]. De acordo com o relatório, mais de 75% das usinas estavam conectadas às redes de transporte (19%) ou de distribuição de gás (58%). Em 2018, cerca de 60% das instalações de produção de biometano em todo o mundo injetavam biometano na rede de distribuição de gás, e outros 20% forneciam combustível para veículos. O restante fornecia metano para diversos usos finais locais. Em 2022, a situação mudou em favor do transporte. Esse setor consumiu cerca de 45% da demanda global de biometano [13].

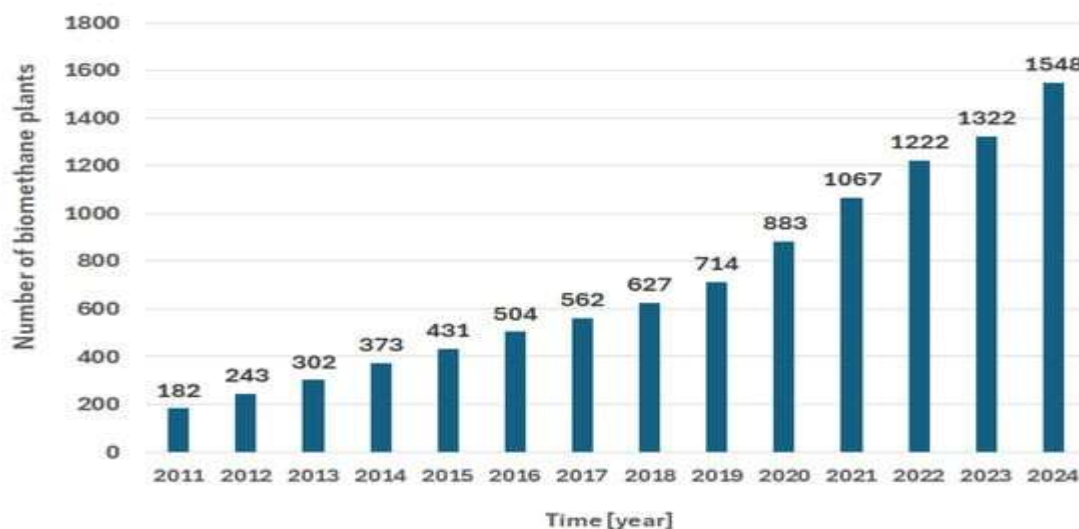


Figura 8. Número de usinas de biometano na Europa com base em dados da EBA [249 , 250].

Levando em consideração o curso das mudanças na produção de biometano em escala global, pode-se concluir que a taxa de crescimento dessa produção nos últimos anos tem sido muito maior do que na Europa ou na América do Norte sozinhas. Isso indica uma contribuição crescente de outros países, como a China [13], para o mercado de biogás.

A matéria-prima para a produção de biometano é principalmente resíduos agrícolas, resíduos orgânicos urbanos e lodo de esgoto, e desde 2017 quase não houve novas instalações na Europa baseadas em monoculturas [249]. De acordo com os dados mais recentes, em julho de 2024 havia 1548 instalações de biometano na Europa, que atingiram uma capacidade instalada de 6,4 bilhões de metros cúbicos de biometano por ano [246]. O número de instalações aumentou em 226 em meio ano (17%).

5.2. Perspectivas para o Desenvolvimento do Mercado de Biometano

Nos últimos anos, houve um rápido crescimento no mercado global de equipamentos para o aprimoramento do biogás — de US\$ 1,86 bilhão em 2023 para US\$ 2,17 bilhões em 2024, a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 16,6%. Espera-se um crescimento ainda maior nessa área da economia, para US\$ 3,93 bilhões em 2028, a uma CAGR de 11,8% [251]. No entanto, apesar da ausência de obstáculos tecnológicos, o biometano encontra-se em um estágio inicial de comercialização. Mesmo assim, prevê-se um aumento significativo na produção de biometano nos próximos anos. A AIE [248] prevê uma duplicação do valor de sua produção entre 2023 e 2027, impulsionada principalmente por projetos realizados no Brasil, na Europa, na Índia e na América do Norte. Segundo Emprin [252], a produção potencial de biometano em 2023 somente na Europa é estimada em 41 bilhões de metros cúbicos. Para comparação, o consumo de gás natural da UE em 2022 foi de 360 bilhões de metros cúbicos [245]. Levando em consideração as previsões da taxa de crescimento da demanda de energia [253] e da produção de biometano, pode-se esperar um rápido aumento na participação desta última no atendimento da demanda global de energia.

É provável que essas previsões se confirmem à medida que mais e mais países apoiem a descarbonização dos transportes e a substituição do gás natural pelo biometano em suas políticas governamentais. A seção seguinte apresenta a situação nessa área em países selecionados em diferentes continentes.

Europa: O plano REpowerEU, adotado em 2022 [254], prevê a produção de 35 mil milhões de metros cúbicos de biometano até 2030 [255]. Este valor é dez vezes superior à produção de 2021. Os Estados-Membros definem as suas metas nas versões preliminares dos Planos Nacionais de Energia e Clima (PNEC). As políticas da UE consideram o biometano fundamental para a diversificação do fornecimento de gás da UE e uma das prioridades em matéria de energias renováveis, especialmente quando a sua produção se baseia em resíduos e matéria orgânica, em vez de culturas alimentares e forrageiras [195]. Vários Estados-Membros da UE adotaram estratégias e/ou planos de ação para o biometano. Em 2024, Portugal definiu a meta de substituir 18,6% da sua procura de gás natural por biometano até 2040, enquanto a Roménia planeou aumentar a quota de biometano na rede de gás para 5% até 2030 e para 10% até 2050 [256].

A Rede Europeia de Operadores de Sistemas de Transmissão de Gás (ENTSOG) indica que a injeção de biometano na rede de gás proporciona economias nas emissões de gases de efeito estufa sem qualquer custo de adaptação para os usuários finais. Ela enfatiza o papel da mistura de gás natural com biometano e hidrogênio no processo de descarbonização do setor de gás, mas aponta a necessidade de adaptar as regulamentações do gás para incluir o hidrogênio e fortalecer o papel do biometano. Recomenda a criação de um sistema confiável de Garantias de Origem e certificação em toda a UE, que permita acompanhar o impacto ambiental de uma determinada fonte de gases.

Reconhece que o surgimento de novos gases criará desafios para a infraestrutura de gás, embora avalie que a rede de gás existente já esteja preparada para a crescente injeção de biometano [257].

América: Os Estados Unidos. A Renewable Natural Gas (RNG) Coalition, que trabalha para promover a produção de biogás e biometano nos países da América do Norte, relatou que em dezembro de 2024, nos EUA e no Canadá, 442 instalações de RNG estavam em operação, 170 estavam em construção e 285 estavam planejadas. Levando em consideração que em julho de 2023, 300 instalações estavam em operação, observou-se um crescimento de 47% em apenas um ano e meio. Mais desenvolvimento está planejado nesta área para atingir o número de 1000 instalações em 2030 e 5000 em 2040 [258].

A base para o desenvolvimento do mercado de biometano nos EUA foram os incentivos da Lei de Redução da Inflação (IRA) de 2022, que entrou em vigor em 1º de janeiro de 2023, incluindo a possibilidade de obtenção de créditos fiscais para investimentos de entidades que desejam apoiar a transição para uma economia baseada em energia limpa. O aumento esperado na produção também se deve às regulamentações — a Agência de Proteção Ambiental (EPA) estabeleceu requisitos de volume e padrões para biocombustíveis celulósicos (que se aplicam principalmente ao biometano) para o período de 2023 a 2025, como parte do programa Padrão de Combustível Renovável (RFS). As novas metas de volume para biocombustíveis celulósicos aumentaram 25% em 2023, 29% em 2024 e 33% em 2025, em comparação com a meta anterior.

Com base nas metas alteradas, a produção de biometano nos EUA poderia aumentar para cerca de 4 bilhões de m³ em 2025.

No entanto, o problema reside na falta de um padrão nacional para a qualidade do biometano. O American Biogas Council (EUA) [208] desenvolveu um projeto para um padrão de qualidade uniforme para gás natural renovável (GNR), baseado na experiência reunida de dezenas de usinas americanas de produção de GNR.

Canadá. A qualidade do biometano injetado na rede de gás no Canadá é determinada pela Norma Nacional CAN/BNQ 3672-100 Biometano — Especificações de Qualidade para Injeção em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Gás Natural, emitida pelo Bureau de Normalization du Québec [258]. Para que o biometano seja injetado nas redes de distribuição e transmissão de gás natural e, portanto, aprovado para o mercado canadense, é necessário que sua composição seja compatível com a do gás natural. A Associação Canadense de Gás estabeleceu a meta de substituir 10% do gás natural por GNR até 2030. No entanto, o problema reside na baixa popularidade dos veículos movidos a gás natural no país [259].

Brasil. Adotada em 2024, a Lei Combustível do Futuro visa promover o biogás e o biometano. A lei estabelece o Programa Nacional de Descarbonização de Produtores e Importadores de Gás Natural e Incentivos para o Biometano, cujo objetivo é apoiar o desenvolvimento da produção e comercialização de biometano [254].

Além disso, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) enfatiza o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética brasileira e visa reduzir a intensidade de carbono do setor de transportes em 10% até 2028 [10].

Ásia: Índia. Em novembro de 2023, a Índia aprovou a mistura obrigatória de bio-GNV com o fornecimento de gás doméstico. A exigência é de 1% do consumo total de GNV e gás natural canalizado doméstico a partir de 2025 e aumentará gradualmente para 5% a partir de 2028/29. Em 2024, o governo desenvolveu uma estrutura facilitadora para o GNV. Isso inclui o fornecimento de apoio financeiro para a agregação de biomassa e assistência financeira para o desenvolvimento de conexões de gasodutos entre as usinas de bio-GNV e a rede de distribuição de gás da cidade [256].

China. Este país pretende atingir uma produção de 20 bilhões de metros cúbicos por ano de GNR até 2030, como parte do seu 14º Plano Quinquenal [10]. A produção de biometano foi de 0,3 bilhões de metros cúbicos por ano, com um consumo de 331,9 bilhões de metros cúbicos de gás natural em 2022. Apenas quantidades mínimas de biometano são injetadas na rede de gás natural [248]. No entanto, espera-se que o mercado de biometano neste país cresça a uma taxa de crescimento anual composta de 12,4% de 2025 a 2030 [260].

Japão. Um total de seis usinas de purificação de biogás estavam em operação em 2019. Todas elas foram instaladas em estações de tratamento de esgoto e utilizam o biometano como combustível para transporte, empregando tecnologia de lavagem com água para a purificação do biogás [198 , 261].

Em 2023, em Kagoshima, foi inaugurada a primeira instalação japonesa em uma estação de tratamento de resíduos que produz biometano para uso como gás de cidade [262]. Espera-se uma taxa de crescimento anual composta de 11,7% para o mercado de biometano de 2025 a 2030 [263].

Austrália: O mercado de biometano está apenas começando a se desenvolver. A instalação de Malabar na Estação de Tratamento de Esgoto (Nova Gales do Sul), em operação desde 2023, é a primeira instalação de biometano registrada no programa de certificação de gás renovável GreenPower, gerenciado pelo governo [264]. No entanto, os parâmetros fornecidos na norma AS4564:2020 para gás natural tornam a injeção de biometano na rede de gás difícil e cara. Essa situação pode melhorar em breve, já que a norma AS4564 está sendo revisada [265].

6. Benefícios do Biometano e Barreiras ao seu Desenvolvimento

A produção de biometano apresenta diversas vantagens que podem ser consideradas em vários níveis. Do ponto de vista prático, a questão mais importante é a possibilidade de substituir o gás natural em todas as suas aplicações, sem a necessidade de modificar dispositivos e métodos de distribuição e armazenamento, utilizando a infraestrutura de gás natural existente [205 , 266 , 267]. A disponibilidade de diversas tecnologias de produção (biológica e termoquímica) permite a utilização de uma ampla gama de substratos, incluindo materiais lignocelulósicos comuns. O biometano pode ser produzido em qualquer lugar onde haja geração de resíduos e excesso de biomassa.

Trata-se, portanto, de um método de diversificação das fontes de fornecimento de gás e uma alternativa ao gás natural importado, o que é particularmente importante em países que não possuem recursos próprios desse combustível. Isso reduzirá a dependência de fornecedores estrangeiros de gás natural. Além disso, do ponto de vista econômico, o apoio que a produção de biometano oferece aos empreendedores locais é importante [268].

O biometano pode ser produzido continuamente; portanto, é uma versão melhorada de uma fonte de energia alternativa, independente do clima e do terreno (o que é importante no caso da energia eólica e solar), das condições geológicas e hidrológicas (importantes na energia geotérmica e nas usinas hidrelétricas) e da hora do dia (energia solar).

Não menos importantes são os benefícios ambientais associados ao biometano. O biometano é uma importante arma contra as mudanças climáticas e um caminho para a descarbonização dos setores de energia e transporte [269 , 270 , 271]. Com base em dados de julho de 2024 para a Europa, calculou-se que a capacidade instalada total de biometano europeu pode contribuir para evitar quase 29 milhões de toneladas de emissões de CO₂ [250]. A avaliação do ciclo de vida realizada por Vinardell et al. [272] para uma planta de produção de biometano baseada em um processo de metanação biológica mostrou que o biometano tem um impacto no aquecimento global menor do que o gás natural quando a participação de fontes renováveis na produção de eletricidade excede 62%. Mas eles assumiram que o H₂ usado no processo é produzido por eletrólise da água.

De acordo com Orecchini et al. [273], o biometano como combustível para transporte apresenta melhor desempenho em termos de impacto ambiental, não apenas em comparação com os combustíveis fósseis, mas também em comparação com carros elétricos e bioetanol.

Os pesquisadores mostraram que o consumo de energia primária não renovável (CEPN) para o biometano foi quase 3 vezes menor em comparação com o gás natural, 69% menor do que o de veículos elétricos a bateria e 55% menor do que o de bioetanol, mas ligeiramente maior em comparação com o biodiesel (+9%).

As emissões de CO₂ no caso do biometano foram reduzidas 3,55 vezes em comparação com o gás natural, 176% em comparação com o bioetanol, 124% em relação ao biodiesel e 69% em comparação com veículos elétricos a bateria. O elemento-chave do impacto ambiental da produção de biometano é o método de purificação do biogás.

Observou-se que, devido às grandes perdas de metano, as tecnologias de membrana apresentam o maior potencial de aquecimento global (PAG); no entanto, quando se utiliza a queima de gases residuais, o PAG é o menor [9].

De acordo com o Centro Dinamarquês para Alimentação e Agricultura (outubro de 2020), a produção de biogás com aprimoramento para biometano injetado na rede de gás pode contribuir para uma redução de 55 a 77 kg de CO₂ equivalentes por GJ de energia bruta produzida, dependendo do tipo de planta de biogás e matéria-prima utilizada [267].

O valor acrescentado no caso da produção de biometano reside na possibilidade de utilização dos resíduos da produção de biogás (digestato) na agricultura e na recuperação do solo, o que traz benefícios sob a forma de sequestro de carbono no solo e reciclagem de nutrientes. Com base em dados de julho de 2024 para a Europa, calculou-se que as centrais de biometano produzem 830.000 toneladas de fertilizante orgânico por ano [250]. A utilização de biometano e gás natural reduz significativamente as emissões de poluentes (hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de azoto e partículas) em comparação com os motores a gasolina e a gasóleo, sendo também bastante inferior aos níveis do biodiesel e do bioetanol [274].

Surge então a seguinte questão: visto que não existem barreiras técnicas na produção de biometano e o impacto ambiental é benéfico, que barreiras impedem a implementação do biometano? Conforme demonstrado pelas avaliações económicas preparadas pela AIE (Agência Internacional de Energia), estas são principalmente os elevados custos de produção. Como indicado pelos dados apresentados na Tabela 1 , o menor custo foi observado no caso da tecnologia de lavagem com água, que, no entanto, não atende aos padrões de qualidade para as aplicações mais exigentes. Os métodos químicos que garantem o maior teor de metano podem ser até 4 vezes mais caros. Os preços do gás natural para transporte ainda são muito competitivos em comparação com os combustíveis fósseis líquidos e também são inferiores aos custos do biometano [255]. No entanto, a EBA (Agência Europeia de Biocombustíveis) prevê que o biometano em breve se tornará mais barato que gás natural [275].

Os custos de produção de biometano são compostos por muitos elementos. De acordo com Mansson [11], estes incluem os custos das matérias-primas, da distribuição (distância do local de utilização, extensão do gasoduto) e dos veículos movidos a diferentes combustíveis (veículos a gás são mais caros do que veículos a diesel). O custo da produção de biometano também depende do tamanho da planta. Por exemplo, na Suécia, o custo de produção de biometano por 1 kWh de gás purificado foi cerca de 3 vezes maior em uma planta pequena ($<100 \text{ m}^3 / \text{h}$ de gás bruto) do que em uma grande ($200\text{--}300 \text{ m}^3 / \text{h}$ de gás bruto) [276]. A pesquisa de Sun et al. [34] mostrou que a tecnologia criogênica tem altos custos de operação e manutenção devido à sua baixa eficiência.

No entanto, no caso da tecnologia de absorção química, esses custos também foram altos, especialmente em plantas maiores, devido à alta eficiência energética. A análise realizada por Ferella et al. [277] para uma planta de biometano de $250 \text{ m}^3 / \text{h}$ localizada na Itália, utilizando a técnica de adsorção por oscilação de pressão (PSA) com fluxo de caixa descontado (DCF), mostrou um impacto ambiental positivo resultante do uso de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas volantes residuais, mas sua rentabilidade foi confirmada apenas em alguns cenários, nos quais se assume a construção de uma nova planta de biometano, e não a modernização de uma planta existente. Concluiu-se que o biometano pode contribuir para o desenvolvimento de modelos de economia circular, embora os objetivos de desenvolvimento sustentável sejam alcançados apenas em alguns cenários.

De acordo com Karne et al. [44], a lavagem química é considerada um método promissor de aprimoramento do biogás, pois suporta altas eficiências de transferência de massa e fornece alta pureza do metano com menos perdas. Além disso, possui custos moderados de instalação e operação.

Segundo Herno [267], o custo de produção de biometano pode ser reduzido entre 10% e 16%, dependendo do tamanho e da configuração da planta. No entanto, deve-se notar que a redução de custos pode não vir acompanhada de benefícios ambientais. Algumas medidas pró-ambientais, como a redução das emissões residuais de CH₄ do fluxo de gás liberado pelos lavadores de água e pelas plantas de purificação de biogás por membrana, ou o bombeamento de esterco por meio de dutos como alternativa ao transporte rodoviário, aumentam os custos.

Os esforços em direção a tecnologias sustentáveis de purificação de biogás concentram-se, em particular, na separação criogênica, em novas técnicas biológicas, na purificação baseada em biochar e em tecnologias híbridas que envolvem dois ou mais métodos diferentes não integrados [56].

As dificuldades de transporte e armazenamento também podem ser uma barreira ao desenvolvimento de tecnologias de biometano. O biometano pode ser transformado em recursos energéticos despacháveis por meio da aplicação de tecnologias de armazenamento apropriadas. O armazenamento de biometano pode ser implementado em pequena e grande escala, tanto em sistemas de energia centralizados quanto descentralizados [278].

No entanto, o método mais econômico e eficiente de distribuição de biometano envolve a injeção na rede de gás natural. Essa abordagem é particularmente justificada em países com produção substancial de biometano, como a Alemanha. A injeção na rede torna-se economicamente viável quando a distância entre a instalação de purificação de biometano e a rede de gás não excede 500 m, desde que o biometano injetado esteja em conformidade com os padrões de qualidade da rede de gás [279].

O biometano também pode ser armazenado em instalações subterrâneas de armazenamento de gás existentes, como reservatórios de gás natural ou petróleo esgotados ou cavernas de sal.

Essas opções de armazenamento são geralmente caracterizadas por baixos custos de investimento de capital e estão amplamente disponíveis em diversos países [280].

Em países com acesso limitado à infraestrutura de gás, como a Suécia, e disponibilidade restrita de instalações de armazenamento subterrâneo, o biometano comprimido (BMC) pode ser armazenado em recipientes pressurizados. O principal custo associado a esse método é a energia necessária para a compressão do gás até os níveis de pressão necessários. Esse sistema de armazenamento requer a implementação de infraestrutura de segurança, incluindo discos de ruptura, válvulas de alívio de pressão e sistemas de detecção de vazamento de gás [278]. O biometano liquefeito (BML) é produzido pelo resfriamento do biometano gasoso a temperaturas criogênicas a pressões próximas à atmosférica.

Esse processo reduz seu volume em aproximadamente 1600 vezes, tornando o BML particularmente adequado como combustível para veículos e embarcações marítimas. Além disso, não é explosivo nem tóxico, aumentando a segurança operacional geral.

O biometano adsorvido (BA) representa uma tecnologia de armazenamento na qual o biometano é adsorvido em materiais sólidos porosos sob pressões relativamente baixas (até 45 bar). Quando um tanque de armazenamento é preenchido com um material adsorvente adequado, a capacidade de armazenamento pode ser aumentada em até dez vezes em comparação com o BMC. Além disso, a tecnologia ABM aumenta a segurança devido à menor pressão de operação e ao risco reduzido de explosão. Os materiais investigados para aplicações ABM incluem materiais microporosos [281] e nanoporosos e carvão ativado [282 , 283]. No entanto, todos esses métodos exigem o uso de tecnologias adicionais e a alocação de recursos financeiros, o que aumenta os custos totais.

Outra barreira significativa ao desenvolvimento do mercado de biometano reside na área das regulamentações legais. De acordo com a AIE [252], os principais problemas nesta área dizem respeito à ausência de regulamentações de longo prazo, à falta de um registo nacional de biometano e de um sistema de garantia de origem, às dificuldades regulamentares relativas à injeção de biometano na rede de gás, à falta de consistência no cumprimento das normas de qualidade do gás em determinados países e aos procedimentos morosos para a obtenção de uma licença de operação.

Assim, apesar dos incentivos ao desenvolvimento do mercado de biometano resultantes de políticas internacionais no domínio da transformação do mercado energético e da mitigação das alterações climáticas, as regulamentações legais relativas ao biometano não são introduzidas com a rapidez necessária para garantir a implementação efetiva dos planos previstos.

Os resultados do estudo realizado por Vinardell et al. [272] mostraram que a isenção da produção de energia a partir de biometano da obrigação de adquirir licenças de emissão de carbono ao abrigo do Sistema de Comércio de Emissões da UE conferiria uma vantagem competitiva ao biometano em relação ao gás natural e constituiria um fator importante na promoção da produção de biometano nos países europeus.

7. Conclusões

Considerando a escala global, o mercado de biometano está se desenvolvendo dinamicamente e, levando em conta os programas de apoio à disseminação de fontes de energia alternativas e biocombustíveis no transporte, adotados em muitos países, espera-se seu desenvolvimento contínuo (pressupondo a estabilidade das políticas adotadas).

No entanto, a produção e o uso de biometano não estão distribuídos uniformemente em escala global. Concentram-se principalmente na Europa e na América do Norte, embora nos últimos anos a participação de países de outros continentes tenha aumentado.

A influência de diversos fatores, incluindo aqueles relacionados à diversidade de condições climáticas e econômicas, bem como aqueles resultantes da competitividade de outras fontes de energia no mercado local, da consciência ecológica e das condições legais, pode ser considerada uma razão para essa diversidade.

As ações para promover o biometano devem levar em consideração as diferenças regionais e econômicas, que afetam as possibilidades de produção e utilização do biometano. A disponibilidade de matérias-primas, tecnologias de produção e possibilidades de utilização do biometano no mercado local são as questões fundamentais que devem ser consideradas. É necessário fornecer incentivos financeiros de longo prazo acessíveis a uma ampla gama de interessados e reduzir os entraves burocráticos. Além disso, para atender às necessidades ambientais, esses incentivos devem promover o uso de matérias-primas derivadas de resíduos. A sustentabilidade da produção de biometano em um contexto geográfico exigirá que os países com infraestrutura de biometano altamente desenvolvida cooperem e compartilhem conhecimento e experiência com os países em desenvolvimento.

Do ponto de vista tecnológico, é necessário aprimorar ainda mais as tecnologias de produção de biometano para aumentar sua eficiência e reduzir custos, de modo que possam ser implementadas em países em desenvolvimento.

Os métodos biológicos têm grande potencial nesse sentido. Eles criam oportunidades para o uso de matérias-primas de diversas origens e podem ser incorporados a sistemas híbridos.

Além disso, são de particular importância para minimizar o impacto ambiental. A popularização da via termoquímica para a produção de biometano ampliaria a gama de substratos úteis para a produção de biometano, incluindo matérias-primas lignocelulósicas comumente disponíveis em muitos países.

Contribuições dos autores

Conceitualização: MP e LP; metodologia: MP; investigação: MP, MZ e MB; curadoria de dados: MP, MZ e MB; redação – preparação do rascunho original: MP, MZ e MB; redação – revisão e edição: MP; visualização: MB; supervisão: LP. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

Financiamento

Esta pesquisa foi financiada pelo Ministério da Ciência e do Ensino Superior como parte de uma subvenção: número de concessão FD-20/IS-6/026.

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

- Antar, M.; Dongmei, L.; Mahtab, N.; Ateeq, S.; Xiaomin, Z.; Donald, LS. Biomassa para uma bioeconomia sustentável: uma visão geral da produção e utilização mundial de biomassa. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021 , 139 , 110691. [Google Scholar]
- Osman, AI; Mehta, N.; Elgarahy, AM; Al-Hinai, A.; Al-Muhtaseb, AAH; Rooney, DW. Conversão de biomassa em biocombustíveis e avaliação do ciclo de vida: uma revisão. *Environ. Chem. Lett.* 2021 , 19 , 4075–4118. [Google Scholar] [CrossRef]

Anderson, EC; Libby, WF; Weinhouse, S.; Reid, AF; Kirshenbaum, AD; Grosse, AV. Radiocarbono natural da radiação cósmica. *Phys. Rev.* 1947 , 72 , 931. [Google Scholar] [CrossRef]

Anderson, EC; Libby, WF; Weinhouse, S.; Reid, AF; Kirshenbaum, AD; Grosse, AV. Radiocarbono da radiação cósmica. *Science* 1947 , 105 , 576–577. [Google Scholar] [CrossRef]

Curran, SC. A determinação da idade geológica por meio da radioatividade. *Q. Rev. Chem. Soc.* 1953 , 7 , 1–18. [Google Scholar] [CrossRef]

Diethorn, W. Um sistema de contador proporcional de metano para medições de radiocarbono natural ; Carnegies Institute of Technology Pittsburgh: Pittsburgh, PA, EUA, 1956. [Google Scholar]

EBA. Sobre Biogás e Biometano. Disponível online: <https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/> (acessado em 20 de janeiro de 2025).

Departamento de Energia dos EUA. Centro de Dados de Combustíveis Alternativos. Disponível online: <https://afdc.energy.gov/fuels/natural-gas-renewable> (acessado em 11 de março de 2025).

Golmakani, A.; Nabavi, SA; Wadi, B.; Manovic, V. Avanços, desafios e perspectivas da limpeza, aprimoramento e utilização do biogás. *Fuel* 2022 , 317 , 123085. [Google Scholar]

IEA. Perspectivas para o Biogás e o Biometano: Perspectivas para o Crescimento Orgânico. Uma Introdução ao Biogás e ao Biometano ; IEA: Paris, França, 2020; Disponível online: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane> (acessado em 27 de janeiro de 2025).

Mansson, T. Veículos limpos com biocombustível: um relatório sobre o estado da arte ; KFB (Pesquisa Sueca de Transporte e Comunicação): Linköping, Suécia, 1998. [Google Scholar]

OurWorldinData. Consumo Global de Energia Primária Direta. Disponível online: <https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy> (acessado em 23 de abril de 2025).

CEDIGAZ. Mercado Global de Biometano — Avaliação de 2024: Biometano a Todo Vapor. Disponível online: <https://www.cedigaz.org/global-biomethane-market-2024-assessment/> (acessado em 12 de fevereiro de 2025).

Selvasembian, R. Métodos de pré-tratamento para aumento da produção de biometano a partir de resíduos agrícolas: progressos, desafios e perspectivas futuras. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2025 , 75 , 104269. [Google Scholar]

Eniyan, MC; Edwin, M.; Nagarajan, VA. Método de pré-tratamento termomecânico suave para melhorar a produção de biometano: desintegração de resíduos alimentares e seu impacto na solubilização. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2025 , 60 , 103432. [Google Scholar] [CrossRef]

Akshaya, K.; Selvasembian, R. Insights into the recent advances of chemical pretreatment of waste activated sludge to enhance biomethane production. *J. Environ. Chem. Eng.* 2024 , 12 , 113999. [Google Scholar]

Grana, M.; Riboli, G.; Tatangelo, V.; Mantovani, M.; Gandolfi, I.; Turolla, A.; Ficara, E. Valorização anaeróbica de lodo de esgoto pré-tratado por carbonização hidrotérmica: ácidos graxos voláteis e produção de biometano. *Bioresour. Technol.* 2024 , 412 , 131279. [Google Scholar] [CrossRef]

Cazier, EA; Brethauer, S.; Bühler, PC; Studer, MHP. Pré-tratamento por explosão a vapor de esterco bovino separado: balanços de massa e efeito no potencial de biometano. *Waste Manag.* 2025 , 193 , 180–189. [Google Scholar] [CrossRef]

Mahmoodi-Eshkaftaki, M.; Dalvi-Isfahan, M. Otimização exegética múltipla do pré-tratamento ultrassônico e da mistura de substratos para aprimoramento de biohidrogênio e biometano. *Energy* 2024 , 292 , 130537. [Google Scholar] [CrossRef]

Sidabutar, R.; Trisakti, B.; Michael, M.; Vanness, V.; Alexander, V.; Natasya, Y.; Takriff, MS. Integração sinérgica da engenharia de zeólitas e do projeto de colunas de leito fixo para aprimoramento do biogás: síntese de adsorventes, cinética de separação de CO_2 / CH_4 e avaliação da regeneração. *Sep. Purif. Technol.* 2025 , 355 , 129772. [Google Scholar] [CrossRef]

Tabar, MA; Maghsoudi, H.; Denayer, JF Adsorção híbrida por oscilação de pressão a vácuo em membrana: tecnologia de baixo custo para produção simultânea de biometano e dióxido de carbono a partir de biogás. *Bioresour. Technol.* 2025 , 422 , 132241. [Google Scholar]

Duma, Z.; Makgwane, PR; Masukume, M.; Swartbooi, A.; Rambau, K.; Mehlo, T.; Mavhungu, T. Uma revisão abrangente de sorventes de estruturas metalorgânicas e seus compósitos de membranas de

matriz mista para limpeza de biogás e separação de CO₂ / CH₄ . Mater . Today Sustain. 2024 , 27 , 100812. [Google Scholar] [CrossRef]

Braga-Nan, L.; Trably, E.; Santa-Catalina, G.; Bernet, N.; Delgènes, JP; Escudié, R. A adaptação microbiana ao H₂ melhora a conversão de ácidos graxos voláteis em metano durante a biometanização in situ, mesmo em condições de depleção de CO₂ . Bioresour . Technol. 2025 , 429 , 132494. [Google Scholar] [CrossRef]

Mahieux, M.; Aemig, Q.; Richard, C.; Delgenès, JP; Juge, M.; Trably, E.; Escudié, R. Biodegradação aprimorada da matéria orgânica por meio de injeções pulsadas de H₂ durante a biometanização in situ. Bioresour. Technol. 2024 , 407 , 131101. [Google Scholar] [CrossRef]

Chan, HL; Xu, H.; Zhou, Y. Contator de membrana cerâmica externa para aprimoramento de biogás assistido por H₂ in situ . Bioresour. Technol. 2024 , 406 , 130981. [Google Scholar]

Bardi, MJ; Müller, F.; Polag, D.; Habtu, NG; Koch, K. O efeito intrigante do enriquecimento de CO₂ na digestão anaeróbica. Bioresour. Technol. 2025 , 416 , 131743. [Google Scholar]

Castel, L.; Cazaudehore, G.; Beigbeder, JB; Guyoneaud, R.; Peyrelasse, C. Estudo em escala piloto dos efeitos do enriquecimento de CO₂ no desempenho da digestão anaeróbia. Chem. Eng. Sci. 2025 , 304 , 121070. [Google Scholar] [CrossRef]

Andronikou, M.; Christoforou, P.; Constantinou, D.; Charalambous, P.; Samanides, CG; Karachaliou, P.; Vyrides, I. Papel crítico do bicarbonato no ferro zero-valente para geração de hidrogênio e aprimoramento do biogás na digestão anaeróbica. Bioresour. Technol. 2025 , 426 , 132236. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Chicaiza-Ortiz, C.; Beihaan, Z.; Zhang, J.; He, Y.; Wah, TY. Digestão anaeróbica impulsionada por dióxido de carbono com ferro zero-valente para biometanização aprimorada de resíduos alimentares. Bioresour. Technol. 2025 , 430 , 132529. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Chicaiza-Ortiz, C.; Zhang, P.; Zhang, J.; Zhang, T.; Yang, Q.; He, Y. Produção de metano aprimorada por CO₂ pela integração de biochar de bambu durante a codigestão anaeróbica. J. Environ. Manag. 2025 , 373 , 123603. [Google Scholar] [CrossRef]

Eze, JI; Agbo, K. Maximizando o potencial do biogás por meio de aprimoramento. *Am. J. Sci. Res.* 2010 , 1 , 604–609. [Google Scholar] [CrossRef]

Ryckebosch, E.; Drouillon, M.; Veruaeren, H. Técnicas para transformação de biogás em biometano. *Biomass Bioenergy* 2011 , 35 , 1633–1645. [Google Scholar] [CrossRef]

Bauer, F.; Hulteberg, C.; Persson, T.; Tamm, D. Melhoramento de biogás — Revisão de tecnologias comerciais ; Relatório técnico; Universidade de Lund: Lund, Suécia, 2013. [Google Scholar]

Sun, Q.; Li, H.; Yan, J.; Liu, L.; Yu, Z.; Yu, X. Seleção de tecnologia apropriada para o aprimoramento do biogás — Uma revisão da limpeza, aprimoramento e utilização do biogás. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015 , 51 , 521–532. [Google Scholar] [CrossRef]

Awe, OW; Zhao, Y.; Nzihou, A.; Minh, DP; Lyczko, N. Uma revisão das tecnologias de utilização, purificação e aprimoramento do biogás. *Valorização de Biomassa Residual* 2017 , 8 , 267–283. [Google Scholar] [CrossRef]

Khan, IU; Othman, MHD; Hashim, H.; Matsuura, T.; Ismail, AF; Rezaei-Dasht Arzhandi, M.; Wan Azelee, I. Biogás como combustível de energia renovável — Uma revisão do aprimoramento, utilização e armazenamento do biogás. *Energy Convers. Manag.* 2017 , 150 , 277–294. [Google Scholar] [CrossRef]

Angelidaki, I.; Treu, L.; Tsapekos, P.; Luo, G.; Campanaro, S.; Wenzel, H.; Kougias, PG. Aprimoramento e utilização de biogás: estado atual e perspectivas. *Biotechnol. Adv.* 2018 , 36 , 452–466. [Google Scholar] [CrossRef]

Sarker, S.; Lamb, JJ; Hjelme, DR; Lien, KM. Visão geral do progresso recente em direção às técnicas de aprimoramento de biogás in situ. *Fuel* 2018 , 226 , 686–697. [Google Scholar] [CrossRef]

Kapoor, R.; Ghosh, P.; Kumar, M.; Vijay, VK. Avaliação de tecnologias de aprimoramento de biogás e perspectivas futuras: uma revisão. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019 , 26 , 11631–11661. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Adnan, AI; Ong, MY; Nomanbhay, S.; Chew, KW; Show, PL Tecnologias para o aprimoramento do biogás em biometano: uma revisão. *Bioengenharia* 2019 , 6 , 92. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Atelge, MR; Senol, H.; Djaafri, M.; Hansu, TA; Krisa, D.; Atabani, A.; Eskicioglu, C.; Muratçobanoğlu, H.; Unalan, S.; Kalloum, S.; et al. Uma visão geral crítica dos métodos de última geração para processos de purificação e utilização de biogás. *Sustainability* 2021 , 13 , 11515. [Google Scholar] [CrossRef]

Calise, F.; Cappiello, FL; Cimmino, L.; d'Accadia, MD; Vicidomini, M. Uma revisão do estado da arte da produção de biometano: avanços recentes e integração de energias renováveis. *Energies* 2021 , 14 , 4895. [Google Scholar] [CrossRef]

Mignogna, D.; Ceci, P.; Cafaro, C.; Corazzi, G.; Avino, P. Produção de biogás e biometano como fontes de energia renováveis: uma revisão. *Appl. Sci.* 2023 , 13 , 10219. [Google Scholar] [CrossRef]

Karne, H.; Mahajan, U.; Ketkar, U.; Kohade, A.; Khadilkar, P.; Mishra, A. Uma revisão sobre sistemas de atualização de biogás. *Matéria. Hoje Proc.* 2023 , 72 , 775–786. [Google Scholar] [CrossRef]

Baena-Moreno, FM; Le Saché, E.; Pastor-Perez, L.; Reina, TR Tecnologias baseadas em membranas para o aprimoramento do biogás: uma revisão. *Environ. Chem. Lett.* 2020 , 18 , 1649–1658. [Google Scholar] [CrossRef]

Paolini, V.; Tratzi, P.; Torre, M.; Tomassetti, L.; Segreto, M.; Petracchini, F. Capítulo 3 — Lavagem com água para o aprimoramento do biogás: desenvolvimentos e inovações. Em *Tecnologias emergentes e sistemas biológicos para o aprimoramento do biogás* ; Nabin, A., Ottosen, LDM, Vedel, M., Kofoed, W., Pant, D., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, EUA, 2021; pp. 57–71. [Google Scholar]

Abd, AA; Othman, MR; Helwani, Z.; Kim, J. Uma visão geral do aprimoramento do biogás via adsorção por oscilação de pressão: navegando por insights bibliométricos em direção a uma estrutura conceitual e caminhos futuros de pesquisa. *Energy Convers. Manag.* 2024 , 306 , 118268. [Google Scholar] [CrossRef]

Muntaha, N.; Rain, MI; Goni, LKM; Ali Shaikh, MA; Jamal, MS; Hossain, M. Uma revisão sobre a minimização do dióxido de carbono na tecnologia de aprimoramento do biogás por processos de absorção química. *ACS Omega* 2022 , 7 , 33680–33698. [Google Scholar] [CrossRef]

Nayeem, A.; Shariffuddin, JH; Yousuf, A. Capítulo 3 — Tecnologia de Absorção para o Aprimoramento do Biogás em Biometano. Em *Applied Biotechnology Reviews, Biogas to Biomethane* ; Yousuf, A., Melville, L., Eds.; Woodhead Publishing: Cambridge, Reino Unido, 2024; pp. 69–84. [Google Scholar]

Wu, L.; Wei, W.; Canção, L.; Woźniak-Karczewska, M.; Chrzanowski, Ł.; Ni, B.-J. Valorização do biogás produzido na digestão anaeróbica: Remoção biológica e bioconversão de CO₂ em biogás. *Renovar. Sustentar.* 2021 , 150 , 111448. [Google Scholar] [CrossRef]

Lóránt, B.; Tardy, GM. Situação atual das tecnologias de aprimoramento biológico do biogás. *Period. Polytech. Chem. Eng.* 2022 , 66 , 465–481. [Google Scholar] [CrossRef]

Chatzis, A.; Gkotsis, P.; Zouboulis, A. Metanação biológica (MB): uma revisão do estado da arte sobre os recentes avanços da pesquisa e a implementação prática em unidades de MB em escala real. *Energy Convers. Manag.* 2024 , 314 , 118733. [Google Scholar] [CrossRef]

Meena, PK; Pal, AA. Uma revisão abrangente sobre o enriquecimento de metano em biogás através do processo de purificação usando adsorventes à base de biomassa. *Biomass Convers. Biorefin.* 2024 , 15 , 8287–8309. [Google Scholar] [CrossRef]

Rönsch, S.; Schneider, J.; Matthischke, S.; Schlüter, M.; Götz, M.; Lefebvre, J.; Prabhakaran, P.; Bajohr, S. Revisão sobre metanação — dos fundamentos aos projetos atuais. *Fuel* 2016 , 166 , 276–296. [Google Scholar] [CrossRef]

Wu, Y.; Ye, X.; Wang, Y.; Wang, L. Produção de metano a partir de biomassa por conversão termoquímica: uma revisão. *Catalysts* 2023 , 13 , 771. [Google Scholar] [CrossRef]

Khan, MU; Lee, JTE; Bashir, MA; Dissanayake, PD; Ok, YS; Tong, YW; Shariati, MA; Wu, S.; Ahring, BK. Situação atual do aprimoramento do biogás para uso direto de biometano: uma revisão. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021 , 149 , 111343. [Google Scholar] [CrossRef]

Ahmed, SF; Mofijur, M.; Tarannum, K.; Chowdhury, AT; Rafa, N.; Nuzhat, S.; Kumar, S.; Vo, D.-VN; Lichtfouse, E.; Mahlia, TMI. Aprimoramento, economia e utilização do biogás: uma revisão. *Environ. Chem. Lett.* 2021 , 19 , 4137–4164. [Google Scholar] [CrossRef]

Mallouppas, G.; Yfantis, EA; Ioannou, C.; Paradeisiotis, A.; Ktoris, A. Aplicação de biogás e biometano como combustíveis marítimos: uma revisão de pesquisas, desenvolvimento tecnológico, propostas de inovação e potenciais de mercado. *Energies* 2023 , 16 , 2066. [Google Scholar] [CrossRef]

Scarlat, N.; Dallemand, J.-F.; Fahl, F. Biogás: desenvolvimentos e perspectivas na Europa. *Energias Renováveis* 2018 , 129 , 457–472. [Google Scholar] [CrossRef]

Sulewski, P.; Ignaciuk, W.; Szymańska, M.; Wąs, A. Desenvolvimento do mercado de biometano na Europa. *Energias* 2023 , 16 , 2001. [Google Scholar] [CrossRef]

Schmid, C.; Horschig, T.; Pfeiffer, A.; Szarka, N.; Thrän, D. Aprimoramento do biogás: uma revisão das estratégias nacionais de biometano e políticas de apoio em países selecionados. *Energies* 2019 , 12 , 3803. [Google Scholar] [CrossRef]

IEA. Disponível online: <https://www.iea.org/about/structure> (acessado em 8 de abril de 2025).

Rede Europeia de Operadores de Sistemas de Transmissão de Gás (ENTSOG). Disponível online: <https://ec.europa.eu/digital-building-blocks/sites/pages/viewpage.action?pagelId=533365448> (acessado em 8 de abril de 2025).

Uddin, M.; Wright, M. Fundamentos, desafios e avanços tecnológicos da digestão anaeróbica. *Phys. Sci. Rev.* 2023 , 8 , 2819–2837. [Google Scholar] [CrossRef]

Ge, X.; Xu, F.; Li, Y. Digestão anaeróbica em estado sólido de biomassa lignocelulósica: progressos recentes e perspectivas. *Bioresour. Technol.* 2016 , 205 , 239–249. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Nie, E.; He, P.; Zhang, H.; Hao, L.; Shao, L.; Lü, F. Como a temperatura regula a digestão anaeróbica? *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021 , 150 , 111453. [Google Scholar] [CrossRef]

Wellinger, A.; Murphy, J.; Baxter, D. *Manual de Biogás: Ciência, Produção e Aplicações* ; Woodhead Publishing Limited: Cambridge, Reino Unido, 2013. [Google Scholar]

Tansel, B.; Surita, SC. Gerenciamento de siloxanos em instalações de biogás para energia: comparação econômica de práticas de pré e pós-combustão. *Waste Manag.* 2019 , 96 , 121–127. [Google Scholar] [CrossRef]

Angelidaki, I.; Xie, L.; Luo, G.; Zhang, Y.; Oechsner, H.; Lemmer, A.; Munoz, R.; Kougias, PG *Biogas Upgrading Current and Emerging Technologies* , 2^a ed.; Elsevier Inc.: Amsterdam, Holanda, 2019. [Google Scholar]

López, ME; Rene, ER; Veiga, MC; Kennes, C. Tecnologias de biogás e técnicas de limpeza. Em *Química Ambiental para um Mundo Sustentável* ; Lichtfouse, E., Schwarzbauer, J., Robert, D., Eds.; Springer: Dordrecht, Alemanha, 2012; Volume 2, pp. 347–377. [Google Scholar]

Sisani, E.; Cinti, G.; Discépoli, G.; PENCHINI, D.; Desideri, U.; Marmottini, F. Remoção adsorptiva de H₂S em condições de biogás para sistemas de células de combustível de alta temperatura. *Internacional J. Energia de Hidrogênio* 2014 , 39 , 21753–21766. [Google Scholar] [CrossRef]

Liu, X.; Wang, B.; Dong, X.; Qiu, Y.; Meng, Q. Efeito de aprimoramento de nanofluidos no desempenho de dessulfurização e regeneração de sistemas baseados em líquidos iônicos. *J. Hazard. Mater.* 2021 , 419 , 126394. [Google Scholar] [CrossRef]

Lin , C.; Qin, W.; Dong, C. Adsorção e decomposição de H₂S na superfície α -Fe₂O₃ (001) gradualmente reduzida: um estudo DFT. *Appl . Surf. Sci.* 2016 , 387 , 720–731. [Google Scholar] [CrossRef]

Ghimire, A.; Gyawali, R.; Lens, PNL; Lohani, SP Capítulo 11—Tecnologias para remoção de sulfeto de hidrogênio (H₂S) do biogás. Em *Tecnologias emergentes e sistemas biológicos para aprimoramento do biogás* ; Nabin, A., Ottosen, LDM, Vedel, M., Kofoed, W., Pant, D., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, EUA, 2021; pp. 295–320. [Google Scholar]

Costa, C.; Cornacchia, M.; Pagliero, M.; Fabiano, B.; Vocciante, M.; Reverberi, AP. Adsorção de sulfeto de hidrogênio por óxidos de ferro e seus compósitos poliméricos: um estudo de caso de aplicação à purificação de biogás. *Materials* 2020 , 13 , 4725. [Google Scholar] [CrossRef]

Abdirakhimov, M.; Al-Rashed, MH; Wójcik, J. Tentativas recentes de remoção de H₂S de várias misturas gasosas usando zeólitas e adsorventes à base de resíduos. *Energies* 2022 , 15 , 5391. [Google Scholar] [CrossRef]

Hoang, TLG; Doan, DT; Nanda, S.; Lavoie, R.; Nguyen-Tri, P. Desenvolvimento de sistemas baseados em estruturas metalorgânicas para remoção de H_2S : uma revisão abrangente. *Coord. Chem. Rev.* 2025 , 529 , 216466. [Google Scholar] [CrossRef]

Esser, G.; Crits, R.; Barozzino-Consiglio, G.; Daouli, A.; Maurin, G.; Filinchuk, Y.; Hermans, S.; Steenhaut, T. Aplicagem de poliaminas em estruturas metalorgânicas como uma estratégia eficiente para a remoção seletiva de H_2S em condições úmidas. *ACS Appl. Eng. Mater.* 2024 , 2 , 2619–2625. [Google Scholar] [CrossRef]

Das, B.; Basumatary, S.; Kalita, P. Remoção de sulfeto de hidrogênio do biogás bruto usando um novo adsorvente de biochar composto de casca de coco e bagaço de cana-de-açúcar. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2024 , 1372 , 012040. [Google Scholar] [CrossRef]

Bora, D.; Roy, K.; Mahanta, P.; Barbora, L. Remoção de sulfeto de hidrogênio do biogás usando biochars naturalmente alcalinos derivados de biomassa: análise de desempenho e cinética. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2024 , 26 , 1544–1556. [Google Scholar] [CrossRef]

Martin, AD; Ravenni, G.; Thomsen, TP Remoção de sulfeto de hidrogênio de baixo custo com biochar e biochar ativado. *Next Res.* 2025 , 2 , 100286. [Google Scholar] [CrossRef]

Passalacqua, E.; Correcher, R.; Mantovani, M.; Collina, E.; Fullana, A. Uso de nanopartículas de ferro zero-valente encapsuladas em carbono provenientes de biomassa residual para remoção úmida de sulfeto de hidrogênio. *Waste Manag. Res.* 2024 , 43 , 0734242X241273800. [Google Scholar] [CrossRef]

Cattaneo, CR; Muñoz, R.; Korshin, GV; Naddeo, V.; Belgiorno, V.; Zarra, T. Dessulfurização biológica de biogás: uma revisão abrangente sobre o metabolismo microbiano de sulfeto e biotecnologias de tratamento. *Sci. Total Environ.* 2023 , 893 , 164689. [Google Scholar] [CrossRef]

Cano, PI; Almenglo, F.; Ramírez, M.; Cantero, D. Integração de um biorreator de nitrificação e um biofiltro anóxico para tratamento simultâneo de água rica em amônio e dessulfurização de biogás. *Chemosphere* 2021 , 284 , 131358. [Google Scholar] [CrossRef]

Poser, M.; Duarte e Silva, LR; Peu, P.; Couvert, A.; Dumont, É. Resíduos de concreto celular: uma nova maneira eficiente para a remoção de H_2S . *Sep. Purif. Technol.* 2023 , 309 , 123014. [Google Scholar] [CrossRef]

Mohammadi, K.; Vaiskunaite, R.; Zagorskis, A. Materiais inovadores de biofiltração para remoção de H_2S do biogás. *Environ. Health Eng. Manag.* 2024 , 11 , 361–370. [Google Scholar] [CrossRef]

Severi, CA; Pascual, C.; Perez, V.; Muñoz, R.; Lebrero, R. Dessulfurização de biogás em escala piloto por meio de biofiltração anóxica. *J. Hazard. Mater.* 2025 , 485 , 136830. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Caliari, PC; Pacheco, MJ; Ciríaco, LF; Lopes, AMC. Oxidação anódica de sulfeto a sulfato: Efeito da densidade de corrente na cinética do processo. *J. Braz. Chem. Soc.* 2017 , 28 , 557–566. [Google Scholar] [CrossRef]

Borgquist, S.; Villadsen, SNB; Skitsi, C.; Boesgaard, K.; Abildskov, J.; Rivera-Tinoco, E.; Rasmussen, JB; Fosbøl, PL. Análise de parâmetros de eletrodepuração Power-to-X para dessulfurização de biogás. *J. Hazard. Mater.* 2023 , 452 , 131334. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Zhang, L.; De Schryver, P.; De Gusseme, B.; De Muynck, W.; Boon, N.; Verstraete, W. Tecnologias químicas e biológicas para controle de emissão de sulfeto de hidrogênio em sistemas de esgoto: uma revisão. *Água Res.* 2008 , 42 , 1–12. [Google Scholar] [CrossRef]

Galloni, M.; Di Marcoberardino, G. Tecnologia de aprimoramento do biogás: análise de processos convencionais e soluções emergentes. *Energies* 2024 , 17 , 2907. [Google Scholar] [CrossRef]

Grande, CA. Aprimoramento de biogás por adsorção por oscilação de pressão. Em *Tecnologia de Processos de Engenharia de Biocombustíveis*; Dos Santos Bernardes, MA, Ed.; IntechOpen: Londres, Reino Unido, 2011. [Google Scholar]

Abd, AA; Shabbani, HJK; Helwani, Z.; Othman, MR Estudo experimental e otimização numérica estática do projeto escalável de adsorção por oscilação de pressão não adiabática e não isotérmica para o aprimoramento de biogás. *Energy* 2022 , 257 , 124781. [Google Scholar] [CrossRef]

Canevesi, R.; Grande, CA. Aprimoramento de biogás por adsorção por oscilação de pressão usando zeólita 4A. Efeito da purga no desempenho do processo. *Sep. Purif. Technol.* 2023 , 309 , 123015. [Google Scholar] [CrossRef]

Chen, Y.-F.; Lin, P.-W.; Chen, W.-H.; Yen, F.-Y.; Yang, H.-S.; Chou, C.-T. Aprimoramento de biogás por adsorção por oscilação de pressão com planejamento de experimentos. *Processes* 2021 , 9 , 1325. [Google Scholar] [CrossRef]

Canevesi, RL; Borba, CE; Da Silva, EA; Grande, CA. Rumo ao projeto de uma unidade de adsorção por oscilação de pressão para o aprimoramento de biogás em pequena escala. *Energy Procedia* 2019 , 158 , 848–853. [Google Scholar] [CrossRef]

Golmakani, A.; Wadi, B.; Manović, V.; Nabavi, SA. Avaliação comparativa dos processos PSA, PVSA e PSA duplo para o aprimoramento do biogás: o dilema da pureza, recuperação e consumo de energia. *Energies* 2023 , 16 , 6840. [Google Scholar] [CrossRef]

Abd, AA; Othman, MR; Helwani, Z.; Kim, J. Da geração de resíduos à geração de energia: comparação de desempenho entre as tecnologias de adsorção por oscilação de pressão e absorção por amina para o aprimoramento de biogás contendo sulfeto de hidrogênio para padrões de qualidade de combustível. *Energy* 2023 , 272 , 127060. [Google Scholar] [CrossRef]

Wantz, E.; Benizri, D.; Dietrich, N.; Hébrard, G. Abordagem de modelagem baseada em taxas para lavagem com água de alta pressão com vazão de gás instável e absorção multicomponente aplicada ao aprimoramento de biogás. *Appl. Energy* 2022 , 312 , 118754. [Google Scholar] [CrossRef]

Wantz, E.; Lemonnier, M.; Benizri, D.; Dietrich, N.; Hébrard, G. Lavador de água inovador de alta pressão para aprimoramento de biogás em escala agrícola usando vácuo para regeneração de água. *Appl. Energy* 2023 , 350 , 121781. [Google Scholar] [CrossRef]

Benizri, D.; Dietrich, N.; Labeyrie, P.; Hébrard, G. Um depurador compacto e econômico para melhorar os sistemas de purificação de biogás em fazendas. *Sep. Purif. Technol.* 2019 , 219 , 169–179. [Google Scholar] [CrossRef]

Walozi, R.; Nabuuma, B.; Sebiti, A. Aplicação da técnica de lavagem com água de baixa pressão para aumentar o teor de metano no biogás. *Univers. J. Agric. Res.* 2016 , 4 , 60–65. [Google Scholar] [CrossRef]

Hjuler, K.; Aryal, N. Revisão da atualização do biogás ; Centro Dansk Gasteknisk: Horsholm, Dinamarca, 2017; páginas 8–9. [Google Acadêmico]

Cavaignac, RS; Ferreira, NL; Guardani, R. Avaliação técnico-econômica e ambiental do processo de aprimoramento do biogás via lavagem com amina. *Renew. Energy* 2021 , 171 , 868–880. [Google Scholar] [CrossRef]

Jabraeelzadeh, A.; Gharehghani, A.; Saray, JA; Andwari, AM; Borhani, TN. Análise técnico-econômica do aprimoramento do biogás por meio de lavagem com aminas: um estudo comparativo de diferentes aminas individuais. *Fuel* 2025 , 381 , 33662. [Google Scholar] [CrossRef]

Morero, B.; Campanella, EA Simulação do processo de absorção química usando soluções de amina para purificação de biogás. *Inf. Tecnol.* 2013 , 24 , 25–32. [Google Scholar] [CrossRef]

Dutcher, B.; Fan, M.; Russell, AG. Desenvolvimento da tecnologia de captura de CO₂ baseada em aminas desde o início de 2013 — Uma revisão. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2015 , 7 , 2137–2148. [Google Scholar] [CrossRef]

Nordberg, Å.; Edström, M.; Uusi-Penttilä, M.; Rasmuson, Å.C. Dessorção seletiva de dióxido de carbono de lodo de esgoto para enriquecimento de metano in situ: experimentos de enriquecimento em escala piloto. *Biomass Bioenergy* 2012 , 37 , 196–204. [Google Scholar] [CrossRef]

Koutsiantzi, C.; Koukovinos, K.; Liatsou, A.; Gkotsis, P.; Zouboulis, A.; Mitrakas, M.; Kikkinides, ES. Aprimoramento do biogás da digestão anaeróbica usando um sistema de membrana de dois estágios em condições de escala piloto. *Environ. Res.* 2024 , 245 , 118080. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Rodero, MDR; Muñoz, R.; González-Sánchez, A.; Ruiz, HA; Quijano, G. Materiais de membrana para purificação e atualização de biogás: Fundamentos, avanços recentes e desafios. *J. Meio Ambiente. Química. Eng.* 2024 , 12 , 114106. [Google Scholar] [CrossRef]

Kelley, BT; Valencia, JA; Northrop, PS; Mart, CJ. Zona de congelamento controlada™ para o desenvolvimento de reservas de gás ácido. *Energy Procedia* 2011 , 4 , 824–829. [Google Scholar] [CrossRef]

Pellegrini, LA; De Guido, G.; Langé, S. Biogás para biometano liquefeito via tecnologias de aprimoramento criogênico. *Renew. Energy* 2018 , 124 , 75–83. [Google Scholar] [CrossRef]

Naquash, A.; Agarwal, N.; Nizami, M.; Nga, NN; Aziz, M.; Lee, M. Desbloqueando o potencial das tecnologias de aprimoramento de biogás criogênico integradas à produção de bio-GNL: uma avaliação comparativa. *Appl. Energy* 2024 , 371 , 123720. [Google Scholar] [CrossRef]

Song, C.; Liu, Q.; Deng, S.; Li, H.; Kitamura, Y. Tecnologias de captura de CO₂ baseadas em criogenia : desenvolvimentos de ponta e desafios atuais. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019 , 101 , 265–278. [Google Scholar] [CrossRef]

Riva, M.; Campestrini, M.; Toubassy, J.; Clodic, D.; Stringari, P. Modelos de equilíbrio sólido-líquido-vapor para o aprimoramento criogênico de biogás. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014 , 53 , 17506–17514. [Google Scholar] [CrossRef]

Vakili, SS; Kargari, A.; Sanaeepur, H. Capítulo 12 — Processos híbridos de separação de gases por membrana criogênica. Em *Tendências atuais e desenvolvimentos futuros em (bio) membranas* ; Basile, A., Favvas, EP, Eds.; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2024; pp. 349–368. [Google Scholar]

Garlapati, VK; Sharma, S.; Sevda, S. Capítulo 14 — Aprimoramento Fotossintético de Biogás: Uma Tecnologia Biológica Atrativa para o Aprimoramento de Biogás. Em *Tecnologias Emergentes e Sistemas Biológicos para o Aprimoramento de Biogás* ; Nabin, A., Ottosen, LDM, Vedel, M., Kofoed, W., Pant, D., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, EUA, 2021; pp. 383–409. [Google Scholar]

Deviram, G.; Thangavel, M.; Susaimanickam, A.; Tharifkhan, SA; Devanesan, AA; Arivalagan, P. Aplicações de biomassa de microalgas e cianobactérias em um caminho para um ambiente seguro, mais limpo e sustentável. *J. Clean. Prod.* 2020 , 253 , 119770. [Google Scholar] [CrossRef]

Méndez, L.; García, D.; Perez, E.; Blanco, S.; Munoz, R. Aprimoramento fotossintético de biogás da digestão anaeróbica de lodo misto em um fotobiorreator algal-bacteriano ao ar livre em escala piloto. *J. Water Process Eng.* 2022 , 48 , 102891. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, J.; Liu, H.; Fu, B.; Xu, K.; Chen, J. Ligação trófica entre acetógenos sintróficos e homoacetógenos durante a fermentação acidogênica anaeróbica de lodo de esgoto. *Biochem. Eng. J.* 2013 , 70 , 1–8. [Google Scholar] [CrossRef]

Jepleting, A.; Mecha, AC; Sombei, D.; Moraa, D.; Chollom, MN Potencial de materiais de baixo custo para purificação de biogás: uma revisão de desenvolvimentos recentes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2025 , 210 , 115152. [Google Scholar] [CrossRef]

Imran-Masood, M.; García-Díez, E.; Usman, M.; Lodhi, BK; Waqas, M.; García, S. Desenvolvimento de um novo biochar para captura de CO₂ e aprimoramento de biogás: testes estáticos e dinâmicos. *J. CO₂ Util.* 2024 , 89 , 102958. [Google Scholar] [CrossRef]

Lee, JT; Ok, YS; Song, S.; Dissanayake, PD; Tian, H.; Tio, ZK; Tong, YW. Utilização de biochar na digestão anaeróbica de resíduos alimentares para a criação de uma economia circular por meio do aprimoramento do biogás e do tratamento do digestato. *Bioresour. Technol.* 2021 , 333 , 125190. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Wei, H.; Deng, S.; Hu, B.; Chen, Z.; Wang, B.; Huang, J.; Yu, G. Carvão ativado granular derivado de bambu para alta adsorção de CO₂ : O papel dominante dos microporos estreitos. *ChemSusChem* 2012 , 5 , 2354–2360. [Google Scholar] [CrossRef]

Peng, X.; Peng, Y.-L.; Huo, M.; Zhao, J.; Ma, Q.; Liu, B.; Deng, C.; Yang, M.; Dong, B.; Sun, C.; et al. Captura de CO₂ pré-combustão altamente eficiente usando suspensão porosa formada com ZIF-8 e isoparafina C16. *Sep. Purif. Technol.* 2023 , 305 , 122424. [Google Scholar] [CrossRef]

Tsang, MY; Convery, JP; Lai, B.; Cahir, J.; Erbay, Y.; Rooney, D.; Murrer, B.; James, SL. Líquidos porosos como solventes para a separação econômica de dióxido de carbono do metano. *Mater. Today* 2022 , 60 , 9–16. [Google Scholar] [CrossRef]

Muñoz, R.; Meier, L.; Diaz, I.; Jeison, D. Uma revisão sobre o estado da arte das tecnologias físico-químicas e biológicas para o aprimoramento do biogás. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2015 , 14 , 727–759. [Google Scholar] [CrossRef]

Aile, N. Biogás para Biometano. Em *Revisão de Tecnologia* ; Universidade Técnica de Viena: Viena, Áustria, 2012. [Google Scholar]

Beil, M.; Beyrich, W. Melhoramento do biogás para biometano. In: Manual do Biogás ; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2013; pp. 342–377. [Google Scholar]

Sahota, S.; Shah, G.; Ghosh, P.; Kapoor, R.; Sengupta, S.; Singh, P.; Vijay, V.; Sahay, A.; Vijay, VK; Thakur, IS. Revisão das tendências em tecnologias de aprimoramento de biogás e perspectivas futuras. Bioresour. Technol. Rep. 2018 , 1 , 79–88. [Google Scholar] [CrossRef]

Petersson, A.; Wellinger, A. Tecnologias de aprimoramento do biogás — desenvolvimentos e inovações. Disponível online: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2009/10/upgrading_rz_low_final.pdf (acessado em 10 de dezembro de 2024).

Hoye, K.; Hulteberg, C.; Svensson, M.; Jernberg, J.; Norregard, O. Revisão técnica de atualização de biogás ; Energiforsk: Estocolmo, Suécia, 2016. [Google Scholar]

Nie, H.; Jiang, H.; Chong, D.; Wu, Q.; Xu, C.; Zhou, H. Comparação da lavagem com água e da absorção com carbonato de propileno no processo de aprimoramento do biogás. Energy Fuels 2013 , 27 , 3239–3245. [Google Scholar] [CrossRef]

Persson, M.; Jönsson, O.; Wellinger, A. Biogás: Aprimoramento dos padrões de combustível para veículos e injeção na rede elétrica. Disponível online: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2007/12/upgrading_report_final.pdf (acessado em 10 de dezembro de 2024).

Ong, M.; Williams, R.; Kaffka, S. RASCUNHO Avaliação Comparativa de Opções Tecnológicas para Limpeza de Biogás ; Universidade da Califórnia: Los Angeles, CA, EUA, 2014. [Google Scholar]

Yang, L.; Ge, X.; Wan, C.; Yu, F.; Li, Y. Progresso e perspectivas na conversão de biogás em combustíveis para transporte. Renew. Sustain. Energy Rev. 2014 , 40 , 1133–1152. [Google Scholar] [CrossRef]

Huertas, J.; Giraldo, N.; Izquierdo, S. Remoção de H₂S e CO₂ do biogás por absorção de amina. Transferência de massa em processos de engenharia química ; IntechOpen: Londres, Reino Unido, 2011. [Google Scholar]

Luo, G.; Angelidaki, I. Aprimoramento integrado de biogás e utilização de hidrogênio em um reator anaeróbio contendo cultura metanogênica hidrogenotrófica enriquecida. *Biotechnol. Bioeng.* 2012 , 109 , 2729–2736. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Agneessens, LM; Ottosen, LDM; Voigt, NV; Nielsen, JL; de Jonge, N.; Fischer, CH; Kofoed, MVW. Aprimoramento in situ de biogás com adições pulsadas de H₂: a relevância da adaptação de metanogênicos e do nível de carbono inorgânico. *Bioresour. Technol.* 2017 , 233 , 256–263. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Kadam, R.; Panwar, NL. Avanços recentes no enriquecimento de biogás e suas aplicações. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017 , 73 , 892–903. [Google Scholar] [CrossRef]

Calbry-Muzyka, AS; Schildhauer, TJ Metanação direta de biogás - desafios técnicos e progressos recentes. *Front. Energy Res.* 2020 , 8 , 570887. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, F.; Swinbourn, R.; Li, C. Exportação da energia solar australiana: Exportação de combustível verde renovável líquido. *Int. J. Hydrogen Energy* 2023 , 48 , 14763–14784. [Google Scholar] [CrossRef]

Lecker, B.; Illi, L.; Lemmer, A.; Oechsner, H. Metanação biológica de hidrogênio — Uma revisão. *Bioresour. Technol.* 2017 , 245 , 1220–1228. [Google Scholar] [CrossRef]

Vesselli, E.; Schweicher, J.; Bundhoo, A.; Frennet, A.; Kruse, N. Hidrogenação catalítica de CO₂ em níquel: nova visão por cinética química transiente. *J. Phys. Chem. C* 2011 , 115 , 1255–1260. [Google Scholar] [CrossRef]

Brooks, KP; Hu, J.; Zhu, H.; Kee, RJ. Metanação de dióxido de carbono por redução de hidrogênio usando o processo Sabatier em reatores de microcanais. *Chem. Eng. Sci.* 2007 , 62 , 1161–1170. [Google Scholar] [CrossRef]

Sahebdehfar, S.; Ravanchi, MT. Utilização de dióxido de carbono para produção de metano: uma análise termodinâmica. *J. Pet. Sci. Eng.* 2015 , 134 , 14–22. [Google Scholar] [CrossRef]

Panagiotopoulou, P.; Kondarides, DI; Verykios, X. Metanação seletiva de CO sobre catalisadores de metais nobres suportados: Efeitos da natureza da fase metálica no desempenho catalítico. *Appl. Catal. A Gen.* 2008 , 344 , 45–54. [Google Scholar] [CrossRef]

Abdel-Mageed, AM; Widmann, D.; Olesen, SE; Chorkendorff, I.; Biskupek, J.; Behm, RJ. Metanação seletiva de CO em catalisadores Ru/TiO₂ : papel e influência das interações metal-suporte. *ACS Catal.* 2015 , 5 , 6753–6763. [Google Scholar] [CrossRef]

Meng, F.; Li, X.; Li, M.; Cui, X.; Li, Z. Desempenho catalítico da metanação de CO sobre o catalisador Ni/Al₂O₃ promovido por La em um reator de leito fluidizado. *Chem. Eng. J.* 2017 , 313 , 1548–1555. [Google Scholar] [CrossRef]

Qiu, M.; Tao, H.; Li, Y.; Zhang, Y. Insight into the mechanism of CO₂ and CO methanation over Cu (100) and Co-modified Cu (100) surfaces: A DFT study. *Appl. Surf. Sci.* 2019 , 495 , 143457. [Google Scholar] [CrossRef]

Ma, J.; Li, S.; Xu, B.; Chu, W.; Jiang, Q.; Liu, Y. Promoção de catalisadores de metanação de CO₂ à base de Ni em baixa temperatura por LaOx confinado em canais de sílica mesoporosa. *Mol. Catal.* 2025 , 574 , 114883. [Google Scholar] [CrossRef]

Peebles, DE; Goodman, DW; White, JM. Metanação de dióxido de carbono em Ni (100) e os efeitos de modificadores de superfície. *J. Phys. Chem.* 1983 , 87 , 4378–4387. [Google Scholar] [CrossRef]

Fu, S.; Angelidaki, I.; Zhang, Y. Aprimoramento in situ de biogás por bioconversão de CO₂ em CH₄. *Trends Biotechnol.* 2021 , 39 , 336–347. [Google Scholar] [CrossRef]

Habib, MA; Abdulrahman, GAQ; Alquaity, ABS; Qasem, NAA. Combustão, produção e aplicações de hidrogênio: uma revisão. *Alex. Eng. J.* 2024 , 100 , 182–207. [Google Scholar] [CrossRef]

Manna, J.; Jha, P.; Sarkhel, R.; Banerjee, C.; Tripathi, AK; Nouni, MR. Oportunidades para a produção de hidrogênio verde nas indústrias de refino de petróleo e síntese de amônia na Índia. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021 , 46 , 38212–38231. [Google Scholar] [CrossRef]

Chehade, G.; Dincer, I. Progresso na produção de amônia verde como potencial combustível livre de carbono. *Fuel* 2021 , 299 , 120845. [Google Scholar] [CrossRef]

Shen, J.; Zhang, Q.; Tian, S.; Li, X.; Liu, J.; Tian, J. O papel do hidrogênio na produção de ferro e aço: tendências de desenvolvimento, potenciais de descarbonização e impactos econômicos. *Int. J. Hydrogen Energy* 2024 , 92 , 1409–1422. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhang, K.; He, L.; Jiang, L.; Jiang, S.; Yu, R.; Lau, HC; Xie, C.; Chen, Z. O papel do hidrogênio na transição energética da indústria de petróleo e gás. *Energy Rev.* 2024 , 3 , 100090. [Google Scholar] [CrossRef]

Hwang, J.; Maharjan, K.; Cho, H. Uma revisão da utilização de hidrogênio nos setores de geração de energia e transporte: conquistas e desafios futuros. *Int. J. Hydrogen Energy* 2023 , 48 , 28629–28648. [Google Scholar] [CrossRef]

Abe, JO; Popoola, API; Ajenifuja, E.; Popoola, OM Energia, economia e armazenamento de hidrogênio: revisão e recomendação. *Int. J. Hydrogen Energy* 2019 , 44 , 15072. [Google Scholar] [CrossRef]

Shet, SP; Shanmuga Priya, S.; Sudhakar, K.; Tahir, M. Uma revisão sobre as tendências atuais no uso potencial de estruturas metalorgânicas para armazenamento de hidrogênio. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021 , 46 , 11782. [Google Scholar] [CrossRef]

Xie, L.; Xu, J.; Zhang, Y.; He, Y. Capítulo 7—Aprimoramento do Biogás. Em *Advances in Bioenergy* ; Li, Y., Khanal, SK, Eds.; Elsevier: Amsterdam, Holanda, 2020; Volume 5, pp. 309–344. [Google Scholar]

Hashemi, AW; Wijnsma, S.; Hillestad, M.; Austbø, B. Metanação direta versus indireta de biogás para produção de biometano liquefeito: uma avaliação de conceito. *Fuel* 2024 , 371 , 131835. [Google Scholar] [CrossRef]

Mercader, VD; Durán, P.; Aragües-Aldea, P.; Francés, E.; Herguido, J.; Peña, JA Atualização de biogás por metanação intensificada (SESaR): Reação mais adsorção de água - Ciclos de dessorção com catalisador Ni-Fe/Al₂O₃ e zeólita LTA 5A. *Catalão. Hoje* 2024 , 433 , 114667. [Google Scholar] [CrossRef]

Enrich-Prast, A.; Machado-Silva, F.; Bastviken, D.; Crill, P.; Negrão Signori, C. Quimiossíntese. Na *Enciclopédia de Águas Interiores* , 2ª ed.; Mehner, T., Tockner, K., Eds.; Elsevier: Oxford, Reino Unido, 2022; págs. 118–135. [Google Acadêmico]

Borja, R.; Rincón, B. Produção de biogás. Em Reference Module in Life Sciences ; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2017; pp. 1–24. [Google Scholar]

Guneratnam, AJ; Ahern, E.; FitzGerald, JA; Jackson, SA; Xia, A.; Dobson, ADW; Murphy, JD. Estudo do desempenho de um sistema de metanação biológica termofílica. *Bioresour. Technol.* 2017 , 225 , 308–315. [Google Scholar] [CrossRef]

Figeac, N.; Trably, E.; Bernet, N.; Delgenès, J.-P.; Escudié, R. A temperatura e a origem do inóculo influenciam o desempenho da metanação biológica ex-situ do hidrogênio. *Molecules* 2020 , 25 , 5665. [Google Scholar] [CrossRef]

Strübing, D.; Moeller, AB; Mößnang, B.; Lebuhn, M.; Drewes, JE; Koch, K. Capacidade de mudança de carga de um reator anaeróbio termofílico de leito fixo para biometanização dinâmica de H_2 / CO_2 . *Bioresour . Technol.* 2019 , 289 , 121735. [Google Scholar] [CrossRef]

Feickert Fenske, C.; Md, Y.; Strübing, D.; Koch, K. Experimentos preliminares de fluxo de gás identificam condições de fluxo de gás aprimoradas em um reator de leito fixo em escala piloto para metanação biológica de H_2 e CO_2 . *Bioresour . Technol.* 2023 , 371 , 128648. [Google Scholar] [CrossRef]

Feickert Fenske, C.; Kirzeder, F.; Strübing, D.; Koch, K. Aprimoramento de biogás em um reator de leito fixo em escala piloto — Metanação biológica de longo prazo em condições reais de aplicação. *Bioresour. Technol.* 2023 , 376 , 128868. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Thema, M.; Weidlich, T.; Kaul, A.; Bollmann, A.; Huber, H.; Bellack, A.; Karl, J.; Sterner, M. Metanação biológica otimizada de CO_2 com uma cultura pura de arqueas metanogênicas termofílicas em um reator de leito fixo. *Bioresour. Technol.* 2021 , 333 , 125135. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Aghel, B.; Behaein, S.; Wongwises, S.; Shadloo, MS. Uma revisão do progresso recente no aprimoramento do biogás: com ênfase na captura de carbono. *Biomass Bioenergy* 2022 , 160 , 106422. [Google Scholar] [CrossRef]

Salomoni, C.; Caputo, A.; Bonoli, M.; Francioso, O.; Rodriguez-Estrada, MT; Palenzona, D. Produção aprimorada de metano em uma planta de digestão anaeróbica de duas fases, após captura de CO_2 e

adição a resíduos orgânicos. *Bioresour. Technol.* 2011 , 102 , 6443–6448. [Google Scholar] [CrossRef]

Muntau, M.; Lebuhn, M.; Polag, D.; Bajón-Fernández, Y.; Koch, K. Efeitos do enriquecimento de CO₂ na digestão anaeróbica de lodo de esgoto em fermentadores operados continuamente. *Bioresour. Technol.* 2021 , 332 , 125147. [Google Scholar] [CrossRef]

Tao, B.; Zhang, Y.; Heaven, S.; Banks, C.J. Previsão do aumento do pH como medida de controle para a integração da biometanização de CO₂ com a digestão anaeróbica. *Appl. Energy* 2020 , 277 , 115535. [Google Scholar] [CrossRef]

Bajón, F.Y.; Soares, A.; Vale, P.; Koch, K.; Masse, A.L.; Cartmell, E. Aprimorando o processo de digestão anaeróbica por meio do enriquecimento de dióxido de carbono: primeiras percepções sobre os mecanismos de utilização. *Environ. Technol.* 2019 , 40 , 1744–1755. [Google Scholar] [CrossRef]

He, Z.-W.; Zou, Z.-S.; Ren, Y.-X.; Tang, C.-C.; Zhou, A.-J.; Liu, W.; Wang, L.; Li, Z.; Wang, A. Papéis do ferro zero-valente na digestão anaeróbica: mecanismos, avanços e perspectivas. *Sci. Total Environ.* 2022 , 852 , 158420. [Google Scholar] [CrossRef]

Yang, J.; Yang, H.; Xing, T.; Sun, Y.; Qu, B.; Li, L.; Li, Y.; Guo, Y.; Zhen, F.; Pang, Y. Insight into the mechanisms of methane production enhancement by bioaugmentation with H₂/CO₂ in anaerobic digestion. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 113 , 340–347. [Google Scholar] [CrossRef]

Cheng, S.; Xing, D.; Call, D.F.; Logan, B.E. Conversão biológica direta de corrente elétrica em metano por eletrometanogênese. *Environ. Sci. Technol.* 2009 , 43 , 3953–3958. [Google Scholar] [CrossRef]

Kokkoli, A.; Zhang, Y.; Angelidaki, I. Separação eletroquímica microbiana de CO₂ para aprimoramento de biogás. *Bioresour. Technol.* 2018 , 247 , 380–386. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Villano, M.; Aulenta, F.; Ciucci, C.; Ferri, T.; Giuliano, A.; Majone, M. Redução bioeletroquímica de CO₂ a CH₄ via transferência extracelular direta e indireta de elétrons por uma cultura metanogênica hidrogenofílica. *Bioresour. Technol.* 2010 , 101 , 3085–3090. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Ren, J.; Liu, Y.-L.; Zhao, X.-Y.; Cao, J.-P. Metanação de gás de síntese a partir da gaseificação de biomassa: uma visão geral. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020 , 45 , 4223–4243. [Google Scholar] [CrossRef]

Motta, IL; Miranda, NT; Filho, RM; Maciel, MRW. Gaseificação de biomassa em leitos fluidizados: uma revisão dos efeitos do teor de umidade da biomassa e da pressão de operação. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018 , 94 , 998–1023. [Google Scholar] [CrossRef]

Saleem, F.; Harris, J.; Zhang, K.; Harvey, A. Plasma não térmico como uma rota promissora para a remoção de alcatrão do gás de produto da gaseificação de biomassa — Uma revisão crítica. *Chem. Eng. J.* 2020 , 382 , 122761. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhang, Y.; Liang, Y.; Li, S.; Yuan, Y.; Hang, D.; Wu, Y.; Xie, H.; Brindhadev, K.; Pugazhendhi, A.; Xia, C. Uma revisão do gás de pirólise da biomassa: mecanismos de formação, parâmetros de influência e melhorias na aplicação do produto. *Fuel* 2023 , 347 , 128461. [Google Scholar] [CrossRef]

Luo, Z. Conversão de carvão em líquidos e poligeração usando carvões de baixo grau. Em *Carvões de baixo grau para geração de energia, produção de combustível e produtos químicos* ; Luo, Z., Agraniotis, M., Eds.; Woodhead Publishing: Cambridge, Reino Unido, 2017; pp. 241–268. [Google Scholar]

Ferrari, J. Capítulo 4 — Combustíveis renováveis para armazenamento de energia a longo prazo. Em *Planejamento de recursos de serviços públicos de eletricidade* ; Ferrari, J., Ed.; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2021; pp. 109–138. [Google Scholar]

Larsson, A.; Gunnarsson, I.; Tengberg, F. Projeto GoBiGas: Demonstração da Produção de Biometano a partir de Biomassa via Gaseificação. ; Göteborg Energi: Gotemburgo, Suécia, 2018. [Google Scholar] [CrossRef]

Grimalt-Alemany, A.; Skiadas, IV; Gavala, HN Biometanização de gás de síntese: revisão do estado da arte e perspectivas. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 2018 , 12 , 139–158. [Google Scholar] [CrossRef]

Paniagua, S.; Lebrero, R.; Muñoz, R. Biometanização de gás de síntese: estado atual e perspectivas futuras. *Bioresour. Technol.* 2022 , 358 , 127436. [Google Scholar] [CrossRef]

Schöne, C.; Rother, M. Metanogênese a partir de monóxido de carbono. Em Biogênese de hidrocarbonetos. Manual de microbiologia de hidrocarbonetos e lipídios ; Stams, A., Sousa, D., Eds.; Springer: Cham, Suíça, 2019; pp. 123–151. [Google Scholar]

Aryal, N.; Odde, M.; Bøgeholdt Petersen, C.; Ditlev, L.; Ottosen, M.; Vedel, M.; Kofoed, W. Produção de metano a partir de gás de síntese usando um reator de leito fixo com gotejamento. *Bioresour. Technol.* 2021 , 333 , 125183. [Google Scholar] [CrossRef]

Neves, RC; Klein, BC; da Silva, RJ; Rezende, MCAF; Funke, A.; Olivarez-Gómez, E.; Bonomi, A.; Maciel-Filho, R. Uma visão sobre rotas termoquímicas de biomassa para líquidos (BTL) em biorrefinarias integradas de cana-de-açúcar para produção de biocombustível para aviação. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2020 , 119 , 109607. [Google Scholar] [CrossRef]

Motola, V.; Hurtig, O.; Scarlat, N.; Buffi, M.; Georgakaki, A.; Letout, S.; Mountraki, A. Observatório de Tecnologias de Energia Limpa: Biocombustíveis Avançados na União Europeia — Relatório de Situação de 2023 sobre Desenvolvimento Tecnológico, Tendências, Cadeias de Valor e Mercados ; Serviço de Publicações da União Europeia: Luxemburgo, 2023. [Google Scholar]

Figueras, J.; Benbelkacem, H.; Dumas, C.; Buffiere, P. Biometanização de gás de síntese por consórcio anaeróbio misto enriquecido em coluna agitada pressurizada. *Bioresour. Technol.* 2021 , 338 , 125548. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Hoyer, K. Aprimoramento do Biogás — Uma Revisão Técnica. Kuala Lumpur. 2016. Disponível online: <http://sgc.camero.se/ckfinder/userfiles/files/BAPF2016Hoyer+Energiforsk.pdf> (acessado em 10 de fevereiro de 2025).

IEA. Tarefa 37, Nova Lista Atualizada de Usinas de Melhoramento de Biogás da Tarefa 37 de Bioenergia da IEA. Disponível online: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-iea-bioenergy-task-37-updated-list-of-biogas-upgrading-plants/> (acessado em 10 de fevereiro de 2025).

Banco Mundial. O Mundo por Renda e Região. Disponível online: <https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/the-world-by-income-and-region.html> (acessado em 15 de abril de 2025).

Grand View Research. Tamanho, participação e tendências do mercado de biometano por fonte (culturas energéticas, esterco animal, resíduos sólidos urbanos, lodo de esgoto), por uso final (construção, indústria), por região e previsões de segmento. 2024–2030. Disponível online: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biomethane-market-report> (acessado em 28 de abril de 2025).

Marie, M.; Yirga, F.; Alemu, G.; Azadi, H. Situação da utilização de energia e fatores que afetam a adoção da tecnologia de biogás por famílias rurais no noroeste da Etiópia. *Heliyon* 2021 , 18 , e06487. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Pham, CH; Vu, CC; Sommer, SG; Bruun, S. Fatores que afetam a temperatura do processo e a produção de biogás em biodigestores rurais de pequena escala no inverno no norte do Vietnã. *Asian-Australas J. Anim. Sci.* 2014 , 27 , 1050–1056. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Biró, K.; Woon, KS; Ounsaneha, W.; Rattanapan, C. Uma perspectiva global sobre caminhos sustentáveis para a adoção do biogás. *Glob. J. Environ. Sci. Manag.* 2025 , 11 , 825–856. [Google Scholar]

Situmeang, R.; Mazancová, J.; Roubík, H. Barreiras tecnológicas, econômicas, sociais e ambientais à adoção de pequenas usinas de biogás: o caso da Indonésia. *Energies* 2022 , 15 , 5105. [Google Scholar] [CrossRef]

Filanowski, P. Porównanie oraz wyznaczenie wspólnych parametrów jakościowych dla biometanu zatłaczanego do sieci gazowej oraz biometanu przeznaczonego do celów transportowych bioCNG (Comparação e determinação de parâmetros de qualidade comuns para biometano injetado na rede de gás e biometano destinado ao transporte de bioCNG). *Gaz. Woda I Tech. Sanitar.* 2022 , 17 , 12–15. (Em polonês) [Google Scholar]

Flemming, P.; Church, BJ Gas. Capítulo 13; Em *Plant Engineer's Reference Book* , 2ª ed.; Snow, DA, Ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, Reino Unido, 2002; pp. 13–35. [Google Scholar]

The Engineering ToolBox. Combustíveis — Valores Caloríficos Mais Altos e Mais Baixos. 2003. Disponível online: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html (acessado em 3 de fevereiro de 2025).

Ronkainen, M. Biovoima fornece contêineres para transporte de gás à Islândia antes do prazo previsto. Disponível online: <https://biovoima.com/en/news/biovoima-supplied-gas-transportation-containers-to-iceland-ahead-of-schedule> (acessado em 3 de fevereiro de 2025).

EN 16723-2:2017 ; Gás natural e biometano para uso no transporte e biometano para injeção na rede de gás natural — Parte 2: Especificação de combustíveis automotivos. CEN: Bruxelas, Bélgica, 2017.

Recomendação do American Biogas Council sobre a pureza do biogás. Disponível online: <https://americanbiogascouncil.org/resources/rng-purity-recommendation-american-biogas-council/> (acessado em 12 de março de 2025).

Owusu, GO; Maniatis, K. Desenvolvimento de processos de padronização para o documento nº 1.4 do GreenMeUp — Adoção do mercado de biometano verde. 2024. Disponível online: <https://www.greenmeup-project.eu/wp-content/uploads/2024/07/D1.4.pdf> (acessado em 12 de março de 2025).

Aisbl, M. Qualidade do biometano exigida nos países europeus para injeção na rede de gás natural. 2024. Disponível online: <https://www.marcogaz.org/wp-content/uploads/2024/03/Quality-of-biomethane.pdf> (acessado em 11 de março de 2025).

Owusu, GO EBA, Da planta à rede: navegando pela injeção de biometano. 2024. Disponível online: <https://www.europeanbiogas.eu/from-plant-to-grid-navigating-biomethane-injection/> (acessado em 12 de março de 2025).

EN 16723-1:2016 ; Gás natural e biometano para uso no transporte e biometano para injeção na rede de gás natural — Parte 1: Especificações para biometano para injeção na rede de gás natural. CEN: Bruxelas, Bélgica, 2016.

EN 16726:2015+A1:2018 ; Infraestrutura de gás. Qualidade do gás. CEN: Bruxelas, Bélgica, 2018.

Rasi, S.; Lehtinen, J.; Rintala, J. Determinação de compostos orgânicos de silício em biogás de estações de tratamento de águas residuais, aterros sanitários e plantas de codigestão. *Renew. Energy* 2010 , 35 , 2666–2673. [Google Scholar] [CrossRef]

AS4564:2020 ; Gás Natural de Uso Geral. Standards Australia: Sydney, Austrália, 2020.

Biogasworld. Especificações de Qualidade do Gás Natural Renovável na América do Norte. 2019. Disponível online: <https://biogasworld.com/news/renewable-natural-gas-quality-specifications-in-north-america/> (acessado em 10 de março de 2025).

Benhelal, E.; Hoseinpour, M.; Karami, R.; Mirvakili, A.; Rashid, MI Capítulo 6—Análise de Energia e Exergia da Produção e Conversão de Hidrogênio Azul. Em *Conversão e Gestão de Energia de Hidrogênio*; Khan, MMK, Azad, AK, Oo, AMT, Eds.; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2024; pp. 157–207. [Google Scholar]

Bagi, Z.; Ács, N.; Bojti, T.; Kakuk, B.; Rákhely, G.; Strang, O.; Szuhaj, M.; Wirth, R.; Kovács, KL Biometano: O armazenamento de energia, produtos químicos de plataforma e meta de mitigação de gases de efeito estufa. *Anaeróbio* 2017 , 46 , 13–22. [Google Scholar] [CrossRef]

Dincer, I.; Rosen, MA; Al-Zareer, M. Produção de energia química. Em *Sistemas energéticos abrangentes*; Dincer, I., Ed.; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2018; pp. 470–520. [Google Scholar]

Gunawardane, K. Capítulo 1—Evolução da energia do hidrogênio e suas oportunidades potenciais ao redor do mundo. Em *Conversão e gerenciamento de energia do hidrogênio*; Khan, MMK, Azad, AK, Oo, AMT, Eds.; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2024; pp. 3–33. [Google Scholar]

Abbas, HF; Wan Daud, WMA Produção de hidrogênio por decomposição de metano: uma revisão. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010 , 35 , 1160–1190. [Google Scholar] [CrossRef]

da Silva Pinto, RL; Vieira, AC; Scarpetta, A.; Marques, FS; Matos, RM; Bail, JA; Jorge, LMM; Corazza, ML; Ramos, LP. Uma visão geral sobre a produção de combustíveis sintéticos a partir de biogás. *Bioresour. Technol. Rep.* 2022 , 18 , 101104. [Google Scholar] [CrossRef]

Speight, JG Capítulo 12—Gás de síntese e o processo Fischer-Tropsch. Em *A Refinaria do Futuro* , 2ª ed.; Speight, JG, Ed.; Gulf Professional Publishing: Houston, TX, EUA, 2020; pp. 427–468. [Google Scholar]

Bezergianni, S.; Dimitriadis, A. Comparação entre diferentes tipos de diesel renovável. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013 , 21 , 110–116. [Google Scholar] [CrossRef]

Van Dyk, S.; Su, J.; McMillan, JD; Saddler, JN. Biocombustíveis de substituição direta: o papel fundamental que o coprocessamento desempenhará em sua produção. Relatório completo da Tarefa 39 sobre Biocombustíveis de substituição direta, janeiro de 2019. Disponível online: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/09/Task-39-Drop-in-Biofuels-Full-Report-January-2019.pdf> (acessado em 12 de dezembro de 2024).

Kargbo, H.; Harris, JS; Phan, AN. Produção de combustível “drop-in” a partir de biomassa: revisão crítica sobre viabilidade técnico-econômica e sustentabilidade. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021 , 135 , 110168. [Google Scholar] [CrossRef]

Vasudevan, UM; Mai, DHA; Krishna, S.; Lee, EY. Metanotróficos como reservatório de metabólitos secundários bioativos: armadilhas, perspectivas e promessas. *Biotechnol. Adv.* 2023 , 63 , 108097. [Google Scholar]

Brigham, S. Aplicações de polihidroxialcanoatos na indústria médica. *Int. J. Biotechnol. Wellness Ind.* 2012 , 1 , 53–60. [Google Scholar] [CrossRef]

Bugnicourt, E.; Cinelli, P.; Lazzeri, A.; Alvarez, V. Polihidroxialcanoato (PHA): Revisão da síntese, características, processamento e aplicações potenciais em embalagens. *Express Polym. Lett.* 2014 , 8 , 791–808. [Google Scholar] [CrossRef]

Strong, PJ; Xie, S.; Clarke, WP Metano como recurso: os metanotróficos podem agregar valor? *Environ. Sci. Technol.* 2015 , 49 , 4001–4018. [Google Scholar] [CrossRef]

Haag, NL; Grumaz, C.; Wiese, F.; Kirstahler, P.; Merkle, W.; Nägele, HJ; Sohn, K.; Jungbluth, T.; Oechsner, H. Biorrefino verde avançado: Efeitos dos tratamentos de ensilagem na produção de ácido láctico, atividade microbiana e formação suplementar de metano em grama e centeio. *Biomass Convers. Biorefin* 2016 , 6 , 197–208. [Google Scholar] [CrossRef]

Simya, OK; Radhakrishnan, P.; Ashok, A. Capítulo 41—Nanomateriais projetados para aplicações energéticas. Em *Micro e Nanotecnologias, Manual de Nanomateriais para Aplicações Industriais* ; Hussain, CM, Ed.; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2018; pp. 751–767. [Google Scholar]

Guney, MS; Tepe, Y. Classificação e avaliação de sistemas de armazenamento de energia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017 , 75 , 1187–1197. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, M.; Su, C.; Zhu, Z.; Wang, H.; Ge, L. Cátodos compósitos para células a combustível cerâmicas protônicas: Fundamentos e materiais. *Compos. B: Eng.* 2022 , 238 , 109881. [Google Scholar] [CrossRef]

Hong, K.; Choi, M.; Bae, Y.; Min, J.; Lee, J.; Kim, D.; Bang, S.; Lee, H.-K.; Lee, W.; Hong, J. Células a combustível cerâmicas protônicas de metano direto com catalisador bimetálico Ni-Rh auto-montado. *Nat. Commun.* 2023 , 14 , 7485. [Google Scholar] [CrossRef]

Bang, E.-S.; Kim, M.-H.; Park, S.-K. Opções para processamento de combustível de metano em sistema PEMFC com potenciais aplicações marítimas. *Energies* 2022 , 15 , 8604. [Google Scholar] [CrossRef]

Mustafa, L.; Ślefarski, R.; Jankowski, R. Análise termodinâmica de sistemas de turbina a gás alimentados por uma mistura de CH₄ / H₂ . *Sustainability* 2024 , 16 , 531. [Google Scholar] [CrossRef]

Reale, F.; Calabria, R.; Chiariello, F.; Pagliara, R.; Massoli, P. Uma microturbina a gás alimentada por misturas de metano e hidrogênio. *AMM* 2012 , 232 , 792–796. [Google Scholar] [CrossRef]

Yağlı, H.; Koç, Y.; Köse, Ö.; Koç, A.; Yumrutaş, R. Otimização de ciclos Rankine orgânicos simples e regenerativos usando água de refrigeração de um motor de combustão interna alimentado com biogás produzido a partir de resíduos agrícolas. *Process Saf. Environ. Prot.* 2021 , 155 , 17–31. [Google Scholar] [CrossRef]

Benato, A.; Macor, A. Recuperação de calor residual de motor a biogás usando ciclo Rankine orgânico. *Energies* 2017 , 10 , 327. [Google Scholar] [CrossRef]

Köse, Ö.; Koç, Y.; Yağlı, H. Ciclo de Kalina ou ciclo Rankine orgânico para aplicações de recuperação de calor residual industrial? Uma análise abrangente detalhada de desempenho, econômica e ambiental. *Process Saf. Environ. Prot.* 2022 , 163 , 421–437. [Google Scholar] [CrossRef]

Guerron, G.; Nicolalde, JF; Martínez-Góme, J.; Dávila, P.; Velásquez, C. Análise experimental de uma planta piloto em configuração de Ciclo Rankine Orgânico com regenerador e armazenamento de energia térmica (TES-RORC). *Energy* 2024 , 308 , 132964. [Google Scholar] [CrossRef]

IEA. Tarefa de Bioenergia 33: 07 2022 Produção Sustentável de Gás Natural por Gaseificação IEA. Disponível online: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/08/Position-paper-Sustainable-Natural-Gas-production-through-gasification-rev.pdf> (acessado em 11 de março de 2025).

EBA. 22 bilhões de metros cúbicos de biogás foram produzidos na Europa em 2023. 4 de dezembro de 2024. Disponível online: <https://www.europeanbiogas.eu/22-bcm-of-biogas-were-produced-in-europe-in-2023according-to-a-new-report-released-today/> (acessado em 11 de março de 2025).

Biogás na Dinamarca. Disponível online: <https://ens.dk/en/energy-sources/biogas-denmark> (acessado em 10 de março de 2025).

IEA. Bioenergia: Relatório dos Países - Atualização 2024, Implementação da Bioenergia nos Países Membros da IEA Bioenergia, Luc Pelkmans, Coordenador Técnico, IEA Bioenergia TCP, IEA Bioenergia ExCo. 2024. Disponível online: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/01/CountriesReport2024_final.pdf (acessado em 5 de janeiro de 2025).

EBA. Mapa Europeu de Biometano 2022–2023. Disponível online: <https://www.europeanbiogas.eu/strongnew-record-for-biomethane-production-in-europebrshows-eba-gie-biomethane-map-2022-2023-strong/> (acessado em 12 de dezembro de 2024).

EBA. Mapa Europeu do Biometano 2024. Disponível online: <https://www.europeanbiogas.eu/european-biomethane-map-2024/> (acessado em 13 de março de 2025).

Relatório do Mercado Global de Equipamentos para Aprimoramento de Biogás 2024: Tamanho, Impulsionadores e Principais Segmentos, Últimas Análises do Mercado Global pela Empresa de Pesquisa de Mercado. Disponível online: <https://blog.tbrc.info/2024/10/global-biogas-upgrading-equipment-market/> (acessado em 12 de março de 2025).

Emprin, L.; Toop, G.; Yordanova, S.; Alberici, S.; Cihlar, J. Manual para estratégias nacionais de biometano, Guidehouse Netherlands BV 2022. Disponível online: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/09/2022-Manual-for-National-Biomethane-Strategies_Gas-for-Climate.pdf (acessado em 24 de abril de 2025).

Statista. Disponível online: <https://www.statista.com/statistics/263981/worldwide-energy-consumption-forecast-between-1980-and-2030/> (acessado em 24 de abril de 2025).

REPowerEU: Ação Conjunta Europeia para uma Energia Mais Acessível, Segura e Sustentável, Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, Estrasburgo, 8.3.2022. Disponível online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2022:108:FIN> (acessado em 13 de março de 2025).

Molnar, G. 2024 Biometano: Um balanço global, IEA. Disponível online: https://iea.blob.core.windows.net/assets/33c29a6e-a2f2-4e20-9fa1-e057263c893a/IEA_Biomethanewebinar_GergelyMOLNAR.pdf (acessado em 13 de março de 2025).

Relatório do Mercado de Gás, 1º trimestre de 2025. Disponível online: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6bd6c46d-21d7-4ae7-af9f-25dc9f8e7f3b/GasMarketReport,Q1-2025.pdf> (acessado em 13 de março de 2025).

Roteiro da ENTSOG para as redes de gás em 2050. 2019. Disponível online: <https://www.entsog.eu/sites/default/files/2019-12/ENTSOG%20Roadmap%202050%20for%20Gas%20Grids.pdf> (acessado em 14 de março de 2025).

CAN/BNQ 3672-100 ; Biometano — Especificações de Qualidade para Injeção em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Gás Natural. QUEBEC. CNW: Quebec, Canadá, 2023.

RNG. Lei de Redução da Inflação (IRA) Lei Pública 117–169, 136 Stat. 1818. 16 de agosto de 2022. Disponível online: <https://www.rngcoalition.com>. (acessado em 11 de março de 2025).

Horizon Databook: O maior portal mundial de relatórios e estatísticas de mercado. Disponível online: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/biomethane-market/china/statistics> (acessado em 19 de abril de 2025).

Jain, S.; Associação de Biogás Words. Relatório de Mercado do Japão. Disponível online: <http://epower.pw/wp-content/themes/epower/img/WBA-japan-4ppa4.pdf> (acessado em 14 de março de 2025).

Polyplastics Evonik. Uma das maiores usinas de purificação de biogás do Japão utiliza membranas verdes SEPURAN® e já está operando sem problemas. Disponível online: https://www.pp-evonik.com/english/news_release/press/94.html (acessado em 11 de março de 2025).

Horizon Databook: O maior portal mundial de relatórios e estatísticas de mercado. Disponível online: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/biomethane-market/japan/statistics> (acessado em 24 de abril de 2025).

Instalação de Biometano de Malabar. Disponível online: <https://www.jemena.com.au/future-energy/future-gas/Malabar-Biomethane-Injection-Plant/> (acessado em 13 de março de 2025).

Submissão: Consulta da Standards Australia sobre a alteração da norma AS/NZS 4564:2020 - Gás Natural de Uso Geral. 2023. Disponível online: <https://apga.org.au/submissions/standards-australia-consultation-on-amendments-to-as4564> (acessado em 13 de março de 2025).

Kabeyi, JBM; Olanrewaju, AO Produção e Aplicações de Biometano ; IntechOpen: Londres, Reino Unido, 2024. [Google Scholar] [CrossRef]

Hernø, T. Produção de biogás aprimorado - Otimização de custos e impacto climático. EUDP-j.nr. 64018-0512, dezembro de 2020, Centro Dinamarquês de Tecnologia de Gás. Disponível online: https://planenergi.eu/wp-content/uploads/2023/09/Prod_upgraded_biogas_optimization_uk_summary.pdf (acessado em 8 de março de 2025).

Miltner, M.; Makaruk, A.; Harasek, M. Revisão sobre tecnologias disponíveis para o aprimoramento do biogás e inovações em direção a soluções avançadas. J. Clean. Prod. 2017 , 161 , 1329–1337. [Google Scholar] [CrossRef]

Panoutsou, C.; Germer, S.; Karka, P.; Papadokostantakis, S.; Kroyan, Y.; Wojcieszuk, M.; Maniatis, K.; Marchand, P.; Landalv, I. Biocombustíveis avançados para descarbonizar o transporte europeu até 2030: Mercados, desafios e políticas que impactam sua adoção bem-sucedida pelo mercado. Energy Strategy Rev. 2021 , 34 , 100633. [Google Scholar] [CrossRef]

Noussan, M.; Negro, V.; Prussi, M.; Chiaramonti, D. O papel potencial do biometano na descarbonização do transporte: uma análise de cenários para 2030 na Itália. *Appl. Energy* 2024 , 355 , 122322. [Google Scholar] [CrossRef]

EBA. Biometano no Transporte. Disponível online: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2019/07/Biomethane-in-transport.pdf> (acessado em 8 de março de 2025).

Vinardell, S.; Feickert Fenske, C.; Heimann, A.; Cortina, JL; Valderrama, C.; Koch, K. Explorando o potencial da metanação biológica para futuros cenários de desfossilização: avaliação tecnoeconômica e ambiental. *Energy Convers. Manag.* 2024 , 307 , 18339. [Google Scholar] [CrossRef]

Orecchini, F.; Santiangeli, A.; Zuccari, F. Uso de biometano para automóveis rumo a um sistema energético neutro em CO₂. *Clean . Energy* 2021 , 5 , 124–140. [Google Scholar] [CrossRef]

Biernat, K.; Samson-Bręk, I.; Chłopek, Z.; Owczuk, M.; Matuszewska, A. Avaliação do impacto ambiental do uso de combustíveis de metano para abastecer motores de combustão interna. *Energies* 2021 , 14 , 3356. [Google Scholar] [CrossRef]

EBA. 2025. Disponível online: <https://www.europeanbiogas.eu/benefits/affordable-energy/> (acessado em 15 de março de 2025).

Jonsson, O.; Persson, M. Biogás como combustível para transporte, Fachtagung. 2003. Disponível online: <https://www.bioenergy.org.nz/documents/resource/Report-Biogas-transport-sweden-2003.pdf> (acessado em 13 de março de 2025).

Ferella, F.; Cucchiella, F.; D'Adamo, I.; Gallucci, K. Uma avaliação técnico-econômica do aprimoramento do biogás em um mercado desenvolvido. *J. Clean. Prod.* 2019 , 210 , 945–957. [Google Scholar] [CrossRef]

Budzianowski, WM; Brodacka, M. Armazenamento de biometano: avaliação de tecnologias, usos finais, modelos de negócios e sustentabilidade. *Energy Convers. Manag.* 2017 , 141 , 254–273. [Google Scholar] [CrossRef]

Paturska, A.; Repele, M.; Bazbauers, G. Avaliação econômica do sistema de fornecimento de biometano baseado em infraestrutura de gás natural. *Energy Procedia* 2015 , 72 , 71–78. [Google Scholar] [CrossRef]

Blanco, AAG; Vallone, AF; Korili, SA; Gil, A.; Sapag, K. Um estudo comparativo de vários materiais microporosos para armazenamento de metano por adsorção. *Microporous Mesoporous Mater.* 2016 , 224 , 323–331. [Google Scholar] [CrossRef]

Adlak, K.; Chandra, R.; Vijay, VK; Pant, KK. Ativação físico-química e paletização de carbonos de madeira de *Azadirachta indica* para aumento do armazenamento de energia adsorvida de biometano. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2021 , 155 , 105102. [Google Scholar] [CrossRef]

Memetova, A.; Tyagi, I.; Karri, RR; Kumar, V.; Tyagi, K.; Memetov, N.; Singh, K. Material poroso à base de carbono como alternativa sustentável para o armazenamento de gás natural (metano) e biogás (biometano): Uma revisão. *Chem. Eng. J.* 2022 , 446 , 137373. [Google Scholar] [CrossRef]

Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais, e não dos editores. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.





Avaliação do potencial de produção de biometano na Espanha



Avaliação do potencial de produção de biometano na Espanha: uma análise regional de resíduos agrícolas, resíduos urbanos e lodo de esgoto para 2030 e 2050.

Aurora López-Aguilera ¹, Carlos Morales-Polo ^{1,2,*}, Javier Victoria-Rodríguez ¹ e Maria del Mar Cledera-Castro ²

¹Grupo de Pesquisa sobre Poluentes Emergentes e Recuperação de Recursos (gCEV), Universidade Pontifícia Comillas, 28015 Madrid, Espanha

2Instituto de Pesquisa em Tecnologia (IIT), Universidade Pontifícia Comillas, 28015 Madrid, Espanha

*Autor a quem a correspondência deve ser dirigida.

Resumo

Este estudo avalia o potencial de produção de biometano da Espanha para 2030 e 2050, com foco em resíduos agrícolas, esterco animal, resíduos sólidos urbanos (RSU) e lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE). A pesquisa visa fornecer uma análise regional baseada em dados históricos sobre populações de animais, terras cultivadas, disponibilidade de resíduos e projeções demográficas. Utilizando coeficientes de utilização e premissas tecnológicas derivadas da infraestrutura de biogás existente, o estudo estima que a Espanha poderá gerar 9,71 TWh de biometano até 2030, valor ligeiramente inferior à meta nacional de 10,41 TWh. Até 2050, espera-se que os resíduos agrícolas e pecuários contribuam com 30,04 TWh, representando quase 80% da produção total de biometano, enquanto a participação relativa dos RSU e do lodo de ETE diminuirá. Andaluzia, Castela-Mancha e Castela e Leão emergem como principais contribuintes devido aos seus extensos setores agrícola e pecuário. A Catalunha e Madrid desempenham papéis significativos impulsionados pela geração de resíduos urbanos. Os resultados reforçam a necessidade de expansão da infraestrutura, em particular no que diz respeito à melhoria das instalações de injeção de biometano na rede de gás natural, juntamente com incentivos financeiros para apoiar o crescimento do setor.

Este estudo destaca o papel do biometano no setor de energias renováveis da Espanha, enfatizando seu potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, otimizar a utilização de resíduos orgânicos e contribuir para uma transição energética sustentável.

Palavras-chave: biometano ; digestão anaeróbica ; economia circular ; análise regional ; resíduos agrícolas ; lodo de esgoto ; resíduos sólidos urbanos

1. Introdução

O biometano, gerado por meio da digestão anaeróbica de resíduos agrícolas e urbanos, é uma alternativa sustentável ao gás natural que visa reduzir as emissões, promover a gestão eficiente de resíduos e fortalecer a independência energética. Ele também impulsiona e apoia a transição para uma economia circular, substituindo fertilizantes artificiais por digestato, alinhando-os com as metas globais de sustentabilidade ambiental e econômica. O potencial global para a produção de biogás e biometano é estimado em 570 Mtoe e 730 Mtoe, respectivamente. No entanto, a produção global anual em 2018 atingiu apenas 35 Mtoe de biogás e biometano em conjunto [1]. Embora as médias nacionais ofereçam uma visão geral do potencial de biometano, elas frequentemente obscurecem a substancial variabilidade espacial impulsionada por diferenças na intensidade agrícola, distribuição da pecuária e padrões de geração de resíduos. Este estudo fornece uma perspectiva regional desagregada para 2030 e 2050, oferecendo uma nova perspectiva em nível comunitário que é essencial para adequar o planejamento de infraestrutura, a alocação de recursos e as intervenções políticas em escalas subnacionais.

Essa disparidade entre o potencial teórico e a produção atual se deve a diversos fatores, incluindo limitações técnicas, econômicas e regulatórias.

O processo de “aprimoramento” é crucial para transformar o biogás em biometano, um gás metano puro que pode ser injetado na rede de gás natural após passar por processos de compressão e controle de qualidade. O biogás obtido através do processo de digestão anaeróbica (DA) é uma mistura de metano, dióxido de carbono e outros gases residuais em proporções variáveis, dependendo dos materiais orgânicos utilizados e do tipo de digestor [1].

Em relação ao seu uso como vetor energético, tanto o biogás quanto o biometano apresentam diversas opções, incluindo, entre outras, o uso térmico direto, a geração de eletricidade por meio de cogeração, o combustível para transporte após a conversão do biogás em biometano e o uso como combustível em processos industriais que normalmente utilizam gás natural [2].

Globalmente, existem inúmeras barreiras à implementação do biogás e do biometano, que vão desde aspectos técnicos, como infraestruturas de rede e gestão de resíduos, até desafios econômicos, como elevados custos de investimento inicial e problemas de rentabilidade quando comparados com alternativas mais baratas de combustíveis fósseis. Além disso, existem barreiras regulamentares e legislativas, como processos de licenciamento complexos e a falta de incentivos econômicos adequados para promover a produção e utilização de biometano [3].

Na Europa, apesar dos avanços significativos e das políticas ambiciosas para promover as energias renováveis, o desenvolvimento do biogás e do biometano varia bastante entre os países. A Alemanha destaca-se como líder na produção de biogás, seguida pela Itália e pela França, cada uma com abordagens e níveis de investimento diferentes [4]. A diversidade nas estratégias nacionais reflete a complexidade dos desafios socioeconômicos e ambientais que envolvem esta tecnologia emergente.

O biometano, uma forma renovável e sustentável de gás natural produzido a partir de biomassa orgânica, pode ser injetado na rede de gás natural em toda a Europa como parte dos esforços contínuos para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e promover a transição para uma economia mais limpa. Uma vez injetado, mistura-se com o gás natural convencional existente em proporções que cumprem os regulamentos europeus e é considerado simplesmente gás natural com base nos critérios do Eurostat. Este processo deve cumprir critérios de qualidade rigorosos estabelecidos em normas como a UNE-EN 16723 [5] para a injeção de biometano na rede de gás natural.

Para monitorar e registrar adequadamente o biometano puro, ou seja, aquele que não foi misturado com outros gases fósseis, são utilizadas ferramentas específicas como o SHARES [6]. Isso é crucial para a emissão de Garantias de Origem e Certificados de Combustíveis Renováveis, que são fundamentais para verificar e garantir a autenticidade e a sustentabilidade do biometano utilizado em diversas aplicações energéticas [4].

Apesar de seu alto potencial, a Espanha ainda não explorou totalmente seu potencial de biometano, o que exige uma avaliação aprofundada da disponibilidade de resíduos regionais e da viabilidade tecnológica [7].

O objetivo deste estudo é estimar o potencial de produção regional de biometano na Espanha para os anos de 2030 e 2050, com base nos fluxos de resíduos orgânicos disponíveis e nas atuais premissas tecnológicas. A análise é orientada por duas questões de pesquisa:

Qual é a distribuição regional do potencial de biometano na Espanha, considerando resíduos agrícolas, pecuários, municipais e de águas residuais?

Em que medida a produção de biometano projetada para a Espanha pode contribuir para as metas nacionais de energia renovável nos cenários atuais e futuros de utilização de resíduos?

2. Materiais e Métodos

Para determinar o potencial de produção de biogás e biometano na Espanha, diversas matérias-primas foram consideradas e categorizadas em diferentes grupos: o setor pecuário (animais confinados e não confinados), resíduos agrícolas, lodo de estações de tratamento de águas residuais (ETAR) e resíduos sólidos urbanos (RSU). Todos os conjuntos de dados utilizados neste estudo são provenientes de fontes públicas, como o Instituto Nacional de Estatística (INE) e o Ministério da Agricultura, Pesca e Alimentação. A metodologia computacional está disponível mediante solicitação.

A metodologia empregada baseou-se na coleta e análise de dados históricos sobre o censo pecuário, área de terra cultivada e disponibilidade de resíduos. Os dados foram então combinados com coeficientes de utilização e suposições tecnológicas derivadas da infraestrutura de biogás existente e das melhores práticas da indústria. Os resíduos foram classificados com base no Código LER (Lista Europeia de Resíduos) [8] para garantir seu gerenciamento adequado em digestores anaeróbios, assegurando a conformidade regulatória e otimizando a composição do substrato. As estimativas de produção de biogás foram calculadas utilizando equações empíricas baseadas nos sólidos voláteis presentes em cada tipo de resíduo, sua degradabilidade e coeficientes médios de rendimento de metano, documentados em estudos anteriores [7].

Também foram utilizados dados de código aberto do Instituto Nacional de Estatística (INE), do Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação e da Agência Europeia do Ambiente. Foram realizadas simulações de cenários futuros para 2030 e 2050. Os coeficientes de conversão foram derivados de estudos de caso documentados em países com infraestrutura bem desenvolvida, como a Alemanha e a França.

O código utilizado para o processamento de dados e os scripts de simulação pode ser fornecido mediante solicitação.

Embora este estudo se baseie em estatísticas nacionais oficiais e conjuntos de dados publicamente disponíveis, algumas disparidades regionais na completude dos dados podem afetar a precisão de certas estimativas.

Em particular, a subnotificação em regiões como o País Basco ou Navarra, bem como a transparência limitada por parte de operadores multinacionais de resíduos, podem resultar em valores conservadores para os fluxos de resíduos municipais e industriais. Nos casos em que os dados estavam incompletos, foram feitas extrapolações com base na escala proporcional a partir de regiões adjacentes com perfis demográficos e setoriais semelhantes. Essas premissas foram mantidas conservadoras para evitar superestimação e são discutidas na interpretação dos resultados.

3. Resultados

Este estudo avaliou o potencial de produção de biometano na Espanha para 2030 e 2050, analisando as principais fontes de resíduos orgânicos, incluindo resíduos agrícolas, esterco animal, resíduos sólidos urbanos (RSU) e lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE). Os resultados destacam o papel dos diferentes fluxos de resíduos na geração de biometano e suas contribuições projetadas ao longo do tempo. Uma análise regional identifica ainda os principais contribuintes em toda a Espanha, enfatizando o impacto das práticas de gestão de resíduos agrícolas e urbanos. Além disso, o estudo avalia a viabilidade de atingir as metas nacionais de biogás e as melhorias de infraestrutura necessárias para a integração do biometano no sistema energético. As subseções a seguir apresentam uma análise detalhada desses resultados, fornecendo informações sobre as contribuições dos fluxos de resíduos, as variações regionais e as necessidades de desenvolvimento futuro.

3.1. Geração a partir de resíduos animais

3.1.1. Resíduos bovinos

Os bovinos foram divididos nas seguintes categorias:

Vacas leiteiras e novilhas de reposição¹: Geram 9,25 m³ /local de chorume e 12,35 t/local por ano [9]. Unidades de gado por baia [10].

Outras vacas: Produzem 4,55 m³ /local por ano de chorume e 5,5 t/local por ano [9].

Os resíduos bovinos contêm aproximadamente 11% de sólidos totais, dos quais 8% são sólidos voláteis. Estima-se que cada quilograma de sólidos voláteis gere cerca de 0,2 N m³ de biogás composto por 65% de metano (CH₄), 30% de dióxido de carbono (CO₂) e 5% de outros gases [11].

3.1.2. Resíduos Suínos

Os porcos foram divididos nas seguintes categorias:

Porcas reprodutoras: Geram 5,13 m³ /local por ano de chorume e 2,27 t/local por ano de estrume [9].

Outros porcos: Produzem 2 m³ /local por ano de chorume e 1 t/local por ano de estrume [9].

Os resíduos suínos têm aproximadamente 34% de sólidos totais, dos quais 85,4% são sólidos voláteis. A produção estimada de biogás é de cerca de 50 m³ por tonelada de sólidos voláteis, com uma composição de 65% de metano (CH₄), 30% de dióxido de carbono (CO₂) e 5% de outros gases [12 , 13 , 14].

3.1.3. Dejetos de galinhas poedeiras

Para galinhas poedeiras, estima-se que sejam 0,037 m³ / local por ano de chorume e 0,04 t/local por ano de estrume. Os resíduos de galinhas poedeiras têm um teor de sólidos totais de 24%, dos quais 60% são sólidos voláteis. Estima-se que cada tonelada de sólidos voláteis produza cerca de 490 Nm³ de biogás, com uma proporção de CH₄ de 64,4%, 34% de CO₂ e 1,71% de outros gases [15 , 16 , 17 , 18].

3.1.4. Dejetos ovinos

Existem duas categorias principais de ovinos:

Ovelhas e cordeiros de reposição: Geram 0,38 toneladas de chorume e 0,72 toneladas de estrume por unidade animal [16 , 17].

Outras ovelhas: Produzem 0,01 toneladas de chorume e 0,45 toneladas de estrume por unidade animal [19 , 20].

O estrume ovino contém aproximadamente 38,5% de sólidos totais, dos quais 84,57% são sólidos voláteis. Estima-se que cada tonelada de sólidos voláteis gere cerca de 158 m³ de biogás, composto por 54% de CH₄ , 41% de CO₂ e 5% de outros gases.

3.1.5. Resíduos Caprinos

As cabras são divididas nas seguintes categorias:

Criação e reposição de cabras: Produzem 0,38 toneladas de chorume e 0,72 toneladas de estrume por unidade animal [21 , 22].

Outras cabras: Geram 0,19 toneladas de chorume e 0,36 toneladas de estrume por unidade animal.

Os resíduos caprinos contêm cerca de 33,65% de sólidos totais, dos quais 82,21% são sólidos voláteis. A produção estimada de biogás é de cerca de 250,7 m³ por tonelada de sólidos voláteis, com uma composição de 65,02% de CH₄ , 30% de CO₂ e 4,98% de outros gases [23 , 24 , 25].

3.1.6. Fezes de Coelho

Estima-se que os coelhos produzam 0,0236 toneladas de chorume e 0,1124 toneladas de estrume por unidade animal. Os resíduos de coelho têm um teor de sólidos totais de aproximadamente 61,39% e 90,26% de sólidos voláteis em base seca. Estima-se que cada tonelada de sólidos voláteis produza cerca de 325,53 m³ de CH₄ em biogás [26 , 27].

3.1.7. Resíduos de Frangos de Corte

Para frangos de corte, estima-se que sejam produzidas aproximadamente 0,0333 toneladas de chorume e 0,036 toneladas de esterco por unidade animal. Esses resíduos têm um teor de sólidos totais de 11,20%, dos quais 8,27% são sólidos voláteis. A produção estimada de biogás é de cerca de 500 m³ de CH₄ por tonelada de sólidos voláteis, com uma composição de 71,42% de CH₄ , 23,57% de CO₂ e 5,01% de outros gases [28].

3.1.8. Projeção e Potencial Energético

O estudo projeta o potencial de biogás e biometano para os anos de 2030 e 2050, com base em coeficientes de utilização obtidos a partir de casos documentados na Alemanha. Os resultados indicam um aumento significativo na produção de biometano, o que poderia resultar em uma contribuição importante para a energia renovável na Espanha, como mostra a Figura 1 .

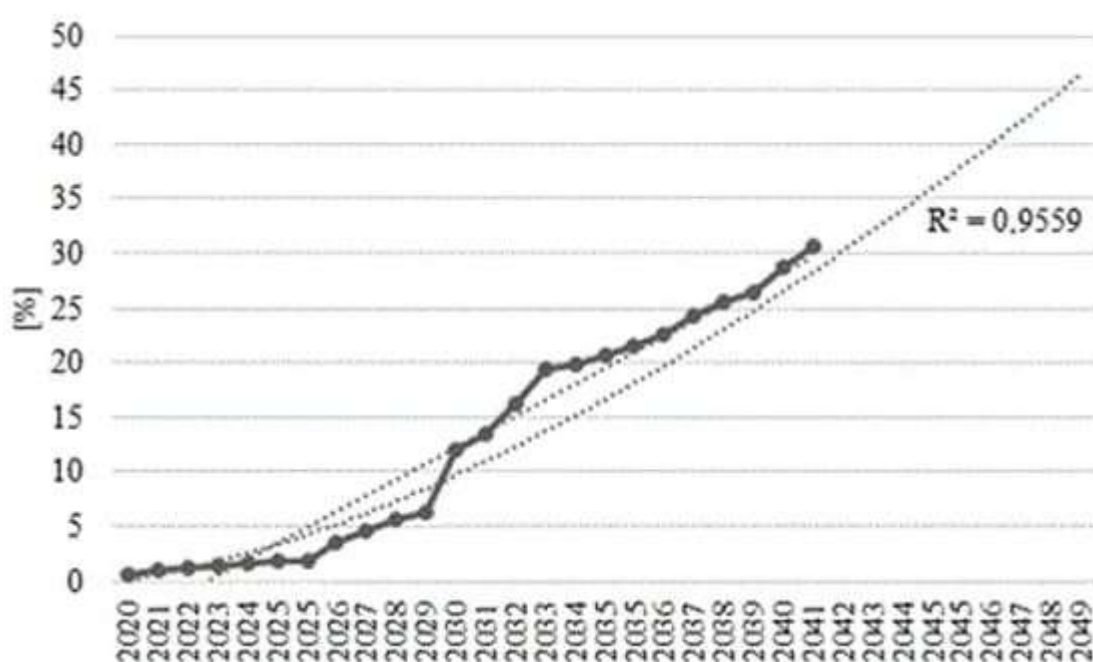


Figura 1. Coeficiente de utilização na Espanha.

Esta análise detalhada oferece uma perspectiva abrangente sobre o potencial dos resíduos pecuários para a geração de biogás e biometano, destacando sua relevância na transição para uma energia mais sustentável e limpa no país, conforme mostrado na Figura 2 .

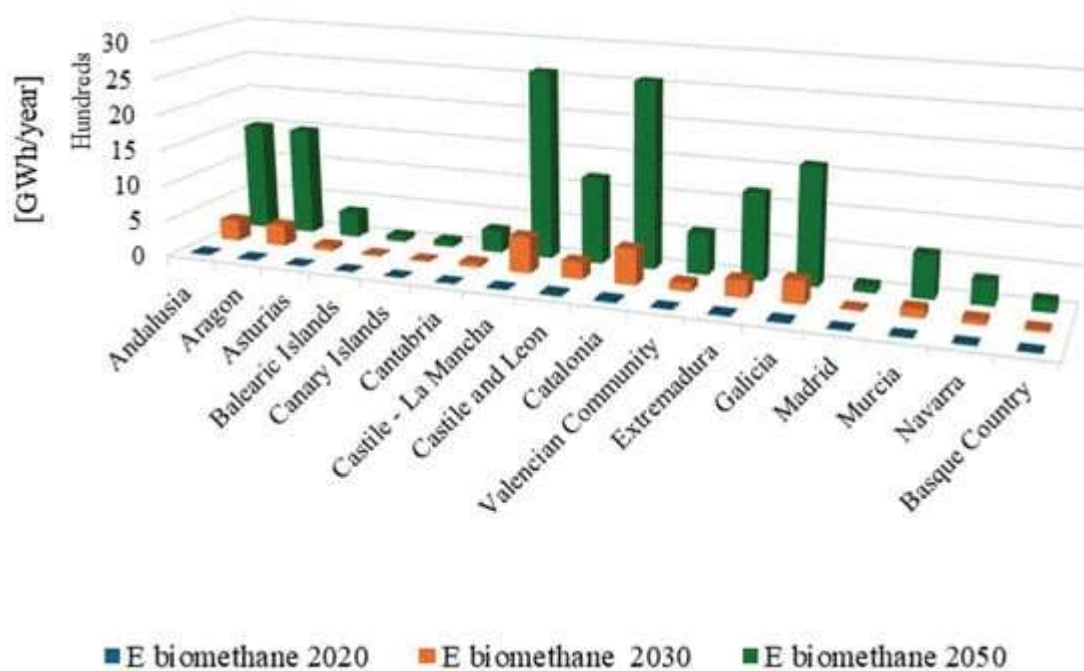


Figura 2. Potencial de geração de energia a partir de resíduos pecuários.

3.2. Geração a partir de resíduos agrícolas

Para calcular o biogás gerado a partir de resíduos agrícolas, utilizou-se uma proporção (toneladas de palha/hectare) para estimar a quantidade de palha produzida com base na área arável. Os dados sobre área, rendimento e produção de cereais, olivais e vinhedos, de 2017 a 2021, foram obtidos do relatório anual do Ministério da Agricultura, Pesca e Alimentação [28]. As culturas consideradas incluem vários tipos de trigo, cevada, centeio, aveia, milho, arroz, sorgo, olivais e vinhedos. Para os cereais, calculou-se a proporção de palha por hectare e projetou-se para o futuro. No caso dos olivais, 70% das azeitonas são utilizadas para a produção de bagaço e 73% são resíduos, dos quais 30% foram utilizados no projeto. Nos vinhedos, o bagaço representa 20% do peso da uva, os engaços 4% e as borras de vinificação 1,5%.

Materiais com alto teor de lignina requerem pré-tratamento, resultando em uma perda de 10–15% de lignina e 30% da matéria-prima [29 , 30 , 31 , 32]. As estimativas da relação palha/hectare para 2030 e 2050 foram feitas considerando as Comunidades Autônomas.

Apresenta o teor de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) de diferentes resíduos agrícolas, juntamente com seu potencial de produção de metano por tonelada de sólidos voláteis ($\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{t SV}$). A composição do biogás também é detalhada, mostrando a proporção de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e outros gases. Os dados, obtidos em estudos anteriores e avaliações empíricas, destacam a variabilidade nos rendimentos de biogás dependendo do tipo de resíduo agrícola utilizado na digestão. Entre os resíduos analisados, os olivais e o sorgo apresentam o maior potencial de produção de metano, tornando-os matérias-primas promissoras para a geração de biometano na Espanha.

A Figura 3 ilustra o potencial estimado de geração de energia a partir de resíduos agrícolas na Espanha. A projeção considera diversos resíduos de culturas e seus respectivos rendimentos de produção de metano, conforme detalhado. Os resultados destacam a contribuição significativa do trigo, da cevada e dos olivais para a geração de biogás, com variação regional baseada na atividade agrícola e na disponibilidade de terras. Essas descobertas enfatizam o papel dos resíduos agrícolas no aumento da produção de biometano e no apoio à transição energética renovável da Espanha.

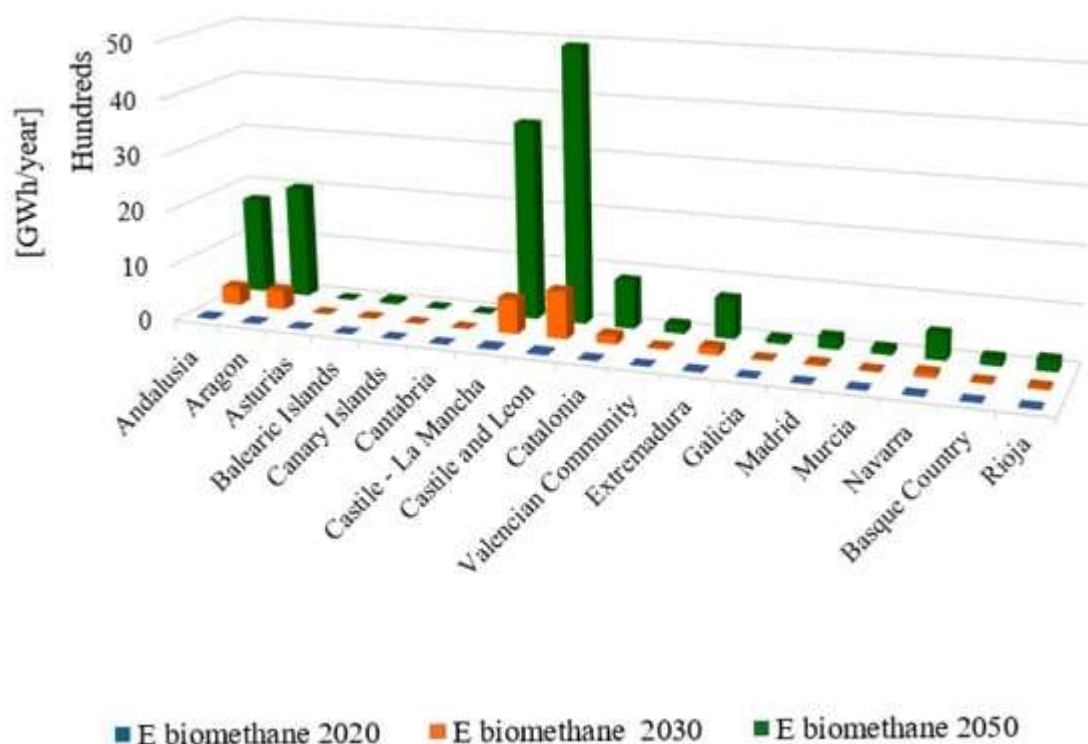


Figura 3. Potencial de geração de energia a partir de resíduos agrícolas.

3.3. Geração a partir de resíduos de ETE

As estações de tratamento de águas residuais (ETARs) tratam águas residuais urbanas e industriais, gerando biogás por meio de digestão anaeróbia. Esse biogás pode ser convertido em biometano, composto principalmente de CH_4 . Para estimar o volume de biometano, utilizou-se a população de cada Comunidade Autónoma e uma equação específica. Assumiu-se uma proporção de 1:1 entre os habitantes reais e os equivalentes, embora o número de habitantes equivalentes seja maior devido à presença de diversas indústrias que apresentam uma taxa de conversão mais elevada. Além disso, considerou-se que entre 60% e 80% do material disponível é utilizado na geração de biogás.

Com base em projeções populacionais futuras, conclui-se que a Andaluzia, a Catalunha e Madri apresentam o maior potencial para digestão anaeróbia [44 , 45 , 46 , 47 , 48].

A Figura 4 ilustra o potencial estimado de geração de energia a partir de lodo de estações de tratamento de águas residuais (ETAR) em diferentes regiões da Espanha. A análise considera o tamanho da população e a capacidade de tratamento de águas residuais de cada Comunidade Autônoma, bem como o rendimento de biogás da digestão anaeróbia do lodo. Os resultados indicam que as regiões com as maiores populações urbanas, como Andaluzia, Catalunha e Madri, apresentam o maior potencial para a produção de biometano a partir de lodo de ETAR. Essas descobertas destacam o papel das estações de tratamento de águas residuais na contribuição para o fornecimento de gás renovável da Espanha e enfatizam a necessidade de maior desenvolvimento de infraestrutura para otimizar a recuperação de biometano e a injeção na rede.

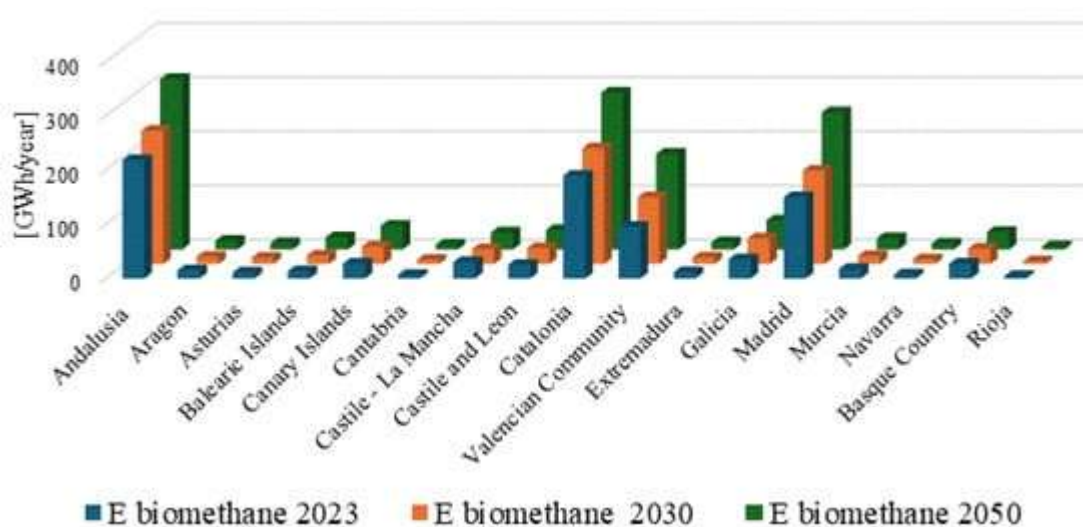


Figura 4. Potencial de geração de energia a partir de ETE (Estação de Tratamento de Esgoto).

3.4. Geração a partir de resíduos OFMSW

Para avaliar os resíduos orgânicos na Espanha entre 2011 e 2021, foram consideradas as seguintes categorias obtidas do INE: resíduos domésticos e similares, resíduos animais e vegetais e lodo comum (este último insignificante após 2012). A fração orgânica dos resíduos urbanos em cidades como Barcelona pode gerar 382 N m³/kg de sólidos voláteis (SV) de biometano, com um teor de CH₄ de 98%. Recomenda-se diferenciar entre grandes cidades e áreas rurais para maior precisão. O total de resíduos orgânicos e o biometano produzido em cada Comunidade Autônoma foram calculados projetando dados para 2030 e 2050. Também foi assumido que 24,5% do lodo das ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto) está corretamente classificado e que a utilização de resíduos orgânicos para digestão anaeróbia aumenta de 55% em 2021 para 80% em 2050. A taxa de classificação de 24,5% corresponde aos valores nacionais para a separação de resíduos orgânicos sólidos urbanos, com base em relatórios de resíduos municipais. Foi selecionado como uma estimativa conservadora, porém representativa, da eficiência atual de triagem nas áreas urbanas da Espanha. Embora exista variabilidade regional, verificações de consistência interna confirmaram que um desvio de ± 5 pontos percentuais neste parâmetro não alteraria significativamente as projeções nacionais totais nem mudaria as tendências de distribuição regional apresentadas neste estudo. Os valores de biometano são estimados em GWh/ano utilizando um poder calorífico de 9,945 kWh/N m³ [11].

A Figura 5 apresenta o potencial estimado de geração de energia a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORM) na Espanha. A análise considera os padrões de geração de resíduos, o teor de matéria orgânica e o rendimento de biogás da digestão anaeróbia. Os resultados indicam que regiões altamente urbanizadas, como Madri, Catalunha e Andaluzia, apresentam o maior potencial devido à sua alta densidade populacional e taxas de produção de resíduos. As conclusões enfatizam a importância de sistemas eficazes de separação e coleta de resíduos para maximizar a recuperação de biometano. Além disso, o papel crescente da FORM na estratégia de biometano da Espanha destaca a necessidade de infraestrutura aprimorada para o tratamento de resíduos e apoio político para aumentar sua contribuição para a matriz energética renovável.

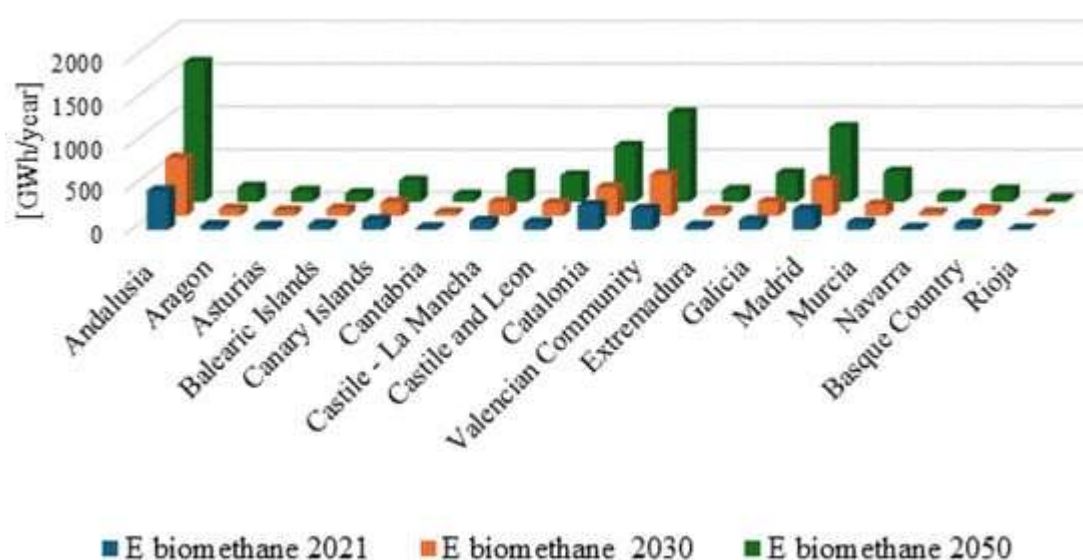


Figura 5. Potencial de geração de energia a partir de OFMSW (resíduos orgânicos sólidos urbanos).

4. Discussão

Os resultados apresentados na Figura 6 fornecem uma avaliação abrangente do potencial de produção de biometano da Espanha para 2023, 2030 e 2050, destacando a evolução de diferentes fluxos de resíduos e suas contribuições para a transição energética do país. Os resultados indicam que, embora os resíduos sólidos urbanos (RSU) e o lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) sejam atualmente as principais fontes de produção de biometano (2023), espera-se uma mudança em direção aos resíduos agrícolas e pecuários até 2030 e 2050. Essa transição está em consonância com estudos anteriores realizados na Alemanha e na França, onde o biogás agrícola desempenhou um papel crucial na expansão da produção de gás renovável.

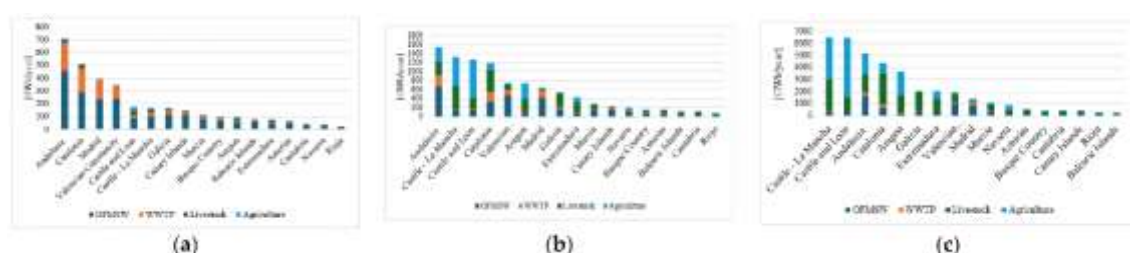


Figura 6. Energia nos anos (a) 2023, (b) 2030 e (c) 2050. Fonte: Elaboração própria.

A expansão do biometano na Alemanha foi impulsionada por subsídios direcionados e uma infraestrutura de injeção bem desenvolvida. Uma abordagem semelhante poderia ser adaptada na Espanha para acelerar a implantação do biometano.

4.1. Análise por tipo de resíduo ou fonte de matéria-prima

Os resultados indicam que os resíduos orgânicos sólidos urbanos (ROSU) foram a principal fonte de produção de biometano na Espanha durante o período de 2020 a 2023, contribuindo com 2079,39 GWh/ano. No entanto, embora a produção absoluta esteja projetada para aumentar para 3127 GWh/ano em 2030 e 6632,7 GWh/ano em 2050, sua participação relativa na produção total de biometano deverá diminuir significativamente, de 64,39% em 2023 para apenas 17,43% em 2050. Essa mudança reflete uma transição para uma maior dependência de resíduos agrícolas e pecuários, à medida que esses fluxos de resíduos ganham importância na estratégia de biometano da Espanha.

Da mesma forma, estima-se que a produção de biometano em estações de tratamento de águas residuais (ETARs) aumente de 0,88 TWh/ano em 2020–2023 para 1,35 TWh/ano em 2050, embora sua contribuição percentual caia de 27,24% para apenas 3,55%. Essa queda na participação relativa, apesar do aumento absoluto na produção, destaca o crescente domínio dos resíduos agrícolas e pecuários como matéria-prima para a produção de biometano.

Prevê-se que o setor agropecuário registrará o crescimento mais significativo na produção de biometano. Partindo de apenas 0,15 TWh/ano provenientes de resíduos pecuários e 0,12 TWh/ano de resíduos agrícolas em 2023, estima-se que estes valores aumentem para 2,88 TWh/ano e 2,69 TWh/ano, respectivamente, até 2030. Até 2050, prevê-se que estas contribuições disparem para 14,83 TWh/ano para resíduos pecuários e 15,21 TWh/ano para resíduos agrícolas, representando, em conjunto, 79,01% da produção total de biometano em Espanha.

4.2. Análise por região e ano

Em nível regional, os resultados revelam variações geográficas significativas no potencial de produção de biometano. De 2020 a 2023, a Andaluzia emergirá como a região líder, seguida pela Catalunha e Madri, em grande parte devido aos seus elevados níveis de geração de resíduos urbanos.

Em 2030, a Andaluzia mantém a liderança, enquanto Castela-Mancha e Castela e Leão sobem para a segunda e terceira posições, respectivamente. Essa mudança é atribuída à expansão da produção de biometano agrícola, já que essas regiões possuem vastas áreas agrícolas e recursos pecuários, tornando-as importantes contribuintes para o setor de gás renovável da Espanha.

Prevê-se que, até 2050, Castela-Mancha ultrapasse a Andaluzia como a principal região produtora de biometano, com Castela e Leão logo atrás. A Andaluzia cai para o terceiro lugar, embora continue sendo uma grande produtora com uma estratégia mais diversificada de aproveitamento de resíduos para a produção de biometano. Enquanto isso, a Catalunha ocupa o quarto lugar, impulsionada principalmente pela sua forte contribuição de resíduos pecuários.

A análise regional mostra que a Andaluzia, Castela-Mancha e Castela e Leão se tornarão os principais contribuintes para o setor de biometano da Espanha, devido às suas extensas atividades agrícolas e pecuárias. Enquanto isso, a Catalunha e Madri mantêm contribuições significativas, impulsionadas pela alta geração de resíduos urbanos.

Esses resultados enfatizam a importância de estratégias regionais de gestão de resíduos, visto que a disponibilidade de matérias-primas varia significativamente em toda a Espanha.

Em comparação com as metas nacionais, o estudo estima que a Espanha poderia produzir 9,71 TWh de biometano até 2030, um valor ligeiramente inferior à meta de 10,41 TWh estabelecida no Plano Nacional para o Biogás. Atingir essa meta exigirá apoio político, incentivos financeiros e expansão da infraestrutura, principalmente em instalações de injeção de biometano para integração à rede nacional de gás.

Num contexto mais amplo, a mudança para resíduos agrícolas e pecuários reflete uma tendência global na produção de biometano, onde a valorização de resíduos e os princípios da economia circular são cada vez mais priorizados. Os resultados reforçam a necessidade de investimentos em usinas de digestão anaeróbica, bem como em marcos regulatórios que incentivem a produção de biogás e seu uso nos transportes, aquecimento e indústria.

4.3. Impacto Ambiental e Energético

A transição para a produção de biometano a partir da agricultura e da pecuária tem implicações significativas para a redução das emissões e a sustentabilidade energética. A economia estimada de emissões de metano durante o primeiro período de estudo ascende a 4.658.609,27 toneladas de CH₄ [48]. Além disso, a disponibilidade de digestato de origem animal e vegetal, um subproduto chave da digestão anaeróbica, foi de 1.036.380,8 toneladas em 2020 [49].

Destacando o potencial para a recuperação de nutrientes e a integração na economia circular.

Do ponto de vista energético, o biometano poderia desempenhar um papel crucial no atendimento da demanda térmica da Espanha, considerando uma taxa de eficiência de 90%. No entanto, para concretizar plenamente esse potencial, serão essenciais investimentos em infraestrutura, incentivos regulatórios e integração à rede nacional de gás.

Apresenta a contribuição estimada do biometano para a demanda de energia térmica em diferentes regiões da Espanha, considerando uma taxa de eficiência de 90%. A tabela detalha a porcentagem total da demanda térmica atendida, bem como as contribuições específicas para os setores residencial, terciário (comercial e de serviços) e industrial. Os resultados destacam variações regionais, com as Ilhas Canárias, as Ilhas Baleares e a Andaluzia apresentando as maiores contribuições, refletindo diferenças no potencial de produção de biometano e na demanda de energia entre os setores.

5. Conclusões

Este estudo fornece uma avaliação abrangente do potencial de produção de biometano na Espanha, destacando a evolução dos principais fluxos de resíduos e seu papel no alcance das metas de energia renovável para 2030 e 2050. Os resultados revelam que os resíduos agrícolas e pecuários se tornarão as principais fontes de biometano, aumentando de 0,27 TWh em 2023 para 30,04 TWh em 2050, representando quase 80% da produção total.

Enquanto isso, a contribuição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e dos lodos de estações de tratamento de esgoto (ETE) diminuirá em termos relativos, apesar de seu crescimento absoluto.

Esses resultados oferecem orientações valiosas para os formuladores de políticas no desenvolvimento de incentivos direcionados e estratégias de infraestrutura para acelerar a implantação do biometano na transição energética da Espanha.

Em nível regional, Castela-Mancha, Castela e Leão e Andaluzia emergem como os principais contribuintes até 2050, beneficiando-se de extensos recursos agrícolas e pecuários. A Catalunha e Madri também permanecerão importantes, impulsionadas principalmente por seus fluxos de resíduos urbanos e pela infraestrutura de biogás já existente. O estudo estima que a produção de biometano da Espanha poderá atingir 9,71 TWh até 2030, um pouco abaixo da meta de 10,41 TWh estabelecida no Roteiro Nacional do Biogás, o que enfatiza a necessidade de investimentos e apoio político para superar essa lacuna.

Numa perspectiva mais ampla, a transição para o biometano como fonte de energia renovável alinha-se com os objetivos europeus de sustentabilidade e com um modelo de economia circular, oferecendo múltiplos benefícios ambientais e económicos. O biometano reduz as emissões de gases com efeito de estufa, melhora a valorização de resíduos orgânicos e reforça a independência energética, substituindo os combustíveis fósseis por alternativas renováveis. No entanto, para desbloquear todo o seu potencial, é necessário o seguinte:

Expansão da infraestrutura, em particular para a injeção de biometano na rede nacional de gás.

Incentivos regulatórios e financeiros para promover o investimento em usinas de digestão anaeróbica.

Avanços na gestão de resíduos para otimizar a disponibilidade e a eficiência do substrato.

Pesquisa e inovação tecnológica para aprimorar a produção de biometano e sua integração com outros vetores de energia renovável, como a produção de hidrogênio e as tecnologias de captura de carbono.

Com um quadro político adequado e investimentos estratégicos, o biometano tem o potencial de se tornar um pilar fundamental da estratégia de descarbonização da Espanha, contribuindo para um sistema energético mais sustentável e resiliente. Pesquisas futuras devem se concentrar na viabilidade técnico-econômica, na otimização de processos e na avaliação do impacto político para garantir a viabilidade a longo prazo do biometano como pedra angular da transição energética renovável da Espanha.

Para concretizar o potencial do biometano identificado neste estudo, serão necessárias políticas públicas direcionadas, melhorias na infraestrutura da rede elétrica e ações coordenadas entre as autoridades regionais, os órgãos de gestão de resíduos e os atores do setor agrícola. Incentivos à produção de biogás, processos de licenciamento simplificados e garantias de origem podem desempenhar um papel crucial na aceleração da implantação do biometano.

Investimentos adicionais em pesquisa, incluindo projetos-piloto e otimização de processos, serão essenciais para desbloquear essa oportunidade para o futuro energético sustentável da Espanha.

Contribuições dos autores

AL-A.: conceitualização, metodologia, software, investigação, redação – preparação do rascunho original; CM-P.: conceitualização, metodologia, análise formal, investigação, redação – revisão e edição, visualização, supervisão; JV-R.: conceitualização, metodologia, investigação, supervisão, validação; MdMC-C.: conceitualização, metodologia, análise formal, investigação, redação – revisão e edição, visualização, supervisão. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Declaração do Comitê de Revisão Institucional

Não aplicável.

Declaração de Consentimento Informado

Não aplicável.

Declaração de Disponibilidade de Dados

As contribuições originais apresentadas neste estudo estão incluídas no artigo. Para mais informações, entre em contato com o autor correspondente.

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

IEA—Agência Internacional de Energia. IEA. Disponível online: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth> (acessado em 29 de janeiro de 2025).

Secretaria de Estado de Energia HR Biogas_V5.pdf, Google Docs. Disponível online: https://drive.google.com/file/d/1Uw7iaML1Evh0e0nl91ZvNFWDCcwjprlN/view?usp=sharing&usp=embed_facebook (acessado em 29 de janeiro de 2025).

Dabas, JPS; Sharma, N.; Dubey, SK; Sharma, A.; Singh, L.; Dubey, AV. Utilização de esterco bovino e chorume para autossuficiência energética em fazendas e residências: experiências de estudos de campo em três estados indianos. Indian J. Agric. Sci. 2018 , 88 , 1208–1213. [Google Scholar] [CrossRef]

Charlotte, DL. Referência Europeia para o Biometano. Disponível online: https://www.sia-partners.com/system/files/document_download/file/2022-05/Sia%20Partners%20Benchmark%20Europe%20Biomethane.pdf (acessado em 15 de janeiro de 2025).

UNE-EN 16723-1:2017 ; Gás Natural e Biometano para Uso no Transporte e Biometano para Injeção na Rede de Gás Natural – Parte 1: Especificações para Biometano para Injeção na Rede de Gás Natural (EN 16723-1:2016). Associação para a Normalização (AENOR): Madrid, Espanha, 2017. Disponível online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0058455> (acessado em 2 de abril de 2025).

Comissão Europeia, Estatísticas de Energias Renováveis — Ferramenta SHARES. 2022. Disponível online: <https://ec.europa.eu/eurostat> (acessado em 2 de abril de 2025).

Morales-Polo, C.; del Mar Cledera-Castro, M.; Hueso-Kortekaas, K.; Revuelta-Aramburu, M. Digestão anaeróbia em reatores de águas residuais de frações orgânicas separadas de resíduos de mercados

atacadistas. Caracterização composicional e em batelada. Viabilidade energética e ambiental. Sci. Total Environ. 2020 , 726 , 138567. [Google Scholar] [CrossRef]

Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008, relativa aos resíduos e que revoga determinadas diretivas ; União Europeia: Bruxelas, Bélgica, 2008. [Google Scholar]

Decreto 153/2019, de 3 de julho, de Gestão da Fertilização do Sol e dos Dejeções Ramaderes e Aprovação do Programa de Atuação nas Zonas Vulneráveis em Relação com a Contaminação por Nitratos que Procedem de Fontes Agrícolas|Departamento de la Presidència|Legislação. Cercador de Informação e Documentação Oficial (CIDO)—Diputação de Barcelona. Disponível online: <https://dogc.gencat.cat/ca/document-del-dogc/?documentId=853461> (acessado em 29 de janeiro de 2025).

INE. Censo Agrário 2020. Disponível online: <https://ine.es/censoagrario2020/presentacion/index.htm> (acessado em 30 de janeiro de 2025).

Nocete, ES Análise do Potencial de Obtenção de Biometano na Espanha e Avaliação do Impacto Ambiental Associado ao seu Processo de Produção. Dissertação de mestrado, ETSI Industriales (UPM), Madrid, Espanha, 2021. Disponível online: <https://oa.upm.es/66146/> (acessado em 30 de janeiro de 2025).

Merino, DM; Urdangarin, NB Cuantificación e Caracterización dos Resíduos Ganaderos DE Gipuzkoa ; Conselho Provincial de Gipuzkoa: Donostia-San Sebastian, Espanha, 2006. [Google Scholar]

Moreta Criollo, ML Projeto de um Biodigestor de Estiércol Porcino Para Uma Granja Agrícola Ubicada no Bairro La Morita, Parroquia de Tumbaco Para o Ano 2012–2013. Disponível online: <https://1library.co/document/qo365g5q-diseno-biodigestor-estiercol-porcino-agricola-ubicada-parroquia-tumbaco.html> (acessado em 30 de janeiro de 2025).

Rogel, W. Foro XIV: Geração de biogás na Granja Porcina San José. Disponível online: https://www.sica.int/documentos/foro-xiv-generacion-de-biogas-en-granja-porcina-san-jose_1_77120.html (acessado em 30 de janeiro de 2025).

Dalkılıç, K.; Ugurlu, A. Produção de biogás a partir de esterco de galinha em diferentes taxas de carga orgânica em um sistema anaeróbio mesofílico-termofílico de dois estágios. *J. Biosci. Bioeng.* 2015 , 120 , 315–322. [Google Scholar] [CrossRef]

Duharte-Rodríguez, WL; Odales-Bernal, L.; Álvarez-Meneses, RR; González-López, LM; Barrera-Cardoso, EL Estimación do potencial do biogás a partir da gallinaza. *Rev. Cuba. De Química* 2021 , 33 , 54–69. [Google Acadêmico]

Nie, H.; Jacobi, HF; Strach, K.; Xu, C.; Zhou, H.; Liebetrau, J. Monofermentação de esterco de galinha: inibição por amônia e recirculação do digestato. *Bioresour. Technol.* 2015 , 178 , 238–246. [Google Scholar] [CrossRef]

Morales-Polo, C.; Cledera-Castro, MdM. Um método otimizado de reúso de água e valorização de resíduos para o desenvolvimento sustentável de abatedouros de aves. *Desalination Water Treat.* 2016 , 57 , 2702–2711. [Google Scholar] [CrossRef]

Achinas, S.; Li, Y.; Achinas, V.; Euverink, GJW. Influência da adição de esterco de ovelha no potencial de biogás e nas comunidades metanogênicas durante a digestão de esterco bovino em condições mesofílicas. *Sustain. Environ. Res.* 2018 , 28 , 240–246. [Google Scholar] [CrossRef]

Duran Mucha, TD Produção de Biogás a Partir da Mezcla do Estiércol del Ganado Ovino con Microorganismos eficientes a Escala de um Biodigestor, Para sua Utilização Como Fonte de Energia Renovável, nas Zonas Ganaderas do Distrito de Ninacaca—2018. Dissertação de Mestrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro De Pasco, Peru, 2022. [Google Scholar]

MaríaTeresa Varnero, M.; de Agricultura, M.; José Arellano, V.; de Investigación Agropecuária, FF; AdrianaCarrasco, R. Aprovechamiento Racional de Desechos Orgánicos. Informe de Avance. 1987. Disponível online: <https://www.semanticscholar.org/paper/Aprovechamiento-racional-de-desechos-org%C3%A1nicos.-de-Mar%C3%ADaTeresaVarnero-Agricultura/995f4813f3b0a7fb3cc9739813da136b6bb32664> (acessado em 4 de fevereiro 2025).

Censos de Animais e Produtos Comercializados. Disponível online: <https://www.mapa.gob.es/eu/alimentacion/temas/control-calidad/mesa-iberico/riber-publico/censos-animales-productos-comercializados/default.aspx> (acessado em 4 de fevereiro de 2025).

Zhang, T.; Liu, L.; Song, Z.; Ren, G.; Feng, Y.; Han, X.; Yang, G. Produção de biogás por codigestão de esterco de cabra com três resíduos de culturas. PLoS ONE 2013 , 8 , e66845. [Google Scholar] [CrossRef]

Rahman, MM; Haque, MA; Kabir, AKMA; Hashem, MA; Azad, MAK; Bhuiyan, MKJ. Eficácia da produção de biogás a partir de diferentes tipos de esterco animal. Int. J. Smart Grid 2021 , 5 , 158–166. [Google Scholar]

Carabeo-Pérez, A.; Odales-Bernal, L.; López-Dávila, E.; Jiménez, J. Potencial de biometano em estercos de animais herbívoros: estudo de caso cubano. J. Mater. Ciclos Gestão de Resíduos. 2021 , 23 , 1404–1411. [Google Scholar] [CrossRef]

Ortiz, DLP; Botero-Londoño, MA; Botero-Londoño, JM Biomasa residual pecuaria: Revisão sobre a digestão anaeróbia como método de produção de energia e outros subprodutos. Rev. 2019 , 18 , 149–160. [Google Scholar] [CrossRef]

Trujillo Jacinto del Castillo, D.; Pérez Gutiérrez, JF; Cebreros Ritz, FJ Digestão anaeróbia de resíduos cunícolas (I). Cunicultura 1988 , 13 , 108–113. [Google Acadêmico]

Escudero, A.; Mancheño, S.; López, JJ Ministério de Agricultura, Pesca e Alimentação Anuário de Estadística. Disponível online: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx> (acessado em 4 de fevereiro de 2025).

Menéndez, JA; Fernández-Tresguerres, LG; Villanueva, SF; Durán, M.; Montes-Morán, MA; Arenillas, A. Relatório sobre a Disponibilidade de Fontes de Biomassa em Espanha: Vinhas e Olivais ; CSIC: Madrid, Espanha, 2018. [Google Scholar] [CrossRef]

Martin, JFG; Cuevas, M.; Feng, C.-H.; Mateos, P.Á.; Garcia, MT; Sánchez, S. Valorização Energética da Biomassa da Oliveira: Podas de Oliveira, Carços e Bagaços de Oliveira. Processos 2020 , 8 , 511. [Google Scholar] [CrossRef]

Fritsch, C.; Staebler, A.; Happel, A.; Cubero Márquez, MA; Aguiló-Aguayo, I.; Abadias, M.; Gallur, M.; Cigognini, IM; Montanari, A.; López, MJ; et al. Processamento, valorização e aplicação de compostos derivados de biorresíduos de batata, tomate, azeitona e cereais: uma revisão. Sustainability 2017 , 9 , 1492. [Google Scholar] [CrossRef]

Manzanares, P.; Ruiz, E.; Ballesteros, M.; Negro, MJ; Gallego, FJ; López-Linares, JC; Castro, E. Potencial da biomassa residual no cultivo da oliveira e na indústria do azeite na Espanha: proposta de valorização em um contexto de biorrefinaria. *Span. J. Agric. Res.* 2017 , 15 , e0206. [Google Scholar] [CrossRef]

Kaparaju, P.; Serrano, M.; Angelidaki, I. Otimização da produção de biogás a partir de vinhaça de palha de trigo em reator UASB. *Appl. Energy* 2010 , 87 , 3779–3783. [Google Scholar] [CrossRef]

Dinuccio, E.; Balsari, P.; Gioelli, F.; Menardo, S. Avaliação do potencial de produtividade de biogás de algumas biomassas agroindustriais italianas. *Bioresour. Technol.* 2010 , 101 , 3780–3783. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Prade, T.; Svensson, S.-E.; Hörndahl, T.; Kreuger, E. Impacto da data de colheita e comprimento de corte de gramíneas e cereais de planta inteira no rendimento de metano e viabilidade econômica como matéria-prima para a produção de biocombustível para veículos. *BioEnergy Res.* 2019 , 12 , 137–149. [Google Scholar] [CrossRef]

Hübner, M.; Oechsner, H.; Koch, S.; Seggl, A.; Hrenn, H.; Schmiedchen, B.; Wilde, P.; Miedaner, T. Impacto do genótipo, época de colheita e composição química no rendimento de metano do centeio de inverno para produção de biogás. *Biomass Bioenergy* 2011 , 35 , 4316–4323. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhou, S.; Zhang, Y.; Dong, Y. Pré-tratamento para produção de biogás por fermentação anaeróbica de palha de milho e esterco bovino misturados. *Energy* 2012 , 46 , 644–648. [Google Scholar] [CrossRef]

Kusch, S.; Schumacher, B.; Oechsner, H.; Schäfer, W. Rendimento de metano de cascas de aveia. *Biomass Bioenergy* 2011 , 35 , 2627–2633. [Google Scholar] [CrossRef]

Cantale, C.; Petrazzuolo, F.; Correnti, A.; Farneti, A.; Felici, F.; Latini, A.; Galeffi, P. Triticale para Produção de Bioenergia. *Agrícola. Agrícola. Ciência. Procedia* 2016 , 8 , 609–616. [Google Scholar] [CrossRef]

Wannasek, L.; Ortner, M.; Amon, B.; Amon, T. Sorgo, uma matéria-prima sustentável para a produção de biogás? Impacto do clima, variedade e época de colheita na maturação e no rendimento de biomassa. *Biomass Bioenergy* 2017 , 106 , 137–145. [Google Scholar] [CrossRef]

Mahmood, A.; Honermeier, B. Composição química e rendimento de metano de cultivares de sorgo com espaçamento entre linhas contrastante. *Field Crops Res.* 2012 , 128 , 27–33. [Google Scholar] [CrossRef]

Tekin, AR; Dalgıç, AC Produção de biogás a partir de bagaço de azeitona. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000 , 30 , 301–313. [Google Scholar] [CrossRef]

Tobía, EAM Produção de biogás e fertilizantes a partir de resíduos vitivinícolas mediante digestão anaeróbia. dica. 2019. Disponível online: <https://addi.ehu.es/handle/10810/37122> (acessado em 2 de abril de 2025).

Scarlat, N.; Fahl, F.; Dallemand, J.-F.; Monforti, F.; Motola, V. Uma análise espacial do potencial de biogás a partir de estrume na Europa. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018 , 94 , 915–930. [Google Scholar] [CrossRef]

Sánchez Nocete, E.; Pérez Rodríguez, J. Uma metodologia simples para estimar o potencial de produção de biometano em uma região: aplicação em um estudo de caso. *Sustainability* 2022 , 14 , 15978. [Google Scholar] [CrossRef]

Jenicek, P.; Bartacek, J.; Kutil, J.; Zabranska, J.; Dohanyos, M. Potencial e limites da digestão anaeróbia de lodo de esgoto: Estação de tratamento de águas residuais municipais autossuficiente em energia? *Water Sci. Technol.* 2012 , 66 , 1277–1281. [Google Scholar] [CrossRef]

Oróbio, BAP; Lozada, PT; Rebelião, LFM; López, WAT; López, LF; Arias, MDMO; Ho, LEB Avaliação de lodos de municípios do PTAR como inóculos na digestão anaeróbia de biorresíduos. *Rev.* [Google Scholar] [CrossRef]

SEDIGAS Estúdio de capacidade de produção de biometano na Espanha. Disponível online: <https://estudio-biometano.sedigas.es/#informe> (acessado em 6 de fevereiro de 2025).

Bongiovanni, M.; Silvana, M.; Marzari, R. Uso como biofertilizante de digestato derivado da geração de biogás. No Congresso Argentino da Ciência do Suelo ; Unirio Editora: Córdoba, Argentina, 2018. [Google Scholar]

Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais, e não dos editores. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL
CONSULTORIA MAPEAMENTO ENGENHARIA TECNOLOGIA



BRASILBIOMASSA CONSULTORIA MAPEAMENTO TIPOS BIOMASSA SUPRIMENTO
ENERGÉTICO ENGENHARIA E TECNOLOGIA BIOCHAR/BIOCARBONO

Av. Candido Hartmann, 570 24 andar Conj. 243 Champagnat Curitiba Paraná

Whats Consultoria (41) 998173023 ou ABIB BBER (41) 992345471

E-mail diretoria@editorabrasilbiomassa.com diretoriabrasilbiomassa@gmail.com

Brasil Biomassa www.brasilbiomassa.com

Editora www.editorabrasilbiomassa.com



BRASIL BIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA

A Brasil Biomassa Consultoria Engenharia Tecnologia fundada em 2004, com sede em Curitiba e filial em São Paulo e representantes no exterior é uma empresa líder (Eleita pela Energy Business Review Latin America como Top 10 Energy Providers in Latin America 2023/24) na área consultoria (desenvolvimento projetos sustentáveis zero carbono com apoio no mapeamento de potencialidade dos tipos de biomassa (florestal, madeira, agroindustrial e da cana-de-açúcar) para suprimento energético) empresarial (atuação consultoria do plano estrutural de negócios e de viabilidade econômica e de planejamento estratégico e gestão de negócios e nos estudos de mercado).

Na gestão e licenciamento ambiental, estratégia de logística, benefícios fiscais e tributários até a certificação do produto energético em laboratórios nacionais e internacionais e no marketing executivo).

A Brasil Biomassa atua na área econômica (avaliação econômica do capex/opex e no desenvolvimento do projeto de financiamento nacional e internacional) na área de engenharia executiva (com dimensionamento da planta industrial e layout e fluxograma dos equipamentos e da unidade), conceitual (atuação em projetos conceituais básicos e no estudo de viabilidade econômica- taxa de retorno e o payback da planta industrial).

Na engenharia de detalhamento (projetos detalhados contendo cálculos, dimensionamento, lista de materiais, balanços e fluxogramas) e de tecnologia (biomassa, bioenergia, biogás, biometano, co2 industrial e amônia verde, biocarbono, bio-óleo, gás de síntese, biochar, extrato pirolenhoso e vinagre de madeira, biopellets, hidrogênio verde, briquete e de pellets), para aproveitamento dos tipos de biomassa (florestal/madeira, agricultura e agroindustrial e sucroenergético).

Sempre atenta às tendências e demandas energéticas visando o carbono zero, a Brasil Biomassa atua como uma empresa especializada em consultoria/mapeamento para aproveitamento dos tipos de biomassa e uma expertise de gerenciamento, engenharia e tecnologia.

Para implantação de projetos de baixo carbono ou de carbono renovável, capacitando as indústrias na reduzir sua pegada ambiental enquanto mantêm alto desempenho. Comprometida com a inovação e a responsabilidade ambiental, a Brasil Biomassa está impulsionando o progresso em direção a um futuro mais sustentável.

Publicamos mais de 350 livros no mercado com destaque ao Atlas Brasileiro Biomassa Florestal e da Madeira, o Atlas Brasileiro Biomassa Agricultura e Agroindustrial, Atlas Brasileiro Biomassa Cana-de-açúcar e dezenas de Estudos de Mercado Florestal Madeira Agricultura Cana-de-açúcar Oferta e Demanda, Estudos Setoriais, Banco de Dados em Anuários dos Players Produtores e Consumidores dos tipos de Biomassa.

A Brasil Biomassa atua em todos os segmentos industriais para implantação de plantas industriais e com projetos de descarbonização para o setor industrial, com a engenharia especializada para a mudança da matriz energética industrial que utilizam os combustíveis fósseis como os derivados do petróleo (coque, GLP), carvão, gás natural para o uso energético com a biomassa.

Sendo a principal empresa do setor de consultoria e engenharia e tecnologia industrial agregando mais de 22 profissionais na área de engenharia industrial e florestal, processo e estudo de mercado, economia e planejamento e na gestão de desenvolvimento negócios de energia zero carbono.

Primeira empresa brasileira a desenvolver mais de 210 projetos sustentáveis e energéticos zero carbono para descarbonização do setor industrial (aquisição dos principais equipamentos, elaborando a equalização técnica através de folhas de dados de cada equipamento e o dimensionamento elaborado através de balanços de processo térmico e de massas) através de equipes multidisciplinares de consultoria, mapeamento, engenharia e tecnologia industrial.

Atuando diretamente com as maiores companhias no Brasil do ramo florestal e da madeira, papel e celulose, compensados e madeireiro, do setor industrial de alumínio, amônia, avicultura, cerâmica, cervejaria, cimentos, cooperativa agrícola e de grãos, farmacêutico, frigoríficos, geração de Energia, laticínios, máquinas e equipamentos, petroquímico, processamento do milho e da soja, química, siderúrgica e termoeletrica.



Consultoria Projetos Bioenergia e Biorrefinarias



O desenvolvimento da atividade industrial, as flutuações nos mercados dos combustíveis fósseis bem como as exigências em termos ambientais devido às alterações climáticas a nível global, tem conduzido a uma utilização cada vez mais intensiva dos recursos naturais, nomeadamente de recursos biológicos.

Esta utilização faz-se não só para fins energéticos mas também, e cada vez mais, para a obtenção de bioprodutos. O aperfeiçoamento da conversão da de recursos vegetais em produtos químicos e energia é a chave (bioeconomia).

Para que a economia mundial utilize de forma intensa a biomassa sustentável (florestal madeira agroindustrial e da cana-de-açúcar) renovável.

A conversão da biomassa residual (sem valor comercial e de ampla disponibilidade como os resíduos florestais e as palhas das culturas agrícolas cevada, feijão, milho, soja e trigo e de outros resíduos do açaí, algodão, amendoim, arroz, babaçu, cacau, café, castanha caju e para, coco verde, cupuaçu, dendê, laranja e uva e das gramíneas como capim braquiária, elefante e sorgo e da cana-de-açúcar).

Em produtos de valor agregado oferece uma grande oportunidade (resultado econômico) para o setor empresarial e para beneficiar tanto o meio ambiente quanto a economia.

Os resíduos não competem por alimentos, são abundantes e relativamente baratos em áreas e, mais significativamente, seu balanço de carbono é próximo de zero, uma vez que o dióxido de carbono (CO₂) emitido na combustão é compensado pelo CO₂ fixado durante seu crescimento.

A Brasil Biomassa é uma empresa especializada em projetos de biomassa, bioenergia e biorrefinaria.

Trabalhamos na implementação de uma biorrefinaria para promover a gestão agrícola/florestal sustentável através da produção de produtos de valor acrescentado.

Numa biorrefinaria lignocelulósica, onde a biomassa bruta (florestal/agrícola/cana-de-açúcar) é primeiro limpa, pré-tratada para melhorar a acessibilidade para processamento subsequente e, em seguida, decomposta em seus constituintes primários (celulose, hemicelulose e lignina) por meio de rotas bioquímicas (enzimática) ou químicas (ácida).

Trabalhamos com tecnologias avançadas, como pirólise e gaseificação, tornaram viável a conversão desses materiais em biocombustíveis de alta energia.

Trabalhamos no desenvolvimento da plataforma para a implantação da biorrefinaria, com uma avaliação técnica (mapeamento e suprimento) para o aproveitamento integral dos resíduos (matérias-primas) e na performance da engenharia conceitual e tecnologia de conversão térmica e no desenvolvimento dos bioprodutos energéticos.

Trabalhamos no planejamento da etapa de “sourcing, preparação” na cadeia de suprimento (sustentabilidade) da matéria-prima (disponibilidade potencial da lignina, celulose e dos compostos alvo) com amplo conhecimento da variabilidade da biomassa (avaliação laboratorial da composição da biomassa, carbono e extrativos) para interagir na aplicação da melhor tecnologia (pirólise, hidrólise ou auto hidrólise para recuperação de antioxidantes e celulose, digestão anaeróbica, torrefação e gaseificação).

Assim estamos trabalhando no desenvolvimento inovador de implantação de duas biorrefinarias florestais e da cana-de-açúcar avançadas e sustentáveis.

Utilizando matérias-primas naturais (florestal/agricultura/cana-de-açúcar) para a produção de bioquímicos (produtos à base de lignina e de fibras da celulose e de bioetanol ou etanol de baixa emissão) ecologicamente corretos que podem substituir produtos à base de petróleo.

Nossas soluções energéticas e sustentáveis podem desempenhar um papel importante no enfrentamento de alguns dos maiores desafios do mundo: o crescimento populacional e as mudanças climáticas.

A utilização de matérias-primas (desenvolvemos uma avaliação do ciclo de vida da biomassa de origem sustentável até os produtos finais) renováveis (florestal e da madeira) em produtos que substituem alternativas (melhor desempenho ambiental) à base de petróleo (bioetanol) e que resultam em baixa pegada de carbono (melhoria ambiental na cadeia de valor).

A biorrefinaria também vai trabalhar na produção de produtos químicos como o bioetanol de segunda geração (altamente sustentável de origem florestal e da madeira, agricultura e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar com as emissões de aproximadamente um décimo do etanol sintético) e intermediários químicos finos.

Para agentes de contraste com uma variedade de aplicações em setores como agricultura, construção civil e cimentos, produtos químicos, farmacêuticos e cosméticos, alimentos, baterias e biocombustíveis.

Numa segunda fase a biorrefinaria vai desenvolver novos produtos energéticos utilizando as folhas e cascas de eucalipto como substrato de matéria-prima para a produção de biogás, biometano, biofertilizantes, CO₂ industrial, amônia e hidrogênio baixo carbono. Em particular, os resíduos florestais (folhas e cascas) são reconhecidos como matéria-prima atraente para biorrefinarias devido aos efeitos que podem ser obtidos ao mesmo tempo em que previnem a poluição ambiental.

Estamos também avaliando a possibilidade de utilização das folhas como uma matéria-prima significativa para a produção de hidrogênio devido ao seu alto teor de celulose, abundância e teor mínimo de enxofre. Essas características as tornam adequadas para diversas tecnologias de produção de hidrogênio, incluindo biohidrogênio e processos de reforma líquida derivados de biomassa, contribuindo para a produção sustentável de energia.





Consultoria Projetos Biocarbono



Nossa equipe reúne décadas de experiência em consultoria, engenharia e tecnologias sustentáveis, unida por uma visão compartilhada de promover a missão da Brasil Biomassa.

Por meio da colaboração contínua com líderes do setor e instituições de pesquisa, continuamos a inovar, garantindo que nossas soluções atendam às necessidades em evolução das indústrias, contribuindo para um futuro mais verde e sustentável.

Soluções pioneiras de carbono renovável para um futuro mais verde.

A Brasil Biomassa é uma empresa brasileira que desenvolve projetos de aproveitamento dos tipos de biomassa de baixo valor em Biocarbono Energético, um conjunto de valiosos produtos (bio-óleo e gás de síntese) de carbono renovável.

Capacitando as indústrias na reduzir sua pegada ambiental enquanto mantêm alto desempenho.

Comprometida com a inovação e a responsabilidade ambiental, a Brasil Biomassa está impulsionando o progresso em direção a um futuro mais sustentável

A equipe de especialistas da nossa unidade de Inovação e Consultoria oferece às empresas suas habilidades e experiência na utilização dos tipos de biomassa em projetos de sucesso como o de produção de biocarbono, bio-óleo e gás sintético, abrangendo todo o processo: business plan, estudo de viabilidade, engenharia conceitual, preparação e submissão dos projetos para investidores e bancos comerciais de financiamento, tecnologia industrial e previsão orçamentária; e gestão do projeto em todas as etapas do desenvolvimento até o relatório final.

O serviço de consultoria e engenharia e apoia as empresas em seu crescimento com base na inovação e transferência de tecnologia , identificando as oportunidades mais adequadas ao contexto empresarial específico e trabalhando com o cliente em todas as etapas.

A Brasil Biomassa possui um histórico inovador no Brasil para o desenvolvimento de projetos de biocarbono. Nosso conhecimento e experiência abrangem os setores de resíduos florestais, agroindustriais e da cana-de-açúcar, gestão de aproveitamento dos resíduos para projetos de biocarbono, indústria de processos, alumínio, cimentos e siderúrgica.

Para atender ao enorme mercado de biocarbono energético, trabalhamos ativamente com o setor industrial para impulsionar a produção de biocarbono.

Desenvolvimento de Plantas de Biocarbono. Trabalhamos com o desenvolvimento de plantas industriais de produção de biocarbono, bio-óleo e gás sintético. Nosso conhecimento tecnológico e experiência em desenvolvimento de projetos de biocarbono podem acelerar o desenvolvimento do seu projeto e minimizar os riscos.

Serviço de Desenvolvimento de Produtos de Baixo Carbono. Ajudamos os clientes a transformar os seus resíduos (florestais, madeira, agricultura e cana-de-açúcar) em produtos de maior valor agregado (biocarbono energético).

Desenvolvemos produtos de carbono biogênico ajustando a densidade, o tamanho das partículas, a composição, a resistência física, a área superficial e as propriedades eletroquímicas das matérias-primas.

Transformando a fabricação de Aço e o refino de metais com o Biocarbono. O Biocarbono é uma solução (substituto do carvão e do coque) de carbono renovável projetada para uso nos fornos de produção de alumínio, cimentos, ferro e aço.

Desempenhando um papel fundamental na redução das emissões de carbono e no aumento da eficiência operacional. Ao substituir o coque e o carvão pelo biocarbono, a Brasil Biomassa permite ao setor industrial para uma transição para um processo mais sustentável, mantendo o alto desempenho.

O Biocarbono é um produto manufaturado e pode ser adaptado para atender às especificações de carbono fóssil. Utilizando tecnologias avançadas de pirólise no desenvolvimento dos projetos industriais, converte os tipos de biomassa em Biocarbono.

Esse processo não apenas reduz as emissões, mas também otimiza as operações dos fornos, contribuindo para processo de produção mais limpa.

A tecnologia de pirólise que desenvolvemos libera todo o potencial da biomassa. Por meio desse processo, convertemos os tipos de biomassa em biocarbono, bio-óleo e gás de síntese.

Esses produtos de carbono renovável são essenciais para indústrias que exigem materiais de alto desempenho, mas também buscam reduzir sua dependência de recursos fósseis. Para as indústrias de refino de alumínio, ferro, aço e metais, o Biocarbono é um divisor de águas.

Como substituto renovável do coque metalúrgico e do carvão fóssil na produção de aço em fornos a arco elétrico (EAF), ele reduz significativamente as emissões de carbono e, ao mesmo tempo, aumenta a eficiência operacional.

Moldando o futuro da siderurgia com o Biocarbono. A Brasil Biomassa está na vanguarda no desenvolvimento de estudos e projetos para transição para o aço verde, posicionando o carbono renovável como um componente crítico na produção de aço em fornos elétricos a arco (EAF).

O biocarbono desempenha um papel essencial na substituição do carbono fóssil, reduzindo significativamente as emissões de carbono e melhorando a eficiência geral das operações em EAF.

Utilizando nossa avançada tecnologia de pirólise, transformamos resíduos em uma fonte de carbono renovável de alta qualidade que atende aos exigentes requisitos da produção moderna de aço.

Estamos comprometidos em acelerar a adoção global do aço verde, ajudando as indústrias a fazer a transição para um futuro mais sustentável e eficiente. Ao incorporar carbono renovável na produção de aço, não estamos apenas enfrentando os desafios de redução das emissões industriais, contribuindo para o objetivo mais amplo de criar uma economia de baixo carbono.

Créditos de Carbono Certificados para Redução de CO₂: Compensando Emissões e Apoiando a Sustentabilidade. Na Brasil Biomassa, estamos comprometidos em ajudar empresas a atingir suas metas de sustentabilidade por meio dos créditos de carbono certificados.

MODALIDADES DE TRABALHO CONSULTORIA. Consultoria empresarial no desenvolvimento do plano estrutural de negócios (business plan) e do estudo de viabilidade econômica (diretrizes de avaliação dos custos e do resultado econômico) para o dimensionamento da planta industrial de produção pelo sistema de pirólise do biocarbono, bio-óleo e gás de síntese e do projeto de financiamento nacional e internacional dos equipamentos.

Consultoria especializada em estudo de mercado nacional e internacional com avaliação do potencial do mercado para segurança no desenvolvimento de um projeto sustentável (mercado, concorrência, compradores e produtores) de biocarbono.

Consultoria para o planejamento estratégico planta industrial de biocarbono com a identificação dos produtores de equipamentos industriais do mercado nacional e internacional. A Brasil Biomassa tem uma consultoria especializada em mapeamento energético, visando a excelência em qualidade, contribuindo com o setor industrial de maneira ética e produtiva. Trabalhamos com o mapeamento de suprimento energético com lastro em nosso banco de dados dos players produtores de biomassa para segurança do projeto industrial.

Engenharia para estruturação do projeto e do dimensionamento da planta industrial de biocarbono. A Brasil Biomassa oferece os serviços de assessoria técnica na aquisição dos principais equipamentos de biocarbono, elaborando a equalização técnica através de folhas de dados de cada equipamento e o enquadramento do fornecimento, garantia , qualidade, sistemas de automação.

Engenharia Conceitual do projeto. Atuamos na engenharia conceitual do projeto com um completo estudo de viabilidade financeira, calculando a taxa de retorno e o payback do empreendimento.

Além de todas as estimativas de CAPEX e OPEX, no projeto básico também são contemplados os balanços de massa e a relação dos equipamentos do sistema de pirólise para a produção de biocarbono.

EXPERIÊNCIA EM PROJETOS BIOCARBONO. A Brasil Biomassa com a sua consultoria desenvolveu dois estudos técnicos para a implantação das unidades de biocarvão (biocarbono) para a Construtora Reunion/Tecnored/Vale e a Gerdau Siderúrgica. O objetivo preliminar dos nossos trabalhos envolveu o desenvolvimento de um mapeamento de biomassa (primeiro florestal/madeira e segundo agricultura/sucroenergético) para que a empresa possa desenvolver um projeto de engenharia conceitual para originação de biomassa com avaliação da mesorregião com maior potencialidade, disponibilidade e sazonalidade. Este é um descritivo técnico de apoio ao desenvolvimento do relatório analítico de biomassa florestal e do processo industrial da madeira.

A pirólise, por sua vez, apresenta um forte potencial de aplicação na cadeia de produção de combustíveis sólidos como o biocarvão (biocarbono) a partir da biomassa agroflorestal. Apesar da biomassa ser considerada, por alguns autores, o terceiro maior recurso energético primário, e a fonte de energia mais importante do mundo, o seu uso para energia depende de fatores como a eficiência do sistema empregado.

Disponibilidade de recursos, aceitação social, emissões, política de uso da terra, tecnologia, custo econômico da usina e fluxo de combustível..

A diversidade, a disponibilidade de biomassa lignocelulósica e a demanda atual por fonte de energia renováveis e de baixo custo, representam uma oportunidade para o desenvolvimento dos projetos de biocarvão (biocarbono). O biocarvão (biocarbono) também produzido a partir de resíduos lignocelulósicos, possui baixo potencial para as emissões de gases tóxicos e poluentes, em decorrência das menores concentrações de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas.

A ideia principal do projeto conceitual foi identificar os potenciais de origem de biomassa da agricultura/agroindustrial e sucroenergético(bagaço e palha) e eventualmente biomassa de origem florestal por mesorregião e seu potencial de disponibilidade e sazonalidade.

A Brasil Biomassa levantou e gerou informações dos custos preliminares (“conceituais”) para toda a cadeia partindo da captura da biomassa (preço da biomassa + custo logístico etc.), dentro das faixas estabelecidas pela metodologia.

Passando pelo estudo sobre o processamento (estoque, carbonização pirose e disponibilização do biocarvão (biocarbono) para a logística de consumo.

Podemos considerar dois modelos que podem ser desenvolvidos pela empresa para uma planta de biocarvão (biocarbono):

- Planta integrada a uma unidade industrial compartilhando utilidades como vapor, energia, água, site, logística de pesagem etc.;
- Planta isolada de uma unidade industrial tendo que ter todas as estruturas para operar o processo de carbonização sem sinergia com alguma planta industrial;

Para cada um dos modelos de planta, o projeto visa:

- Garantir que os balanços preliminares de massa e energia são verdadeiros o suficiente para quantificação da melhor configuração para plantas integradas.
- Garantir a visibilidade das características de logística para embasar estudos de inventário de emissões, como logística externa e interna da fronteira, distâncias, tipo de modal e porte.

Escopo do trabalho. Esta especificação técnica tem como objetivo estabelecer as características básicas. Os requisitos e condições mínimas necessárias para o fornecimento de mapeamento de disponibilidade e de potencialidade da biomassa da agricultura e do beneficiamento agroindustrial e possíveis de serem fornecidas à Gerdau/Vale. Vamos ampliar com um relatório de biomassa florestal e do processo industrial da madeira com disponibilidade

Compreende o escopo desta Especificação Técnica o desenvolvimento de mapeamento de disponibilidade e de potencialidade da biomassa da agricultura e do beneficiamento agroindustrial, a serem utilizadas na produção de biocarvão (biocarbono) destinadas à Coqueria e PCI dos Altos Fornos 1 e 2.

É importante que o foco do mapeamento seja a utilização nesta biomassa nos processos siderúrgicos Coqueria e Alto Forno, substituindo parcialmente as matérias primas usualmente utilizadas.

Oferta de biomassa agrícola e agroindustrial. Avaliação das regiões com maior potencial de biomassa agrícola e agroindustrial e dos maiores produtores com quantidade de biomassa para o desenvolvimento dos projetos de bio-carvão(biocarbono).

- Geração por microrregião - Geração por setor agrícola e agroindustrial.
- Tendências esperadas para alterações de volume de biomassa agrícola e agroindustrial para os próximos 10 anos.

Disponibilidade da biomassa relacionada

- Avaliação da biomassa comercialmente disponível, volume disponível (ton/ano), periodicidade/sazonalidade e o custo (R\$/ton).

Análise de mercado e de logística

- Mapa com quantitativo de disponibilidade de biomassa no raio definido informando as maiores fontes.
- Evolução potencial de geração de resíduos agroindustriais e agrícolas.
- Usos e competidores no mercado dos resíduos agrícolas e agroindustriais.
- Potenciais polos para implantação de plantas de biocarvão (biocarbono).

- Cadeia de logística de aproveitamento dos resíduos agrícolas.
- Sistema logístico dos resíduos agrícolas e agroindustriais. Logística de Transporte. Custos logísticos de transporte de biomassa. Armazenamento de biomassa agrícola.

Tecnologias para transformação da biomassa em biocarvão (biocarbono)

- Avaliação preliminar das rotas e tecnologias de conversão da biomassa agrícola e agroindustrial em biocarvão (biocarbono), pré-tratamento da biomassa, sistema de enfardamento, secagem, moagem, pirólise produção biocarvão (biocarbono).

Teste industrial de pirólise com a biomassa da cana-de-açúcar (palha e bagaço), das culturas agrícolas como o Açaí, Algodão, Arroz, Amendoim, Cacau, Café, Cevada, Feijão, Laranja, Mandioca, Milho, Soja, Trigo e das gramíneas como o Capim Elefante e o Sorgo e as madeiras de Pinus e Eucalipto.





Consultoria Projetos Biochar



Soluções pioneiras de carbono renovável para um futuro mais verde. A Brasil Biomassa é uma empresa brasileira que desenvolve projetos de aproveitamento dos tipos de biomassa de baixo valor em Biochar Energético, um conjunto de valiosos produtos (extrato pirolenhoso e vinagre de madeira) de carbono renovável, capacitando para reduzir sua pegada ambiental enquanto mantêm alto desempenho.

Comprometida com a inovação e a responsabilidade ambiental, a Brasil Biomassa está impulsionando o progresso em direção a um futuro mais sustentável.

O biochar é um resíduo rico em carbono e de grãos finos que pode ser produzido por técnicas antigas ou por processos modernos de gaseificação e pirólise de biomassa de última geração.

A combustão e a decomposição de biomassa lenhosa e resíduos agrícolas e da cana-de-açúcar resultam na emissão de uma grande quantidade de dióxido de carbono, enquanto a gaseificação e a pirólise dessa biomassa a converteriam em biochar que, quando aplicado ao solo, pode armazenar esse CO₂ no solo, levando à redução da emissão de GEE e ao aumento da fertilidade do solo.

A principal qualidade do biochar que o torna atrativo como corretivo de solo, é sua estrutura altamente porosa, potencialmente responsável pela melhor retenção de água e pelo aumento da área superficial do solo.

O biochar promete resolver problemas crônicos de desenvolvimento humano, como fome e insegurança alimentar, baixa produtividade agrícola e esgotamento do solo, desmatamento e perda de biodiversidade, pobreza energética, poluição da água, poluição do ar e mudanças climáticas.

Além do biochar, o extrato pirolenhoso, vinagre de madeira e o gás podem ser coletados de gaseificadores/pirolizadores modernos.

A equipe de especialistas da nossa unidade de Inovação e Consultoria oferece às empresas suas habilidades e experiência na utilização dos tipos de biomassa em projetos de sucesso como o de produção de biochar , abrangendo todo o processo: business plan, estudo de viabilidade, engenharia conceitual,

preparação e submissão dos projetos para investidores e financiamento, tecnologia industrial e previsão orçamentária; e gestão do projeto em todas as etapas do desenvolvimento até o relatório final. O serviço de consultoria e engenharia e apoia as empresas em seu crescimento com base na inovação e transferência de tecnologia.

Identificando as oportunidades mais adequadas ao contexto empresarial específico e trabalhando com o cliente em todas as etapas.

A Brasil Biomassa possui um histórico inovador no Brasil para o desenvolvimento de projetos de biochar.

Nosso conhecimento e experiência abrangem os setores de resíduos florestais, agroindustriais e da cana-de-açúcar, gestão de aproveitamento dos resíduos para projetos de biochar para agricultura regenerativa.

Para atender ao enorme mercado de biochar energético, trabalhamos ativamente com o setor industrial para impulsionar a produção de biochar.

Desenvolvimento de Plantas de biochar.

Trabalhamos com o desenvolvimento de plantas industriais de produção de biochar, extrato pirolenhoso e vinagre de madeira.

Nosso conhecimento tecnológico e experiência em desenvolvimento de projetos de biochar podem acelerar o desenvolvimento do seu projeto e minimizar os riscos.

A Brasil Biomassa Consultoria Engenharia Tecnologia está implantando para um grupo de investidores internacionais a maior planta industrial de produção de biochar com a biomassa agrícola (diversas culturas agrícolas do norte do Brasil como caroço do açaí, cachos de dendê e adicionalmente a casca e fibra do coco verde, casca do cacau, casca, palha e pergaminho do café e palha e sabugo do milho) que será apresentado na COP 30.

O projeto industrial visa produzir mais de 50.000 toneladas de biochar anualmente para sequestrar mais de 120.000 toneladas de CO₂ de forma eficaz.

As mudanças climáticas são um dos desafios mais urgentes do nosso tempo, e reduzir as emissões de gases de efeito estufa por si só não é suficiente para atingir as metas climáticas globais. As tecnologias de Remoção de Dióxido de Carbono (CDR) desempenham um papel crucial na remoção do excesso de CO₂ da atmosfera, ajudando a alcançar emissões líquidas zero e mitigar as mudanças climáticas.

As soluções de CDR variam de métodos baseados na natureza a soluções tecnológicas avançadas, como captura direta de ar e produção de biochar.

Com a implantação desta planta de grande porte, estaremos na vanguarda dos esforços de CDR, alavancando a tecnologia inovadora de biochar para fornecer uma solução sustentável e eficaz para o sequestro de carbono.

Queremos contribuir para um planeta mais verde, capturando carbono, melhorando a saúde do solo e promovendo práticas agrícolas sustentáveis.

Trabalho da Brasil Biomassa no desenvolvimento da maior planta brasileira de Biochar.

A Brasil Biomassa é bem sucedida na formação de uma equipe de gestão com amplo conhecimento do setor de biomassa e energia, com experiência necessária em gestão e desenvolvimento de novos negócios.

Nossa consultoria é especializada no desenvolvimento de projetos de produção de biochar atuando na orientação profissional sobre todos os aspectos da implementação e otimização da planta industrial de biochar.

Nossos Serviços

Plano estrutural de negócios para a implantação da planta industrial de biochar com uso dos tipos de biomassa agrícola.

Planejamento estratégico (processo de gestão estratégica, planejamento estratégico da unidade de produção de Biochar, diagnóstico estratégico interno e externo e definição dos objetivos, stakeholders, estratégia de negócio, processo de Operacionalização, concorrência de mercado, balanced score card biochar, análise swot do projeto.

Estudo de viabilidade econômica, capex/opex e cálculos de ROI e o retorno dos investimentos com a integração de processos de produção de Biochar, Extrato Pirolenhoso e Vinagre de Madeira e de Bio-óleo e de Gás sintético.

Desenvolvimento do estudo de mercado nacional e internacional de consumo de biochar avaliando o potencial do mercado de consumo para segurança no desenvolvimento de um projeto sustentável (mercado, concorrência, compradores e produtores) e do potencial de mercado (grandes players compradores no mercado nacional e internacional).

Conselhos estratégicos para implementar biochar nos processos de negócios para empreendedores e investidores.

Projeto de engenharia e de dimensionamento da planta industrial.

Desenvolvimento do projeto conceitual de engenharia e dimensionamento da planta industrial de Biochar. Engenharia básica para estruturação do projeto. Projeto básico de engenharia, fluxo de produção e fluxograma do projeto industrial de processamento e layout do projeto e sistema estrutural.

Dimensionamento da planta industrial 4.0 com os principais equipamentos de produção de biochar elaborando a equalização técnica através de folhas de dados de cada equipamento e o enquadramento do fornecimento, levando em conta os aspectos de garantia de performance, qualidade, sistemas de automação incorporados no equipamento com interfaces de controles operacionais entre outros. Avaliação das empresas nacionais e internacionais para fornecimento dos equipamentos e da melhor alternativa de utilização dos equipamentos industriais (engenharia de compras) e memorial descritivo básico dos principais equipamentos para uma produção viável do ponto de vista econômico.

Linha de equipamentos de pirólise.

Engenharia Conceitual e Tecnologia Industrial. Equipamentos de pirólise. Dimensionamento de planta industrial de pirólise de baixa, média e alta tecnologia.

Consultoria para a obtenção de crédito de carbono. Avaliação do Mercado de carbono para os projetos de Biochar, extrato pirolenhoso e vinagre de madeira. Mercado regulado e voluntário. Tipos de créditos de carbono. Estruturas operacionais do mercado. Mecanismo de desenvolvimento limpo. Características das reduções certificadas de emissão . Geração de crédito de carbono. Metodologia utilizada. Estimativa de emissões reduzidas e absorções de CO₂.

Teor de carbono total. Emissão de CO₂. Biochar e mecanismo de Mercado de Carbono. Tecnologia de emissões negativas e Sequestro de carbono. Uso do biochar antes do seu armazenamento permanente no reservatório de carbono do solo. Mercado de remoção de carbono. Estudos de caso e projetos.

Adicionalmente uma avaliação da certificação internacional biochar . “International Biochar Initiative” e da “European Biochar Certificate”



Consultoria Projetos Biogás Biometano



A Brasil Biomassa é uma empresa brasileira que desenvolve projetos de aproveitamento dos tipos de biomassa de baixo valor em Biogás Biometano CO₂ Industrial Biofertilizantes e Amônia Verde um conjunto de valiosos produtos de energia renovável, capacitando as indústrias na reduzir sua pegada ambiental enquanto mantêm alto desempenho. Comprometida com a inovação e a responsabilidade ambiental, estamos impulsionando o progresso em direção a um futuro mais sustentável.

A equipe de especialistas da nossa unidade de Inovação e Consultoria oferece às empresas suas habilidades e experiência na utilização dos tipos de biomassa em projetos de sucesso como o de produção de Biogás Biometano CO₂ Industrial Biofertilizantes e Amônia Verde.

Abrangendo todo o processo: business plan, estudo de viabilidade, engenharia conceitual, preparação e submissão dos projetos para investidores e bancos comerciais de financiamento, tecnologia industrial e previsão orçamentária; e gestão do projeto em todas as etapas do desenvolvimento até o relatório final.

Trabalhamos com o desenvolvimento de plantas industriais de produção de Biogás Biometano CO₂ Industrial Biofertilizantes e Amônia Verde. Nosso conhecimento tecnológico e experiência em desenvolvimento de projetos de biogás e biometano podem acelerar o desenvolvimento do seu projeto e minimizar os riscos.

Ajudamos os clientes a transformar os seus resíduos (florestais, madeira, agricultura e cana-de-açúcar) em produtos de maior valor agregado (biogás e biometano energético).

Desenvolvemos produtos de carbono biogênico ajustando a densidade, o tamanho das partículas, a composição, a resistência física, a área superficial e as propriedades eletroquímicas das matérias-primas.

O biogás tem uma ampla variedade de aplicações, incluindo como substituto do gás natural e óleo de aquecimento, uma atualização para utilização como combustível de transporte e uso na produção de calor e eletricidade usando a tecnologia combinada de calor e energia. A digestão anaeróbia de culturas energéticas como da cana-de-açúcar é de interesse crescente para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e facilitar o desenvolvimento sustentável do fornecimento de energia.

O biogás e o biometano são utilizados em diversas áreas, incluindo aplicações automotivas e geração de energia.

Além disso, os resíduos secundários, que são um subproduto deste processo, são um fertilizante agrícola de alto valor, amônia verde, hidrogênio e gás carbônico industrial.

A geração de biogás usando digestão anaeróbica (AD) tem benefícios substanciais em relação a outros métodos de produção de bioenergia.

Consultoria empresarial no desenvolvimento do plano estrutural de negócios (business plan) e do estudo de viabilidade econômica (diretrizes de avaliação dos custos e do resultado econômico).

Para o dimensionamento da planta industrial de produção de Biogás, Biometano, CO₂ Industrial e Amônia Verde e do projeto de financiamento nacional e internacional dos equipamentos.

Consultoria especializada em estudo de mercado nacional e internacional com avaliação do potencial do mercado para segurança no desenvolvimento de um projeto sustentável (mercado, concorrência, compradores e produtores) de biogás e biometano.

Consultoria para o planejamento estratégico planta industrial de biogás e biometano com a identificação dos produtores de equipamentos industriais de digestão anaeróbica do mercado nacional e internacional.

A Brasil Biomassa é especializada no mapeamento dos tipos de biomassa como fonte de substratos para a produção de biogás, biometano e gás carbônico industrial com avaliação dos dados de produção, custos dos tipos de biomassa e da logística de transporte, quantitativo disponível para o desenvolvimento da planta industrial e uma viabilidade econômica com regras de Capex e Opex

Nosso trabalho de mapeamento de substrato envolve: Análise por mesorregiões e do mercado de produção de biomassa, buscando identificar suas expectativas futuras da matéria-prima como substrato das plantas de biogás e biometano com segurança e rentabilidade. Avaliação da estimativa do volume disponível / comprometido por tipo de biomassa em cada uma das mesorregiões como fonte de substrato e um levantamento da demanda atual e potencial de disponibilidade de biomassa.

Desenvolvimento de uma planilha com dados de cada tipo de biomassa, composição química, quantitativo e disponibilidade, dos preços e custos médios de mercado para biomassa dentro de cada uma das mesorregiões. Delineamento de potenciais cenários de abastecimento de substrato da agricultura e agroindustrial.

Substrato de grandes culturas como Algodão herbáceo Amendoim Arroz Banana Babaçu Buriti Cacau Café Cana-de-açúcar Castanha-de-caju Castanha-do-pará Cevada Coco-da-baía Dendê Feijão Fumo Girassol Laranja Mamona Mandioca Milho Soja Sorgo Trigo Uva

Substrato fruticultura e alimentares Abacate Abacaxi Açaí Acerola Ameixa Amora Banana Caqui Cará Carambola Cupuaçu Figo Fruta-de-conde Goiaba Graviola Guaraná Jabuticaba Jaca Jambo Jiló Kiwi Lichia Lima Limão Maça Macaúba Mamão Manga Mangaba Maracujá Marmelo Maxixe Melancia Melão Morango Nectarina Nêspira Noz Pequi Pera Pêssego Pitaia Pitanga Pupunha Romã Tangerina Umbu Substrato das leguminosas das culturas alimentares Abóbora Abobrinha Acelga Agrião Aipo Alcachofra Alcaparra Alecrim Alface Alho Alho-poró Almeirão Aspargo Atemoia Aveia branca Azeitona Batata Batata-baroa Batata-doce Berinjela Bertalha Beterraba Brócolis Bucha (esponja vegetal) Camomila Camu-camu Canola Caruru Cebola Cebolinha Cenoura Centeio Chicória Chuchu Coentro Cogumelos Couve Couve-flor Erva-mate Ervilha Espinafre Fava Gengibre GHortelã Juta Lentilha Linho Louro Nabo Palmito Pepino Pimenta Pimentão Quiabo Rabanete Repolho. Rúcula Salsa Tomate Triticale

Substrato das gramíneas como o sorgo, capim elefante, baracharia e pinhão manso.

Substrato de resíduos da produção animal da pecuária avicultura e de beneficiamento de Alevinos Asininos (Asnos) Avestruzes Bovinos (Bois e Vacas) Bubalinos (Búfalos) Camarão Caprinos (Bodes e Cabras) Carpa Casulos do bicho-da-seda Codornas Coelhos Equinos (Cavalos) Frangos abatidos e Galináceos Leite Mel de abelha Muares (Burros e Mulas) Peixes, Ostras, vieiras e mexilhões Ovinos (Ovelhas e Carneiros) Patos e gansos Perus Pirarucu Tambaqui Tilápia Truta Tucunaré Rãs Suínos (Porcos) e abatidos.

Substrato dos resíduos sólidos urbanos, do tratamento de esgotos e efluentes líquidos de animais.

Cosubstratos resíduos da indústria de alimentos e resíduos verdes (folhas e grama), papel e papelão, processamento de bebidas, tabacos, matadouro e frigoríficos, resíduos de laticínios, lodo do processo celulose, vinhaça e outros resíduos do processo sucroenergético, lamas e águas residuais e RSU e lixo urbano.

Substrato da silvicultura e extração vegetal de todos os tipos de madeira (casca, resinas e folha).

E do processo industrial da madeira e de papel e celulose e das culturas da Bambu Piaçava Pinhão Sisal.

Aspectos econômicos. O projeto que desenvolvemos da usina de biogás e biometano deve possibilitar todo o desenvolvimento técnico da geração de energia a partir do tratamento de resíduos, mas também será importante na demonstração da viabilidade econômica de empreendimentos com várias escalas e com vários tipos de substratos.

Como despesas principais, tem-se os custos operacionais, tais como manutenção de equipamentos e obras civis, consumo de energia elétrica e térmica, transporte de substratos e produtos, operacional e custos administrativos, impostos e taxas, seguros e segurança.

Análise do Capex desenvolvida pela Brasil Biomassa envolvendo os custos de implantação, com uma realização detalhada dos investimentos (construção do biorreator, preparação do terreno para cultivo, sistemas de coleta e transporte de substratos, equipamentos de conversão e purificação de biogás em biometano, sistemas de armazenamento e infraestrutura complementar).

Análise de Opex pela Brasil Biomassa envolvendo os custos operacionais com uma avaliação dos custos operacionais para a produção de biogás e Biometano (consumo de energia, manutenção do biorreator, manejo da terra, custos com fertilizante e irrigação, processamento dos substratos, tratamento de efluentes, custos de transporte e operação dos sistemas de conversão e purificação de biogás) para a implantação da planta de biogás e biometano.

A Brasil Biomassa atua no estudo técnico de engenharia básica e industrial. Apoio técnico e indicação de empresa para o registro da unidade industrial (contabilidade, comercial e propriedade industrial), empresa de engenharia para o licenciamento ambiental e rima e o estudo de impacto ambiental.

Engenharia industrial para estruturação do projeto e do dimensionamento da planta industrial Biogás e Biometano.

Engenharia para estruturação do projeto e do dimensionamento da planta industrial de biogás e biometano.

A Brasil Biomassa oferece os serviços de assessoria técnica na aquisição dos principais equipamentos de biogás, elaborando a equalização técnica através de folhas de dados de cada equipamento e o enquadramento do fornecimento, garantia , qualidade, sistemas de automação.

Engenharia Conceitual do projeto. Atuamos na engenharia conceitual do projeto com um completo estudo de viabilidade financeira, calculando a taxa de retorno e o payback do empreendimento.

Além de todas as estimativas de CAPEX e OPEX, no projeto básico também são contemplados os balanços de massa e a relação dos equipamentos do sistema de pirólise para a produção de biogás.





Consultoria Projetos Hidrogênio Verde



A Brasil Biomassa é uma empresa brasileira que desenvolve projetos de aproveitamento dos tipos de biomassa de baixo valor em Hidrogênio verde e CO2 biogênico um conjunto de valiosos produtos de energia renovável, capacitando as indústrias na reduzir sua pegada ambiental enquanto mantêm alto desempenho. Comprometida com a inovação e a responsabilidade ambiental, estamos impulsionando o progresso em direção a um futuro mais sustentável.

A equipe de especialistas da nossa unidade de Inovação e Consultoria oferece às empresas suas habilidades e experiência na utilização dos tipos de biomassa. Em projetos de sucesso como o de produção de Hidrogênio verde e CO2 biogênico, abrangendo todo o processo: business plan, estudo de viabilidade, engenharia conceitual, preparação e submissão dos projetos para investidores e bancos comerciais de financiamento, tecnologia e previsão orçamentária; e gestão do projeto em todas as etapas do desenvolvimento até o relatório final.

Nosso conhecimento tecnológico e experiência em desenvolvimento de projetos de Hidrogênio verde e CO2 biogênico podem acelerar o desenvolvimento do seu projeto e minimizar os riscos.

Ajudamos os clientes a transformar os seus resíduos (florestais, madeira, agricultura e cana-de-açúcar) em produtos de maior valor agregado (Hidrogênio verde e CO2 biogênico).

Desenvolvemos produtos de carbono biogênico ajustando a densidade, o tamanho das partículas, a composição, a resistência física, a área superficial e as propriedades eletroquímicas das matérias-primas.

O hidrogênio é um transportador de energia versátil (não uma fonte de energia). Ele pode ser produzido a partir de várias matérias-primas e pode ser usado em praticamente qualquer aplicação. A eletricidade renovável pode ser convertida em hidrogênio por meio da eletrólise, que pode acoplar energia renovável crescente com usos finais que são mais difíceis de eletrificar.

Esse acoplamento também permite que os eletrolisadores forneçam flexibilidade à rede , complementando alternativas como baterias, resposta à demanda e veículo para rede na eletrificação inteligente.

O hidrogênio é considerado um combustível verde, pois o produto da combustão de H_2 é vapor de água.

Portanto, ele tem zero emissões de CO_2 quando usado para produzir energia (por exemplo, por meio de células de combustível. Seu valor de aquecimento (em uma base de massa) supera o do metano, gasolina e carvão em 2,4, 2,8 e 4 vezes, respectivamente, e tem uma densidade de energia 100 vezes maior do que uma bateria de íons de lítio convencional.

Quando comparado a outros combustíveis conhecidos, o hidrogênio tem o maior conteúdo de energia por unidade de peso. Ele também tem muitas outras características, como uma melhor capacidade de armazenamento do que a eletricidade, que o tornam um candidato atraente e provável para desempenhar um papel significativo como combustível para o futuro. Em relação à produção de H_2 , prevê-se que sejam geradas 50–82 Mt de H_2 . Para produzir hidrogênio verde, a energia renovável é convertida em hidrogênio por eletrólise, e esse hidrogênio é processado posteriormente para aumentar sua densidade energética. O processamento posterior pode assumir a forma de liquefação, uso de transportadores de hidrogênio orgânico líquido (LOHC) ou conversão para amônia, metanol, aço ou combustíveis sintéticos.

As etapas adicionais de conversão se traduzem em perdas de energia e, portanto, um aumento no custo por unidade de energia entregue.

Para qualquer processo de conversão específico, essas perdas serão as mesmas, independentemente de a conversão ser feita em uma região importadora ou exportadora. Portanto, elas não serão um diferencial quando a mercadoria final for usada diretamente sem reconversão para hidrogênio. Assim, para tornar o comércio econômico, o custo de produção de hidrogênio verde deve ser suficientemente menor na região exportadora do que na região importadora para compensar o custo de transporte. Esse diferencial de custo se tornará maior à medida que a escala dos projetos aumenta e a tecnologia se desenvolve para reduzir os custos.

Consultoria empresarial no desenvolvimento do plano estrutural de negócios (business plan) e do estudo de viabilidade econômica (diretrizes de avaliação dos custos e do resultado econômico) para o dimensionamento da planta industrial de produção de Hidrogênio verde e CO2 biogênico e do projeto de financiamento nacional e internacional dos equipamentos.

Consultoria especializada em estudo de mercado nacional e internacional com avaliação do potencial do mercado para segurança no desenvolvimento de um projeto sustentável (mercado, concorrência, compradores e produtores) de Hidrogênio verde e CO2 biogênico.

Consultoria para o planejamento estratégico planta industrial de Hidrogênio verde e CO2 biogênico com a identificação dos produtores de equipamentos industriais do mercado nacional e internacional.

Brasil Biomassa é especializada no mapeamento dos tipos de biomassa como fonte de matéria-prima para a produção de Hidrogênio verde e CO2 biogênico com avaliação dos dados de produção, custos dos tipos de biomassa e da logística de transporte, quantitativo disponível para o desenvolvimento da planta industrial e uma viabilidade econômica com regras de Capex e Opex.

Aspectos econômicos. O projeto que desenvolvemos da usina de Hidrogênio verde e CO2 biogênico deve possibilitar todo o desenvolvimento técnico da geração de energia a partir do tratamento de resíduos, mas também será importante na demonstração da viabilidade econômica de empreendimentos.

Análise do Capex desenvolvida pela Brasil Biomassa envolvendo os custos de implantação, com uma realização detalhada dos investimentos (construção do biorreator, preparação do terreno, sistemas de coleta e transporte, equipamentos e infraestrutura complementar).

Análise de Opex pela Brasil Biomassa envolvendo os custos operacionais com uma avaliação dos custos operacionais para a produção de Hidrogênio verde e CO2 biogênico .

A Brasil Biomassa atua no estudo técnico de engenharia básica e industrial.

Apoio técnico e indicação de empresa para o registro da unidade industrial (contabilidade, comercial e propriedade industrial), empresa de engenharia para o licenciamento ambiental e rima e o estudo de impacto ambiental.

Engenharia industrial para estruturação do projeto e do dimensionamento da planta industrial Hidrogênio verde e CO2 biogênico.

Engenharia para estruturação do projeto e do dimensionamento da planta industrial. A Brasil Biomassa oferece os serviços de assessoria técnica na aquisição dos principais equipamentos , elaborando a equalização técnica através de folhas de dados de cada equipamento e o enquadramento do fornecimento, garantia , qualidade, sistemas de automação.

Engenharia Conceitual do projeto. Atuamos na engenharia conceitual do projeto com um completo estudo de viabilidade financeira, calculando a taxa de retorno e o payback do empreendimento. Além de todas as estimativas de CAPEX e OPEX, no projeto básico, os balanços de massa e a relação dos equipamentos.



Consultoria Projetos Pellets



A Brasil Biomassa possui um canal especializado em projetos customizados de produção agropellets (biomassa da agricultura), de biopellets (gramíneas e da cana-de-açúcar) e pellets de todos os tipos de madeira e nossa equipe de engenharia e técnicos estão aptos a desenvolver as melhores soluções, nas mais diversas especificações, atendendo a necessidade, garantido maiores ganhos e consequentemente maior produtividade.

Assim trabalhamos com todas as indústrias do setor florestal e do processo industrial da madeira, indústrias de papel e celulose, laminação, compensados, painel de madeira e compensados e mdf. Movelaria e agentes do setor de produção de biomassa e de resíduos industriais e arborização, construção civil e supressão florestal, produtores e diretores de empresas setor da agricultura e do beneficiamento agroindustrial e sucroenergético, empreendedores projetos inovadore.

Para os empresários dos setores florestais e madeira, agricultura e agroindustrial e da cana-de-açúcar e para desenvolvedores de projetos e empresas de geração e produção de energia, investidores e com empresas que pretendem desenvolver as plantas industriais sustentáveis.

Consultoria empresarial no desenvolvimento do plano estrutural de negócios (relatório analítico com diretrizes no desenvolvimento de um projeto sustentável) e do estudo de viabilidade econômica (diretrizes de avaliação dos custos e do resultado econômico, capex e opex) para a produção de pellets.

Consultoria especializada em estudo de mercado nacional e internacional. O estudo de mercado avalia o potencial do mercado para segurança no desenvolvimento de um projeto sustentável (mercado, concorrência, compradores e produtores) com a planilha dos players produtores (pellets com dados e quantitativo de produção e de disponibilidade e dos preços de mercado) e da biomassa, da logística de transporte e de produção (palha enfardada) e do potencial de mercado (grandes players produtores).

Consultoria para o planejamento estratégico planta industrial pellets. Identificação dos produtores de equipamentos industriais do mercado nacional e internacional. Credenciamento dos equipamentos industriais.

Consultoria financeira especializada no desenvolvimento do projeto de financiamento nacional e internacional. A Brasil Biomassa atua no desenvolvimento do projeto de financiamento nacional por inovação tecnológica para aquisição dos equipamentos industriais.

Consultoria econômica e tributária para obtenção de incentivos (instalação da planta com geração de novos empregos) e benefícios fiscais (redução de tributação dos equipamentos, construção civil e ex-tarifários dos maquinários) e doação de área industrial para instalação de uma planta industrial (municipal e estadual).

Consultoria e Mapeamento suprimento energético florestal e da madeira, agricultura e agroindustrial e sucroenergético. Atuação da Brasil Biomassa no desenvolvimento de mapeamento de disponibilidade e de fornecimento de biomassa florestal (extração e colheita) e da madeira da silvicultura e extrativismo, agricultura e beneficiamento agroindustrial e sucroenergético para projetos sustentáveis para a produção industrial de pellets. Avaliação por tipo de cultura com base da produção (colheita e beneficiamento) por região para facilitar o uso imediato como uma fonte energética. O mapeamento do potencial de biomassa florestal e da madeira, agricultura e agroindustrial e sucroenergético desenvolvido pela Brasil Biomassa para suprimento.

Consultoria especializada no desenvolvimento e estruturação do marketing e na venda nacional e internacional. Atua no desenvolvimento do marketing e venda Internacional.

Contrato internacional e uma estratégia técnica de marketing internacional. Identificação dos grandes players comerciais no Reino Unido-RWE Tilbury Power Stations, da Drax Power Energy, EON Ironbridge Power, Eggborough Power Stations, Rugeley Power Stations, Bélgica Essent Energy e Electrabel Power, Dinamarca Vattenfall e Dong Energy.

Engenharia industrial para estruturação do projeto e do dimensionamento da planta industrial.

Gerenciamento para garantia de matéria-prima com o mapeamento dos tipos de biomassa para o desenvolvimento de projetos e descarbonização industrial.

Engenharia de projetos. Equipamentos para produção de pellets com linha de crédito internacional.

A Brasil Biomassa oferece os serviços de assessoria técnica na aquisição dos principais equipamentos, elaborando a equalização técnica através de folhas de dados de cada equipamento e o enquadramento do fornecimento, garantia de performance, qualidade, sistemas de automação.

Engenharia Conceitual do projeto. Atuamos na engenharia conceitual do projeto com um completo estudo de viabilidade financeira, calculando a taxa de retorno e o payback do empreendimento.

Além de todas as estimativas de CAPEX e OPEX, no projeto básico também são contemplados os balanços de massa, balanços de vapor e balanços hídricos, a relação dos equipamentos e construções necessárias, o layout da indústria, os levantamentos de cargas e de sistemas elétricos e o cronograma de engenharia. Desenvolvemos os estudos técnicos atendendo a todos os requisitos técnicos, pronto para dar entrada em todos os pedidos de licenças ambientais e demais licenças necessárias para o empreendimento.

A Brasil Biomassa é especializada no desenvolvimento das plantas industriais de produção de pellets. Na fase industrial iniciamos com a área de recepção de matéria-prima para o processo industrial. Para minimizar os custos a unidade industrial de processamento de pellets deva ser construída próxima da área de matéria-prima (transporte pneumático até a tremonha de matéria-prima).

A planta industrial de pellets deve operar ininterruptamente, requerendo um contínuo abastecimento de biomassa para a geração de energia térmica (resíduos descartados) e de matéria-prima (cavaco, wood chips, serragem ou micro-pó) para o processo industrial.

Inteligência para transformar desafios em projetos de sucesso empresarial. Na Brasil Biomassa sabemos que, para continuar evoluindo, precisamos fazer com que cada estudo técnico seja desenvolvido com ampla segurança para êxito industrial como nos estudos do mapeamento dos tipos de biomassa para fornecimento/projetos energéticos que desenvolvemos como a maior planta mundial de biopellets que desenvolvemos para a Cosan Biomassa do Grupo Raizen. Estudos da cana energia para a produção de biopellets para EBX do Grupo Eike Batista e aos estudos consultivos e de engenharia para a produção de pellets que desenvolvemos para Grupo Financeiro BMG e as empresas Naturasul Engenharia, Amendôas do Brasil, The Collemann Group, Valorem Florestal, Yrendague Maderas Paraguay, Larsil Florestal, Madeireira WS, Imezza Industrial, VPB Biomassa, CVC Celulose, Manchester Florestal – Grupo Slavieiro, Granosul Brasil e a Duratex.

E das unidades industrial de pellets que implantamos e em funcionamento para o Grupo Bertin Bioenergia, Cosan Biomassa, Pelican Pellets do Grupo Louducca, Caraiba Bioenergy, Gsw Energia, Butá Pellets, Adami Madeiras e os projetos internacionais para Lee Energy Solution USA, Building Energy da Itália e Abellon Clean Energy Índia e Canadá.

Implantou com sucesso empresarial e em pleno funcionamento mais de doze unidades industriais de produção de pellets de madeira e de biopellets da cana-de-açúcar com a produção anual de 550.000 toneladas qualidade Enplus A1 gerando mais de 600 empregos sustentáveis no mercado brasileiro.





Consultoria em Estudo Mercado de Mapeamento Biomassa



A Brasil Biomassa é uma empresa especializada no mapeamento dos tipos de biomassa, com um sistema integrado de mapeamento para o fornecimento de biomassa de origem florestal e do processo industrial da madeira (eucalipto e pinus -bambu), da colheita da agricultura e do beneficiamento agroindustrial (culturas principais de algodão, amendoim, arroz, café, feijão, milho, soja e trigo e do açaí, buriti, cacau, coco verde e da fruticultura -laranja e uva) e do setor sucroenergético (bagaço e palha da cana-de-açúcar e das culturas das gramíneas como o capim elefante e sorgo) por microrregiões.

Objetivos dos estudo de mercado de mapeamento para:

Conceber soluções técnicas para melhor alternativa para o aproveitamento da biomassa da colheita e extração florestal e do processo industrial da madeira e da colheita da agricultura e sucroenergético na microrregião como uma fonte energética para os projetos energéticos.

Identificar e quantificar os resíduos, rejeitos e subprodutos gerados da biomassa da cultura florestal, madeira, agricultura e agroindustrial e sucroenergético na região delimitada.

Identificar os possíveis fornecedores de biomassa florestal e da madeira, agricultura, agroindustrial e sucroenergético com dados da empresa, tipo e origem da matéria-prima (manejo e certificada) e os preços de venda.

Realizar uma avaliação econômica sobre o aproveitamento residual da biomassa na microrregião delimitada até o presente momento, observando também as possíveis tendências de crescimento futuro para atender aos projetos energéticos da empresa.

Abordagem do Trabalho. Para cumprir o trabalho desenvolvemos um relatório analítico do mercado de produção e de disponibilidade da biomassa da colheita e extração da madeira e do processo industrial da madeira e das culturas agrícolas e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar das microrregiões com dados da localização, do quantitativo de biomassa, e uso comercial, do tipo de biomassa.

Abordagem metodológica. Neste item é apresentada a abordagem geral do estudo, a área de abrangência e a metodologia utilizada na realização deste trabalho.

Ressaltamos no estudo sobre o mercado de produção de biomassa de geração por fonte da biomassa da extração florestal e do processo industrial da madeira da silvicultura e extração florestal e e das culturas agrícolas e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar .

Este estudo vai conter um estudo técnico do potencial dos tipos de biomassa florestal/madeira e das culturas agrícolas e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar (contendo os dados da cultura, estimativa de área cultivada, produtividade e produção, geração dos resíduos da cultura, metodologia de cálculo e composição da biomassa e o resultados dos resíduos). Avaliação do potencial de biomassa disponível dentro de um prazo mínimo 10 anos. Cadeia de abastecimento (garantia de fornecimento) dos tipos de biomassa.

Geração por fonte da biomassa florestal e do processo da madeira e das culturas agrícolas e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar e das gramíneas na área delimitada da produção.

Caracterização dos recursos dendroenergéticos da biomassa envolvendo a composição química elementar e imediata, umidade, poder calorífico, composição básica de um combustível, elementos químicos, compostos voláteis, densidade aparente, teor de cinzas, teor de Carbono Fixo e produtividade energética.

Fornecemos informações detalhadas sobre os maiores produtores de biomassa no Brasil. Oferecemos o que existe de melhor em termos de um banco de dados em anuários dos players. Desenvolvemos plataformas de business intelligence poderosa, flexível e abrangente para profissionais do setor comercial e de suprimento de biomassa para uso energético.

O relatório com os players produtores de biomassa da fase da colheita florestal e do processo industrial da madeira e das culturas agrícolas e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar

1. Provedores de matéria-prima florestal e do processo industrial da madeira e das culturas agrícolas e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar para suprir as necessidades atuais e estimadas.
2. Localização dos produtores de biomassa florestal e industrial e das culturas agrícolas e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar (planilha dos produtores de biomassa).
3. Qual a disponibilidade de biomassa com os principais produtores da região durante um período (dez anos) para garantia do fornecimento.
4. Quais os tipos de biomassa de madeira (florestal e processo industrial da madeira e das culturas agrícolas e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar) dentro das microrregiões.
5. Qual a composição físico-química dos tipos de matéria-prima (PCI, densidade).

Planilha do potencial de biomassa por mesorregião e dados finais com os volumes de produção e de disponibilidade contendo: Localização dos principais produtores. Dados dos Players Produtores: Cadastro Geral da Empresa: Empresa, Endereço e telefone.

Utilizamos como referência as bases de dados estatísticos dos principais organismos dedicados à tarefa de quantificação destes parâmetros no Brasil que destacamos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

Do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP. Ainda os dados das publicações Produção Agrícola Municipal – Cereais, Leguminosas e Oleaginosas; Produção Agrícola Municipal – Culturas Temporárias e Permanentes. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura do IBGE e dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, do Ministério da Agricultura. Serviço Florestal Brasileiro. Sebrae. Cenbio. Embrapa. Associação Produtores de Florestas Plantadas, IBÁ. Secretaria estadual de abastecimento e agricultura e ABIB Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável.

O trabalho fornece mapas e informações sobre e potenciais recursos de biomassa. Os recursos de biomassa que estamos avaliando incluem resíduos da colheita e extração florestal da silvicultura e do processo industrial da madeira e sucroenergético (palha e bagaço da cana-de-açúcar).

A coleta de dados será realizada a nível de informações primárias e secundárias, relativas ao mercado regional, caracterização das espécies e macrolocalização.

As informações primárias são obtidas através de contato por telefone ou por videoconferência. As informações secundárias foram provenientes de consulta ao banco de dados dos produtores de biomassa da Brasil Biomassa que envolve mais de 485.000 produtores florestais, setor madeireiro, serraria, movelaria, e 170.243 da agricultura e dos 142.097 produtores do setor sucroenergético.

O trabalho a ser desenvolvido pela Brasil Biomassa para garantir o fornecimento de biomassa para atender as necessidades energéticas como uma fonte segura de fornecimento com dados técnicos de produção e de disponibilidade de biomassa. Além de informações sobre a localização e quantidade de biomassa existente e potencial e disponibilidade, o estudo inclui dados sobre infraestrutura.

A caracterização do mercado estadual de produtos madeiráveis com a cultura florestal envolve as seguintes atividades:

- a. Levantamento de informação primária: O levantamento primário de informações deve ser realizado através de uma coletânea de dados de produção e dos produtores.
- b. Como foco principal a identificação da oferta e da demanda por produtos madeireiros nos municípios da área de abrangência do trabalho.

b. Levantamento de informações secundárias: Com o intuito de complementar as informações obtidas foi realizada uma pesquisa no banco de dados da ABIB Brasil Biomassa e do Instituto Florestal e dados e mapas da Secretaria de Infra-estrutura e Meio Ambiente.

c. Informações do Sistema DOF: Para complementação de informações de mercado, foram ainda repassadas algumas informações do sistema DOF pela SMA, passíveis de divulgação - dados de origem (oferta) e destino (demanda) de diferentes produtos (tora, madeira serrada e outros) em nível estadual.

d. Base de Informações. O recolhimento e processamento de dados é uma das fases mais trabalhosa do projeto de mapeamento pois envolve um grande número de informações sobre a produção e o consumo dos tipos de biomassa.

Um aspecto importante no pré-processamento dos dados consiste na construção da base de dados.

As especificações desta base de informação podem ser consultadas pela empresa para fins de conferência de dados. Os dados de produção são recolhidos de todas as fontes disponíveis como o IBGE e a CONAB. Os dados são avaliados por uma equipe técnica da Brasil Biomassa como uma fonte base de consulta.

Para avaliar os custos relacionados com os tipos de biomassa são contatados diretamente de entidades do setor, sindicatos, associação dos produtores florestais e de mercado obtendo assim um agrupamento de dados que são discriminados em planilha de preços e custos de biomassa.

Ainda temos os custos de produção (enfardamento da biomassa) e os custos de transporte que são fatores de grande influência para avaliar a viabilidade do uso de determinada biomassa.

A pesquisa de mercado inicia-se com um extenso processo de coleta de dados/informações e estatísticas de relatórios anuais de empresas, agências de estatística e bancos de dados.

Essas informações criam a base para o estudo.

As informações também ajudam a definir o escopo e a restringir a área de estudo do mercado. Essas informações são processadas e analisadas para extrair dados precisos que podem afetar o setor durante o período previsto.

Após a análise das informações, uma ferramenta estatística proprietária é utilizada para estimativa e previsão de mercado, gerando os números/tamanhos quantitativos do mercado/subsegmentos no cenário atual, bem como para o período previsto. Após a estimativa dos tamanhos e estimativas de mercado, os números são verificados com participantes do setor e principais formadores de opinião. A ampla rede de participantes do setor agrega valor à pesquisa e verifica os números e estimativas fornecidos no estudo. Na última etapa do processo de pesquisa, é elaborado um relatório final.

A Brasil Biomassa está associada a consultores, parceiros e organizações de diversas categorias, com as quais a equipe de pesquisa trabalha em estreita colaboração para compreender o mercado desde o início.

Aproveitamos essas conexões para coletar insights significativos e entender tendências do setor industrial de produção.

Obtemos dados de fontes secundárias, bem como de bancos de dados, para coletar insights. No entanto, as fontes do estudo podem ser agrupadas em quatro categorias: Associações do Setor, Organizações Regionais, Organizações Específicas do Setor e Empresas Privadas Líderes de Mercado.

O mapeamento consiste no desenvolvimento de uma plataforma de dados de biomassa, informação sobre os recursos energéticos de cada tipo de biomassa. Os mapas são fundamentais para a localização dos resíduos energéticos. Estes mapas estarão automaticamente disponíveis na base de dados para a utilização. A metodologia de resíduos de biomassa é bastante elaborada com capacidade para especificar dados por tipos de biomassa e um quantitativo a ser utilizado para projetos energéticos.

Nossa abordagem considera o elemento humano fundamental para que os objetivos sejam atendidos. Dessa forma, procuramos formar uma equipe com total expertise e domínio das áreas de levantamento técnico e de consumo e na área de biomassa florestal, industrial, agrícola e sucroenergética para a geração de energia térmica.

O projeto é conduzido por profissionais especializados na área florestal/industrial, mercado e gestão de negócios.

A Brasil Biomassa Consultoria Engenharia e Tecnologia orgulha-se da qualidade e validade dos seus dados e análises.

A nossa abordagem exclusiva de referência "nota final" permite ao utilizador rastrear os nossos números de mercado e análises até às fontes de dados específicas de onde foram derivados.

A Brasil Biomassa destaca-se em pesquisas sobre concorrentes, mercado e consumidores numa variedade de setores a nível nacional e global. Utilizamos técnicas avançadas de pesquisa secundária e primária investigativa para encontrar informações críticas para os negócios. Projetos típicos incluem ajudar clientes a encontrar novos clientes, entender concorrentes e analisar mercados.

Centenas de estudo de mercado, viabilidade econômica e mapeamento dos tipos de biomassa já foram implementados pela BRASIL BIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA como referência de mercado para: ABELLON CLEAN ENERGY (USA), ADAMI MADEIRAS (SC), ADECOAGRO AGROINDUSTRIAL (MS), AMAGGI AGROINDUSTRIAL (MT), AMÊNDOS DO BRASIL (CE), BANCO BMG (MG), BAHIA FLORESTAL (BA), BERTIN BIOENERGIA (SP), BIOPELLETS BRASIL (SP), BUILDING ENGENHARIA (IT), BUTIA PELLETS (RS), CARAIBA BIOENERGY (SC), COSAN BIOMASSA – RAIZEN (SP), DURATEX PAINÉIS (SP), EBX EIKE BATISTA (RJ), EUROCORP ENERGIAS (SC), FIBRACOCO (CE), FL FLORESTAL (GO), GERDAU SIDERÚRGICA (MG), GOVERNO ESTADO DO PARÁ (PA), GRANBIO BIOENERGIA (SP), GROW FLORESTAL (PR), GSW ENERGIAS RENOVÁVEIS (MA), HEINEKEN BRASIL (PR), IMERYS CAULIN (PA), LEE ENERGY SOLUTIONS (USA), MAIS ENERGIA (SP), NATURASUL ENGENHARIA (RD),

PELICAN PELLETS (SP), SAINT GOBAIN (BA), SIDERSA MINERAÇÃO (MG) THYSSEN GROUP (BR), UTE ENERGIA (RS), TECNORED/VALE SIDERÚRGICA (BR), VERACEL CELULOSE (BA), VOTORANTIM CIMENTOS (BR). CENIBRA CELULOSE NIPO BRASILEIRA (MG), GRUPO SOUZA INDUSTRIAL (SP), GRUPO LHOIST (MG) e UTE CIDADE DO LIVRO (SP)

FONTE DO BANCO DE DADOS. A Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável (fundada em 2004 é uma organização nacional que reúne mais de 2.458 empresas associadas por todo o Brasil) com apoio técnico da Brasil Biomassa e Energia Renovável/CMO Internacional (fundada em 2000 atuando na área de consultoria, mapeamento, engenharia e tecnologia) Desenvolveram o maior banco de dados em anuários e planilhas inteligentes dos produtores dos tipos de biomassa (florestal/madeira, agricultura/agroindustrial e da cana-de-açúcar) e dos players consumidores (28 setores industriais).

No ano de 2008 iniciamos um cadastramento nacional das empresas produtoras de biomassa de origem florestal e da madeira. Utilizamos um formulário padrão para ter acesso aos dados básicos, societários e de capacidade produtiva e industrial.

No ano de 2010, a Brasil Biomassa foi contratada pela THYSSEN KRUPP para o desenvolvimento do maior mapeamento nacional dos produtores de biomassa do setor de extração florestal da madeira e dos setores industriais de madeireiras, painéis e compensados e de papel e celulose.

A Brasil Biomassa nos últimos quinze anos desenvolveu mais de 140 mapeamentos dos tipos de biomassa para suprimento energéticos (formação do banco de dados dos produtores) para as empresas

ABELLON CLEAN ENERGY (Estudo de Mercado de Exportação de Pellets Estados Unidos)

ADAMI MADEIRAS (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira em Santa Catarina com cadastramento de 12.500 empresas).

ADECOAGRO AGROINDUSTRIAL (MS Estudo de Mercado Nacional e Internacional de Pellets)

AMAGGI AGROINDUSTRIAL (mapeamento para suprimento em caldeira industrial dos produtores de biomassa florestal e da madeira e de 18 culturas da agricultura e da cana-de-açúcar em todos os estados da região CentroOeste com cadastramento de 11.500 empresas) .

AMÊNDAS DO BRASIL (mapeamento dos produtores florestal e da madeira e da agricultura para o desenvolvimento de projetos energéticos nos estados da região CentroOeste com cadastramento de 32.500 empresas)

BAHIA FLORESTAL (mapeamento de biomassa florestal e da madeira na região de feira de Santana na Bahia)

BANCO BMG (mapeamento dos produtores florestal e da madeira em Santa Catarina e de culturas agrícolas no Piauí com cadastramento de 22.500 empresas)

BERTIN BIOENERGIA (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira em São Paulo com cadastramento de 48.500 empresas)

BUTIA PELLETS (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira no Rio Grande do CentroOeste com cadastramento de 11.500 empresas)

CARAIBA BIOENERGY (SC mapeamento de biomassa residual da madeira na região de Seara e Concordia Lins e de implantação da planta de pellets de madeira em Santa Catarina)

CENIBRA CELULOSE NIPO BRASILEIRA (MG Estudo de mercado de biomassa florestal e da madeira em Minas Gerais)

COSAN BIOMASSA – RAIZEN e GRANBIO BIOENERGIA (mapeamento dos produtores de biomassa - cultivo e processamento da cana-de-açúcar em São Paulo com cadastramento de 200 usinas e de 120.000 produtores/cultivo da cana-de-açúcar).

DURATEX PAINÉIS (SP mapeamento de biomassa e e avaliação de resíduos da madeira na região de Botucatu São Paulo e de implantação de planta de pellets de madeira).

GRUPO EBX EIKE BATISTA (mapeamento dos produtores de biomassa - cultivo e processamento da cana-de-açúcar para uso da cana energia/supercana no Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais com cadastramento de 100 usinas e de 10.000 produtores/cultivo da cana-de-açúcar)

EUROCORP ENERGIAS RENOVÁVEIS (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira em Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do CentroOeste com cadastramento de 50.500 empresas).

FIBRACOCO (CE mapeamento de biomassa da agricultura da cultura do coco verde para implantação de uma planta de biogás/biometano e de agropellets no Ceará).

FL FLORESTAL (GO mapeamento da madeira em Goiás)

GERDAU SIDERÚRGICA (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira, de vinte culturas agrícolas e da cana-de-açúcar em Minas Gerais com cadastramento de 28.500 empresas - florestal e de 14.000 - agricultura)

GOVERNO ESTADO DO PARÁ (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira no estado do Pará com cadastramento de 5.500 empresas). GROW FLORESTAL (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira no Paraná com cadastramento de 15.500 empresas).

GROW FLORESTAL (PR desenvolvimento um mapeamento de fornecimento de biomassa florestal e industrial nas cidades de Campo Largo Fazenda Rio Grande e Itaperuçu no Estado do Paraná)

GRUPO LHOIST (MG mapeamento de biomassa e cavaco de madeira e de outros resíduos para projetos de geração de energia em Minas Gerais)

GRUPO SOUZA INDUSTRIAL (SP mapeamento de biomassa florestal e da madeira em Minas Gerais para projetos de geração de energia)

GSW ENERGIAS RENOVÁVEIS (MA mapeamento de biomassa florestal e da madeira no Estado do Maranhão para implantação da maior planta de pellets de madeira no CentroOeste)

HEINEKEN BRASIL (PR mapeamento de biomassa e de cavaco de madeira na região de ponta grossa para abastecimento da caldeira industrial e na geração de crédito de carbono)

IMERYS CAULIN (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira e de vinte culturas agrícolas no Pará com cadastramento de 10.250 empresas)

LEE ENERGY SOLUTIONS (USA Estudo de Mercado Internacional para Exportação de pellets nos Estados Unidos)

MAIS ENERGIA (mapeamento dos produtores de biomassa e detentores de ativos florestais em São Paulo com cadastramento de 48.500 empresas)

NATURASUL ENGENHARIA (RD mapeamento de biomassa em área de supressão florestal para implantação da maior planta de pellets de madeira em Rondônia)

PELICAN PELLETS (SP mapeamento de biomassa florestal e da madeira de eucalipto no vale do paraíba para a implantação da maior planta de pellets de madeira de eucalipto em São Paulo)

SAINT GOBAIN (mapeamento dos produtores de biomassa da florestal e da madeira e da agricultura na Bahia com cadastramento de 15.200 empresas)

SIDERSA MINERAÇÃO (MG mapeamento dos consumidores de cavaco de madeira e o estudo de viabilidade em MG BA DF GO para venda direta da produção industrial da empresa)

THYSSEN GROUP (BR mapeamento nacional de potencialidade de biomassa para a comercialização de equipamentos de torrefação de biomassa)

TECNORED/VALE SIDERÚRGICA (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira, da agricultura e da cana-de-açúcar nos estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Mato Grosso, Mato Grosso do CentroOeste, Goiás e Tocantins com cadastramento de 98.500 empresas)

UTE NOVA ENERGIA (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira no Mato Grosso com cadastramento de 4.500 empresas)

UTE CIDADE DO LIVRO (SP mapeamento de fornecimento de biomassa de 28 culturas agrícolas nos Estados de São Paulo e Mato Grosso do CentroOeste para abastecimento da UTE para geração de energia em São Paulo)

UTE ENERGIA (RS mapeamento de biomassa e cavaco de madeira no Rio Grande do CentroOeste para abastecimento da UTE para co-geração de energia)

UTE MATO GROSSO (desenvolvimento de estudos de viabilidade e de mapeamento de fornecimento de biomassa e da melhor tecnologia para energia térmica da empresa e a geração de crédito de carbono no Mato Grosso)

VERACEL CELULOSE (mapeamento dos produtores de biomassa florestal e da madeira agricultura e da cana-de-açúcar na Bahia com cadastramento de 22.500 empresas).

VOTORANTIM CIMENTOS (BR mapeamento dos tipos de biomassa e estudo de viabilidade para fornecimento de biomassa nos estados sede das plantas cimenteiras e crédito de carbono para uso em fornos de co-processamento).

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS EMPRESAS PRODUTORAS E CONSUMIDORAS DOS TIPOS DE BIOMASSA DE ORIGEM SUSTENTÁVEL (FLORESTAL, MADEIRA, AGRICULTURA, AGROINDUSTRIAL E DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA SUPRIMENTO, TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO INDUSTRIAL COMPORTANDO 925.033 EMPRESAS EDIÇÃO ATUALIZADA 2026 BRASIL REGIÕES E POR ESTADOS

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS EMPRESAS SETOR FLORESTAL (FLORESTA PLANTADA EUCALIPTO PINUS ACÁCIA TECA E OUTROS TIPOS) COMPORTANDO 32.305 EMPRESAS EDIÇÃO ATUALIZADA 2026 BRASIL REGIÕES E POR ESTADOS

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS EMPRESAS DO SETOR INDUSTRIAL DA MADEIRA (INDÚSTRIAS MADEIREIRAS, SERRARIAS COM/SEM DESDOBRAMENTO DE MADEIRA EM BRUTO, DA INDÚSTRIA DE LAMINAÇÃO, MÓVEIS, COMPENSADOS, PAINEIS DE MADEIRA, EMBALAGEM E PALLETS E DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE) COMPORTANDO 237.655 EMPRESAS EDIÇÃO ATUALIZADA 2026 BRASIL REGIÕES E POR ESTADOS.

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS MAIORES EMPRESAS (FLORESTAL E DA MADEIRA) DOS PRODUTORES BIOMASSA CAVACO E SERRAGEM MADEIRA COMPORTANDO 44.788 EMPRESAS EDIÇÃO ATUALIZADA 2026 BRASIL REGIÕES ESTADOS

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS EMPRESAS (EXTRAÇÃO FLORESTAL E DO PROCESSO INDUSTRIAL DA MADEIRA) DOS PRODUTORES BIOMASSA CAVACO E SERRAGEM MARAVALHA DE MADEIRA COMPORTANDO 181.590 EMPRESAS EDIÇÃO ATUALIZADA 2026 BRASIL REGIÕES ESTADOS COM PROJEÇÕES DO MERCADO DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA NO BRASIL PARA PROJETOS ENERGÉTICOS, SUPRIMENTO COMRCIAL, PLANTAS UTE E CO-GERAÇÃO ENERGIA, CALDEIRA INDUSTRIAL E MUDANÇA MATRIZ ENERGÉTICA, DESCARBONIZAÇÃO INDUSTRIAL, COMÉRCIO DE PRODUTOS E EQUIPAMENTOS, PROJETOS DE BIOCHAR, BIOCARBONO, BIOGÁS, BIOMETANO, CO2 BIOGÊNICO, HIDROGÊNIO VERDE, BRIQUETE E DE PELLETS.

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS MAIORES EMPRESAS DE PRODUÇÃO DE BIOCHAR/CARVAO VEGETAL, BRIQUETE E PELLETS COMPORTANDO 3.711 EMPRESAS EDIÇÃO ATUALIZADA 2026 BRASIL REGIÕES ESTADOS

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS EMPRESAS DO SETOR AGRICULTURA E DO BENEFICIAMENTO AGROINDUSTRIAL (CULTIVO E DO PROCESSAMENTO DO MILHO, SOJA, CAFÉ, LARANJA, MANDIOCA, AMENDOIM, UVA, FEIJÃO, ARROZ, CEVADA, ALGODÃO, COCO VERDE, AÇAÍ, CACAU, TRIGO, CASTANHA DE CAJU E DO DENDÊ) COMPORTANDO 170.373 EMPRESAS EDIÇÃO ATUALIZADA 2026 BRASIL REGIÕES ESTADOS

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS EMPRESAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO (CULTIVO E PROCESSAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR) COMPORTANDO 142.097 EMPRESAS EDIÇÃO ATUALIZADA 2026 BRASIL REGIÕES ESTADOS

BANCO DE DADOS EM ANUÁRIOS DAS EMPRESAS CONSUMIDORAS DE BIOMASSA (FORNOS E CALDEIRA INDUSTRIAL) DO SETOR INDUSTRIAL (ALUMÍNIO, AVICULTURA, CERÂMICAS, CERVEJARIA, CIMENTOS, CO-GERAÇÃO DE ENERGIA, COOPERATIVAS DE GRÃOS, COUROS E CALÇADOS, SIDERÚRGICA, FERRO E AÇO, FERTILIZANTES E AMÔNIA VERDE, FRIGORÍFICOS, QUÍMICAS, EXTRATIVAS, FARMACÊUTICAS, MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, LATICÍNIOS, PAPEL E CELULOSE, PAPEL RECICLADO, PETROQUÍMICOS, TERMOELÉTRICA, UTE ENERGIA, TEXTIL E VIDRO) E CAVACO DE MADEIRA CARVÃO VEGETAL BRIQUETE E PELLETS PARA MERCADO INDUSTRIAL CONSUMIDOR DE BIOMASSA PARA SUPRIMENTO ENERGÉTICO, E DESCARBONIZAÇÃO E INDUSTRIAL. EMPRESAS QUE NECESSITAM DE BIOMASSA EM LEILÕES DE ENERGIA UTE ENERGIA – SUPRIMENTO ESTRATÉGICO E CO-GERAÇÃO DE ENERGIA. GESTÃO DE NEGÓCIOS. ABASTECIMENTO DE SUPRIMENTO PARA USO EM CALDEIRA INDUSTRIAL. COMPORTAM 112.514 MAIORES EMPRESAS DIVIDIDO NACIONAL, REGIONAL E ESTADUAL