

BIOGÁS DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: PANORAMA E PERSPECTIVAS

Artur Yabe Milanez

Diego Duque Guimarães

Guilherme Batista da Silva Maia

Jose Antonio Pereira de Souza

*Mario Luiz Freitas Lemos**

Palavras-chave: Biogás. Energia renovável. Mudança climática. Política energética. RenovaBio.

* Respectivamente, gerente setorial e economistas do Departamento do Complexo Agroalimentar e de Biocombustíveis da Área de Indústria e Serviços do BNDES.

BIOGAS FROM AGROINDUSTRIAL WASTES: PANORAMA AND PERSPECTIVES

Artur Yabe Milanez

Diego Duque Guimarães

Guilherme Batista da Silva Maia

Jose Antonio Pereira de Souza

*Mario Luiz Freitas Lemos**

Keywords: Biogas. Renewable energy. Climate change. Energy policy. RenovaBio.

* Respectively, sector manager and economists of the Biofuels and AgroFood Complex Department of the Industry and Services Division of BNDES.

Resumo

A produção de biogás é importante tanto para aproveitamento de resíduos agroindustriais quanto para a substituição dos combustíveis fósseis. Este artigo procura ilustrar a evolução do biogás como uma das alternativas tecnológicas mais viáveis nos campos de combate à mudança climática e adoção de energias renováveis. Analisando os custos e aplicações do biogás, procura entender suas implicações para o meio ambiente e traçar as linhas principais dos mercados mundiais. Explora-se também o estado da tecnologia e dos mercados no Brasil, detalhando suas fontes e perspectivas, concluindo com uma descrição do apoio do BNDES, do potencial a ser explorado. Por fim, aborda algumas propostas de política recentes.

Abstract

Biogas production is important both for the use of agroindustrial waste and for the replacement of fossil fuels. The article seeks to illustrate the evolution of biogas, presently one of the most viable technological alternatives to fight climate change and adopt renewable energy. It analyses the costs and applications of biogas, seeking to understand its implications for the environment, and to outline the main characteristics of world markets. It also explores the present state of technology and markets in Brazil, detailing its sources and perspectives, concluding with a description of BNDES support, the potential to be explored, and finally, addressing some recent policy proposals.

Introdução

O grande desafio global de combate à mudança climática está levando à adoção crescente de fontes de energia renovável. Além dos problemas ambientais, o domínio dos combustíveis fósseis enfrenta, cada vez mais, obstáculos como a volatilidade de preços e a tendência de médio e longo prazos de diminuição na oferta. Nesse contexto, o biogás surge como uma das alternativas mais sustentáveis, apresentando tecnologia em estágio avançado de escalonamento industrial. No entanto, ele ainda se encontra nas fases iniciais de um crescimento que pode vir a ser exponencial.

De fato, o biogás demonstra excepcionais condições para reduzir tanto o metano orgânico quanto o CO₂ lançado na atmosfera. Sua produção engloba processos circunscritos, controlados e otimizados, de forma comercialmente viável, gerando um biocombustível que pode ser utilizado tanto na geração de eletricidade quanto em veículos, em substituição ao diesel. Durante a queima do biogás, o metano é transformado em CO₂ e água, reduzindo o impacto climático negativo e tornando, com isso, lucrativa a atividade de processar resíduos. Adicionalmente, com algum processamento, ele pode ser utilizado como alternativa para o gás natural em todas as suas aplicações.

Os resíduos agroindustriais são responsáveis por três quartos do potencial de matérias-primas a serem exploradas para a produção do biogás. Um potencial tão extenso leva a uma consideração mais ponderada dos principais problemas no horizonte de desenvolvimento. Diversas questões se colocam atualmente para o avanço do setor, a exemplo do custo das tecnologias aplicadas e da melhor utilização de subsídios e incentivos para alavancar o mercado. Recentemente, a produção de biogás avançou

em diversas frentes: na melhoria dos processos de tratamento de resíduos sólidos e esgotos, no desenvolvimento de processos para digestão anaeróbica, na produção de calor e energia, na purificação do produto para compatibilizá-lo com as utilizações existentes de gás natural e na extração de químicos. Resta, contudo, a questão de como melhor explorar e expandir um mercado que se apresenta tão promissor.

Este artigo pretende explorar as condições atuais e as perspectivas futuras para a produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais. Está estruturado em seis seções, além desta introdução, da seguinte forma: a segunda seção discorre sobre a produção e as aplicações do biogás, incluindo energia térmica, elétrica, gás veicular e fertilizantes. A terceira analisa a relação entre o uso do biogás e o meio ambiente. A quarta seção, por sua vez, apresenta o panorama sobre o mercado de biogás no mundo, em especial na Europa e nos Estados Unidos da América (EUA). A quinta examina o mercado de biogás no Brasil, apresentando as principais fontes e suas potencialidades. A sexta seção trata do apoio do BNDES, do potencial do biogás e das propostas de política. Na última seção, encontra-se a conclusão.

Produção e aplicações do biogás

A tendência de longo prazo da produção de energia convencional apresenta um quadro de esgotamento progressivo de fontes tradicionais (por exemplo, hidroeletricidade, carvão, petróleo) e emergência de novas fontes, com destaque para as renováveis. Combinado aos custos crescentes para produção da energia convencional, e com impactos socioambientais relevantes de grandes projetos, o aproveitamento da biomassa, com destaque para o biogás, surge como fonte privilegiada.

A produção de biogás faz parte do ciclo global do carbono. Anualmente, a biodegradação natural de matéria orgânica em condições anaeróbicas libera entre 590 milhões e oitocentos milhões de toneladas de metano na atmosfera. Os sistemas de recuperação de biogás exploram esses processos bioquímicos para decompor vários tipos de biomassa, aproveitando o biogás liberado como fonte de energia. A atividade de pelo menos três comunidades bacterianas é necessária nas cadeias bioquímicas que liberam metano. Em primeiro lugar, durante a hidrólise, enzimas extracelulares degradam carboidratos complexos, lipídios e proteínas nas suas unidades constitutivas. A seguir, ocorre a fermentação, em que os produtos da hidrólise são convertidos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Bactérias mediando tais reações exaurem o oxigênio residual no digestor, proporcionando condições adequadas para o processo final (metanogênese), no qual bactérias anaeróbicas controlam a produção de metano dos produtos da acidogênese. Os digestores anaeróbicos são desenvolvidos para operar em zonas de temperatura mesofílica (20 °C-40 °C) ou termofílica (acima de 40 °C) (BOND; TEMPLETON, 2011).

O biogás, especificamente, pelo fato de poder ser gerado de forma contínua, difere da energia eólica ou solar. É possível estocá-lo a custos baixos, seja na forma de matéria-prima, seja como gás comprimido. Além disso, devido à sua estabilidade, o biogás pode atuar como mecanismo regulador da intermitência das fontes eólica e fotovoltaica. Destaca-se que o biogás tem “pegada negativa de carbono”, pois não somente é de baixa emissão como também mitiga a poluição que seria causada, em caso de não aproveitamento, pelos próprios resíduos que constituem suas fontes de matéria-prima. Assim, o metano que iria para a natureza, poluindo o solo e a atmosfera, se transforma em fonte de energia. Finalmente, a produção do biogás, quando derivado de atividades agropecuárias, é também fator de segurança energética por diminuir as dificuldades

de atendimento da demanda por energia elétrica em áreas distantes do meio rural. Cálculos referentes a custos, incluindo os relacionados a impostos e perdas com transmissão e distribuição, indicam que o biogás gerado na produção agropecuária de forma descentralizada, a partir de biodigestores, pode se tornar (dependendo de alguns outros parâmetros)¹ menos custoso do que a energia adquirida pelo usuário do campo na rede pública.

Produção

O principal método de produção do biogás é a quebra biológica de material orgânico na ausência de oxigênio, conhecida como digestão anaeróbica. Em plantas industriais, os micro-organismos digerem a matéria-prima em um reator controlado, produzindo biogás com 50% a 70% de metano. A partir daí, o biogás pode ser melhorado por vários métodos (absorção, adsorção, filtração por membrana, separação criogênica), resultando em uma elevação da percentagem de metano e aproximando o biogás ao gás natural fóssil, o que permite seu uso intercambiável. Uma rota alternativa é a termoquímica, na qual a gaseificação ocorre a altas temperaturas, com calor e oxigênio sendo adicionados. Essa rota, contudo, ainda se encontra na fase de pesquisa e desenvolvimento (OIES, 2017). O processo de fabricação do biogás é exemplificado na Figura 1.

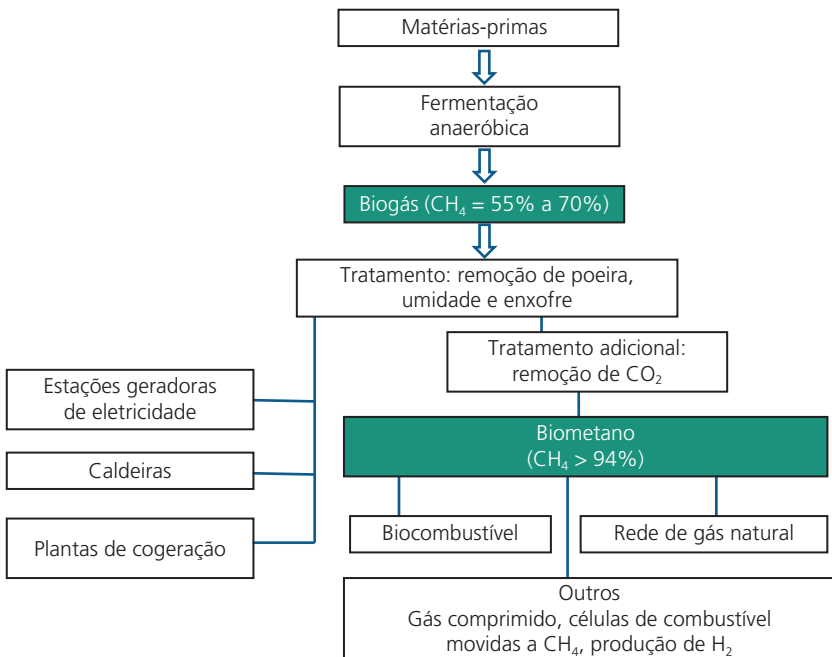
O potencial de crescimento do biogás depende da quantidade de matéria-prima que pode ser processada. O biogás bruto normalmente costumava ser queimado no local de produção para produzir eletricidade e gerar calor, sendo que a eletricidade tanto poderia ser consumida localmente como exportada para a rede. A purificação do biogás até que se atinja 96,5% do CH₄ – ponto a partir do qual ele pode ser chamado

1 Dentre esses parâmetros, destaca-se a escala de produção.

de biometano – oferece melhores opções de utilização, como a injeção na rede de gás natural ou a compressão.

Além da redução na geração de gases de efeito estufa, o biogás oferece vários benefícios adicionais, como o auxílio na redução da emissão de particulados, no fornecimento de energia renovável não intermitente, na criação de geração elétrica descentralizada regional e na diminuição dos efeitos danosos da atividade agropecuária. Tudo isso inclui a geração de renda, além da produção residual de biofertilizantes.²

Figura 1 | Processo de fabricação do biogás



Fonte: Adaptado de RABONI, M.; URBINI, G. Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. Revista Ambiente & Água, v. 9, n. 2, 2014

2 Sobre o assunto, consultar Cruz, Pereira e Figueiredo (2017).

Custos de produção

Para a obtenção do biogás puro, o principal parâmetro a ser observado na produção é o custo a ser pago pela eletricidade. A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2017) estimou o custo normalizado da eletricidade (*levelised cost of electricity* – LCOE) para o biogás entre US\$ 6/kWh e US\$ 14/kWh (OIES, 2017).³ O principal determinante é relativo ao custo da matéria-prima; caso seja barata e abundante, como os resíduos industriais do agronegócio e/ou dejetos, os custos diminuem; se são utilizadas plantações dedicadas, o custo aumenta. Em relação ao biometano, deve ser adicionado o custo adicional de processamento, comparado ao custo do gás natural.

Trabalho recente (OIES, 2017) mostra que o biometano seria competitivo na Europa apenas nos limites inferiores da curva de custos, ressaltando a importância de subsídios governamentais à medida que os custos de produção aumentam. Tais custos dependem principalmente do tipo de cultura e dos custos associados ao transporte. Além disso, reduções relevantes de custos em razão do aumento de escala e adequação de tecnologia podem tornar mais factível a produção (OIES, 2017).

No Brasil, claramente existe uma vantagem competitiva relacionada ao custo inferior das culturas e dos resíduos agroindustriais, quando comparado aos países europeus. Tal vantagem abre possibilidades para aumentar a escala da exploração industrial do biogás no país, especialmente com relação aos resíduos agroindustriais, como discutido mais à frente.

³ Em sua estimativa inferior, esse custo é compatível com estimativas de *benchmark* para energia eólica *onshore*; na superior, supera por pouco o *benchmark* de energia eólica *offshore*.

Aplicações

As principais aplicações comerciais do biogás são a energia elétrica, por meio da sua queima em motogeradores, a fabricação de biometano, após a retirada do CO₂ e contaminantes, para a substituição do gás natural, especialmente o veicular, e, por fim, a utilização dos resíduos como fertilizantes. Para uso próprio, especialmente nas pequenas e médias propriedades rurais, a principal utilização do biogás atualmente é a sua queima para a produção de energia térmica. Mais detalhes encontram-se adiante.

Energia térmica

Oriunda de fonte predominantemente agropecuária, a energia térmica derivada do biogás é obtida por meio da sua queima e pode ser utilizada em caldeiras e aquecedores. Seu potencial de uso industrial é amplo em processos que exigem calor, enquanto seu uso doméstico permite substituir o gás de cozinha e os sistemas de aquecimento de água. Por sua dispersão geográfica e seu caráter predominantemente artesanal, inexistem dados a respeito da capacidade dos países sobre a energia térmica proveniente do biogás, o que não diminui sua importância quanto ao potencial de redução da poluição e geração de energia descentralizada, particularmente em empreendimentos de baixa escala.

Energia elétrica

A energia elétrica derivada do biogás é obtida quando ele é utilizado para acionar motogeradores. No Brasil, em relação à oferta total de energia elétrica (620 TWh), a participação do biogás chegou a 0,08% (0,5 TWh) em 2016, o que correspondeu a 1% de toda a energia gerada a partir de biomassa (50 TWh, ou 8% do total da oferta de energia elétrica). Por sua

vez, em potência instalada, o biogás contribuiu com 119 MW em 2016, contra 20 MW em 2007, com crescimento médio de 66% a.a. (EPE, 2017).

Está previsto para 2021 o início da primeira planta de biogás participante do mercado regulado de energia elétrica. O projeto baseado em biogás, localizado em São Paulo, foi vencedor do leilão A-5/2016,⁴ de abril de 2016, com a contratação de 20,9 MW de energia, no preço-teto de R\$ 251/MW (preço efetivo de R\$ 251) e previsão de início em abril de 2021.⁵ O projeto contemplado no leilão foi da Usina Bonfim, do Grupo Raízen, localizada em Guariba (SP), que irá utilizar vinhaça e torta de filtro como substratos. O principal benefício da habilitação de um projeto em um leilão é o fato de o correspondente contrato de fornecimento (de 25 anos) poder ser utilizado como garantia de financiamento do investimento.

Substituição do gás natural veicular (biometano)

A purificação do biogás o torna um substituto perfeito do gás natural em todas as suas aplicações, abrindo-se aí um grande potencial de utilização. O principal espaço de mercado do biometano estaria na sua interiorização, ou seja, no atendimento às regiões não abrangidas pela pequena rede de distribuição de gás natural do país, viabilizada pela sua capacidade de geração descentralizada,⁶ pois, nas regiões atendidas por gasodutos, o biometano não apresenta atualmente custos competitivos em relação ao gás natural. Nesse caso, o biometano substituiria o diesel,

⁴ A-5 significa que o projeto tem um prazo de cinco anos para entrar em operação.

⁵ Foram 14 projetos de biogás cadastrados nos últimos leilões promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (desde A3/2013), sendo que apenas um projeto, localizado em São Paulo, foi habilitado tecnicamente, tendo vencido o referido leilão (A-5/2016).

⁶ A qualidade do biometano (de origem em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto) é regulamentada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por meio da Resolução ANP 8, de janeiro de 2015. Em julho de 2017, ocorreu a regulamentação do biometano como combustível veicular oriundo de fontes agrossilvopastoris.

particularmente em máquinas agrícolas e veículos urbanos ou rodoviários que circulam nas regiões não atendidas pela rede de gasodutos. Vale destacar que a demanda por diesel em 2016 no setor agropecuário foi de 57 bilhões de litros. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estima que, até 2026, o biometano possa substituir metade desse mercado (EPE, 2017).

Um exemplo das opções de utilização do biogás é a indústria sucroalcooleira – em tratores, colheitadeiras e no transporte de cana-de-açúcar. Somente no estado de São Paulo, há 66 usinas sucroalcooleiras localizadas em até 20 km de gasodutos, somando um potencial teórico de produção de biometano de 3 milhões Nm^3/dia , equivalente a 20% do consumo do estado em 2016 (EPE, 2017). Nesse caso, haveria a necessidade de adaptação dos motores a diesel, pois eles não podem receber diretamente o biometano (assim como também não poderiam receber o gás natural veicular – GNV).⁷

Fertilizantes

O biofertilizante consiste no resíduo não orgânico gerado no processo de biodigestão. Ele pode ser diluído em água para ser usado diretamente nas lavouras (fertirrigação) ou passar por processos de secagem/compostagem para ser guardado ou vendido na forma sólida.

No ano de 2015, foram vendidos no mercado brasileiro 30,2 milhões de toneladas de fertilizantes, dos quais 21,1 milhões de toneladas (70% do total) foram importados (ANDA, 2016). No período de 2010 a 2015, o crescimento da demanda foi, em média, de 4,3% a.a. O faturamento líquido do setor de fertilizantes foi de cerca de US\$ 14,4 bilhões em 2016 (ABIQUIM, 2017).

⁷ Vale lembrar que, em 2016, as importações de óleo diesel equivaliam a 15% do total vendido do produto (EPE, 2017).

Em relação ao consumo dos componentes mais importantes para a nutrição das plantas individualmente considerados, em 2015, o Brasil utilizou cerca de 5,4 milhões de toneladas de potássio, 4,7 milhões de fósforo e 3,6 milhões de toneladas de nitrogênio (IPNI, 2015).

Estudo realizado pelo Departamento de Indústria Química do BNDES estimou o mercado potencial, selecionado apenas para os segmentos de cana-de-açúcar, suínos e aves, já que o setor de bovinos ainda apresenta desafios para o recolhimento dos resíduos. Os resíduos presentes e o potencial de melhoria de absorção propiciada pelos fertilizantes organominerais (ou seja, aqueles que combinam fertilizantes minerais com matéria orgânica) geram potencial de disponibilidade de macronutrientes equivalente a 14% do consumo nacional anual. Convertendo essa quantidade de nutrientes para fertilizantes comerciais, estima-se um potencial de mercado de US\$ 1,1 bilhão anuais (BNDES, 2017).

Biogás e meio ambiente

No fim de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) em Paris, mais de 190 países se reuniram para formalizar um acordo sobre o clima com vistas à redução das emissões de gases efeito estufa (GEE). Cada nação, de acordo com suas possibilidades, apresentou seus compromissos com as metas de redução de emissões, conhecidas como Intended Nationally Determined Contribution (INDC).

Naquela ocasião, o Brasil, tomando como base o volume de emissões de gases de 2005, comprometeu-se a reduzi-las em 37% até 2025, elevando seus esforços até atingir a meta de uma redução de 43% em 2030.

A partir de uma projeção de crescimento da atividade econômica até 2030, o Brasil apresentou os seguintes compromissos para viabilizar o atingimento das metas globais de reduções nas datas referidas (EPE, 2016):

- Elevar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética em cerca de 18% até 2030, por meio da expansão de biocombustíveis.
- Aumentar a participação de energias renováveis na matriz para 45%.
- Obter ao menos 66% de participação da fonte hídrica na geração de eletricidade.
- Aumentar o uso de fontes renováveis, distintas da hídrica, na matriz total de energia de forma a atingir uma participação de 28% a 33% do total.
- Expandir o uso de energias renováveis, diferentes da hídrica, em especial a solar, a eólica e a biomassa, para uma participação de aproximadamente 23% no fornecimento de energia elétrica.
- Elevar a eficiência no setor elétrico em 10%.

No Brasil, a produção de energia é responsável por apenas 37% das emissões de CO₂ equivalente, cerca de metade do percentual dos países desenvolvidos. Já a atividade agropecuária brasileira é responsável por outros 37%. Tal fato decorre da elevada participação das fontes hídricas e derivados da cana-de-açúcar, respectivamente 11,5% e 15,7%, na matriz energética brasileira. Dessa forma, o desafio do Brasil é elevar a alta proporção de fontes renováveis para fazer frente à maior demanda que ocorrerá com o crescimento econômico (EPE, 2016).

A ampliação do uso de fontes renováveis requer não somente a intensificação do uso das fontes já tradicionais em nossa matriz energética, tal como aproveitar as potencialidades de geração hídrica, em especial

as pequenas centrais hidrelétricas (PCH), e ampliar o uso de etanol de cana-de-açúcar nos motores à combustão, mas também, como já visto, expandir a utilização de outras fontes de energia renovável, como a eólica, a solar, o etanol de segunda geração e as biomassas, aí incluído o biogás.

O uso de combustíveis renováveis ganhou enorme impulso a partir da elaboração do RenovaBio, programa sob responsabilidade do Ministério de Minas e Energia (MME), que tem em seu núcleo operacional a participação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e da EPE. Tais instituições buscam catalisar conjuntamente as diversas posições dos agentes públicos e privados quanto ao tema dos combustíveis renováveis.⁸

O programa tem o objetivo de expandir a produção sustentável, sócio e ambientalmente, de biocombustíveis no Brasil. Ele pressupõe que o aumento da produção está vinculado às premissas de um mercado competitivo com empresas em equilíbrio econômico e financeiro. Dessa forma, o programa busca estruturar-se com base em regras de comercialização que, ao mesmo tempo, estimulem os biocombustíveis e impeçam possíveis gargalos de abastecimento que possam ocasionar insegurança energética.

O RenovaBio planeja estimular a concorrência entre os próprios biocombustíveis (inclusive o desenvolvimento dos novos, como o biometano e o bioquerosene), buscando ampliar a eficiência produtiva e garantir aos consumidores preço, qualidade e oferta dos produtos. Ao estabelecer regras claras e estáveis, o programa pretende desenvolver um ambiente regulatório compatível com a necessidade de planejamento de longo prazo e viabilização de inversões privadas. Os principais aspectos do programa estão descritos nos próximos parágrafos.

8 O Anexo 4 apresenta o fluxograma explicativo do funcionamento do RenovaBio.

Com o RenovaBio, portanto, busca-se criar instrumentos para precificar a relação da eficiência energética e emissões de gases, valorizando a produção sustentável. A instauração de uma política tributária para combustíveis que reconheça as externalidades positivas dos biocombustíveis, a formulação de instrumentos financeiros que tornem atraivos os investimentos na produção e a criação de novas regras para comercialização e manutenção de estoques são parte integrante do planejamento energético.

O Comitê de Monitoramento de Biocombustíveis e Combustíveis (CMBC) será responsável por propor metas anuais de redução de emissões de GEE compatíveis com o INDC brasileiro. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) estabelecerá as metas compulsórias para a redução dos gases na comercialização dos combustíveis.

O RenovaBio busca compatibilizar o acompanhamento das metas nacionais de redução de emissões para a matriz energética brasileira com a expansão da produção de biocombustíveis. Para isso, almeja-se a criação do Crédito de Descarbonização (CBio), que se tornará um ativo financeiro, negociável em bolsa, emitido pelo produtor de biocombustíveis no momento da comercialização. Os distribuidores terão que cumprir as metas estabelecidas pela propriedade de CBios em sua carteira.

Para viabilizar a implementação do RenovaBio, é necessário parame-trizar os cálculos de emissões para a criação dos CBios. Para tanto, foi construída uma ferramenta de cálculo, a RenovaCalc, que consiste em uma plataforma na qual as empresas devem detalhar os aspectos de sua produção que resultam em emissões de carbono. O total de emissões será comparado ao combustível fóssil equivalente, resultando em uma nota final que representará a redução nas emissões.

Os principais indicadores presentes no cálculo dos CBios são: consumo de calcário, consumo de nitrogênio, consumo e rendimento dos combustíveis, recolhimento de resíduos agrícolas, área com queima, rendimento industrial de energia excedente (coproduto), consumo de energia da rede e consumo de hidrogênio. Dessa forma, o RenovaCalc considera os insumos e a energia consumida no processo produtivo durante o ciclo de vida do produto. Quanto maior for a eficiência no processo, maior será a nota, funcionando como um incentivo à produtividade.

Um exemplo ajuda a esclarecer o procedimento. Como o valor-padrão adotado para a gasolina é de $86,4 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$, uma usina de álcool que emita $26,4 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ em seu processo produtivo terá uma nota de mitigação de 60, valor que condicionará o fator que resulta na emissão de CBios e, conseqüentemente, determina a receita adicional da usina com a venda desses títulos. Assim, a eficiência produtiva é incentivada não somente por seu potencial redutor de custos, mas também pela geração de receita adicional.

O biogás tem um papel importante a desempenhar nessa nova matriz energética sustentável. Com a utilização de efluentes em biodigestores, há uma drástica redução do carbono presente na biomassa, pois no processo de digestão a matéria orgânica perde exclusivamente carbono na forma de metano e gás carbônico. Como já reconhecido, apesar de, atualmente, representar uma parcela muito pequena da produção de energia, o biogás tem um enorme potencial no Brasil. Segundo a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (Abiogás), o potencial teórico total de geração brasileiro é de cerca 80 milhões de m^3/dia , equivalente a 24% da demanda de energia elétrica ou 44% da demanda de óleo diesel. O maior potencial de geração está no setor sucroenergético, responsável por cerca de 70% desse total (ABILOGÁS, 2017).

A EPE estimou as possibilidades para substituição do diesel no setor agropecuário a partir do biogás. Considerando o biogás com 55% em volume de biometano, com equivalência energética de 1l de diesel igual a 1 m³ de biometano, em 2026, haveria a produção de 8,4 bilhões Nm³ de biogás, o equivalente a 4,6 bilhões Nm³ de biometano, ou seja 4,6 bilhões de litros de óleo diesel. Esse valor seria suficiente para suprir metade da demanda de diesel estimada para aquele ano, reduzindo as emissões do setor em volume equivalente (EPE, 2017).

O Governo Federal conta com um plano de apoio à agricultura de baixo carbono, o Plano ABC, oficialmente denominado Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. O projeto constitui um dos planos setoriais estabelecidos em conformidade com a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei Federal 12.187/2009) como parte da estratégia do Estado brasileiro na mitigação da emissão de GEE e no combate ao aquecimento global, com vigência de 2010 a 2020.

Segundo a Abiogás, a pegada de carbono do biometano é uma das menores entre os combustíveis disponíveis. Uma comparação com o ciclo de vida de vários combustíveis estima que o diesel emita quase 90 gCO_{2eq}/MJ; o gás natural, cerca de 80 gCO_{2eq}/MJ; e o biometano, -20 gCO_{2eq}/MJ, ou seja, uma pegada de carbono negativa. Esse cálculo considera que, além da redução de emissões na queima do combustível propriamente dita, também devem ser computados os efeitos da substituição de diesel no processo produtivo (ABILOGÁS, 2017).

Avaliada pela metodologia da RenovaCalc, a produção de biometano também se mostra extremamente vantajosa, pois gera uma nota muito baixa em seu processo produtivo (a nota varia ligeiramente com o resíduo utilizado em sua produção). Na produção realizada a partir de vinhaça e resíduos de suínos – matérias-primas cuja produção pressupõe

a isenção de carga ambiental –, há basicamente emissão de carbono na queima do biogás na cogeração de energia, o que leva a valores próximos a $0,3 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$. Esse valor seria comparado, por exemplo, à queima de diesel com valor-padrão estimado de $87,4 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$, resultando em uma elevada nota para emissão dos CBios.

Os ganhos ambientais, no entanto, não se restringem às emissões de carbono, sendo significativamente maiores quando considerados outros aspectos no manejo de resíduos do processo produtivo. A existência de efluentes, como o vinhoto na produção de álcool ou resíduos sólidos decorrentes da produção de suínos, tem efeitos deletérios sobre o meio ambiente. A contaminação do solo, dos lençóis freáticos e dos rios representa uma ameaça à manutenção de recursos naturais essenciais à sobrevivência humana e à fauna e flora locais.

Tomando como exemplo a suinocultura, Pereira *et al.* (2009) elencam os impactos ambientais negativos, além da emissão de carbono:

- Acúmulo de poluentes orgânicos no solo, favorecendo a proliferação de insetos hematófagos, com efeitos sobre a saúde da população local.
- Decomposição de dejetos no solo, produzindo nitratos e fosfatos que contaminam a água, produzem o crescimento exagerado de algas (eutrofização) e elevam a demanda bioquímica de oxigênio.
- Contaminação das áreas adjacentes à produção, bem como os corpos hídricos.

No caso do vinhoto resultante da produção de álcool, há um potencial altamente poluente, pois o resíduo pode afetar não somente os cursos de água superficiais, mas também os lençóis freáticos, por meio da percolação (passagem do líquido pelo solo até os aquíferos). O confinamento do vinhoto em barragens leva à rápida decomposição microbiana da

matéria orgânica com produção de gases com odores desagradáveis. Uma solução parcial do problema muito difundida é a utilização de canais ou caminhões-tanque para transporte desse resíduo até determinados pontos em que seja aspergido nos canais como fertilizante (MARQUES, 2013).

A utilização dos efluentes nos biodigestores para produção de energia reduz o potencial poluente e os riscos sanitários decorrentes do processo produtivo, e, dado que a biodigestão não remove os nutrientes encontrados nos efluentes, ela não prejudica a utilização dos resíduos como fertilizantes na agricultura.

A solução da biodigestão atua, portanto, sobre vários problemas simultaneamente, como na geração de energia, tão mais vantajosa quanto melhor for a geração distribuída. Seus efeitos são benéficos para a gestão dos efluentes do processo produtivo agropecuário, mitigando a poluição ambiental e seus impactos, substanciais na redução de GEE, em especial com o apoio de programas como o RenovaBio. Além disso, ela também auxilia o país a cumprir seus compromissos internacionais assumidos na COP 21.

Mercado do biogás – mundo

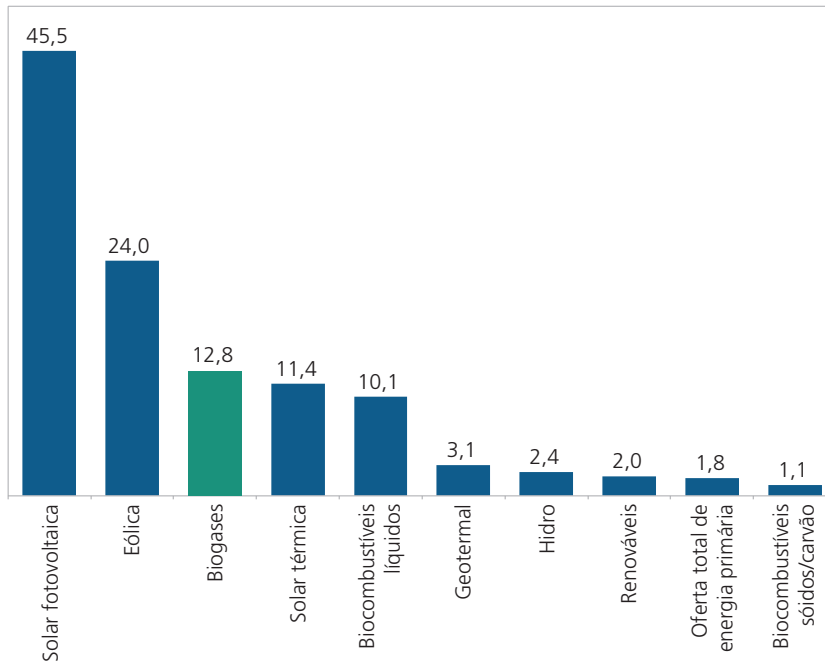
Panorama geral

O biogás (ou biogases) ainda representa uma parcela pouco significativa da produção primária de energia no mundo: em 2015, menos de 0,3% do total produzido teve origem em biogases, ou seja, cerca de 31 milhões de toneladas de óleo equivalente (IEA, 2017).

Sob outra perspectiva, o biogás foi a terceira fonte de energia renovável com maior taxa de crescimento anual no período de 1990-2015,

aumentando 12,8% a.a. e ficando atrás apenas da energia solar fotovoltaica e da eólica, e à frente da solar termal e dos biocombustíveis líquidos. As energias renováveis, em geral, tiveram crescimento médio anual de 2% acima da média, que foi apenas de 1,8% a.a. (IEA, 2017).

Gráfico 1 | Taxas de crescimento mundiais anuais médias da oferta de renováveis – 1990-2015 (%)

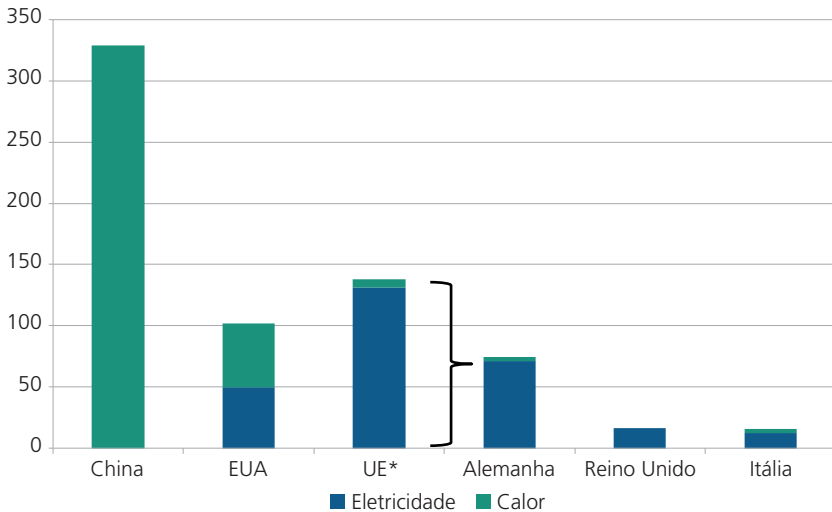


Fonte: IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Statistics 2017, renewables information: Overview (2017 overview)*. Paris: 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/renewables-information---2017-edition---overview.html>>. Acesso em: 5 fev. 2018

Embora a maior parte da produção mundial de biogás se encontre nos EUA e na Europa, ela tem crescido significativamente em outras regiões, como Ásia e África. Enquanto nos EUA a origem são predominantemente os aterros sanitários, na Europa, o destaque é para a biodigestão anaeróbica de resíduos agropecuários (REN21, 2017).

O Gráfico 2 mostra a produção de biogás e seu uso em alguns mercados-chave em 2013. Nesse ano, o total produzido atingiu pouco menos de 600 TWh.

Gráfico 2 | Uso de biogás nos maiores países produtores – 2013 (TWh/ano)



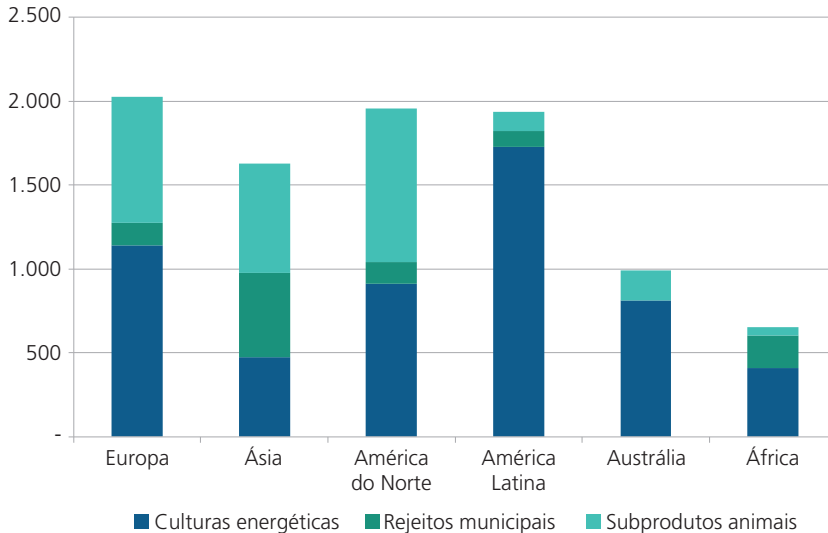
Fonte: IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Biogas for road vehicles: Technology brief*. Abu Dhabi, 2017. Disponível em: <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biogas_for_Road_Vehicles_2017.pdf>.

Acesso em: 5 fev. 2018.

* Incluindo Alemanha, Reino Unido e Itália.

O Gráfico 3 mostra o potencial, em 2015, de produção de biogás para cada continente, considerando suas características e restrições, incluindo a infraestrutura de gás natural. As fontes contempladas foram as culturas agrícolas energéticas, resíduos urbanos e subprodutos de origem animal. No caso da América Latina, é preciso ter em mente que a grande parcela de biomassa é usada para a produção de bioetanol, e, portanto, o potencial de uso direto para produção de biogás é limitado, restringindo-se a eventuais subprodutos, como a vinhaça e a torta de filtro.

Gráfico 3 | Potencial global para produção de biogás por tipo de matéria-prima – 2015 (PJ)



Fonte: IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Biogas for road vehicles: Technology brief*. Abu Dhabi, 2017.
Disponível em: <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biogas_for_Road_Vehicles_2017.pdf>.
Acesso em: 5 fev. 2018.

Apesar de a parcela de biogás usada internacionalmente como combustível veicular (biometano) ser muito pequena (menos de 1%), ela está em rápido crescimento. Os maiores produtores, em 2016, foram Alemanha, Suécia, Suíça, Reino Unido e EUA, sendo que, na Suécia e na Itália, quase toda a produção de biometano foi usada como combustível veicular. Estima-se que existam cerca de quinhentas plantas no mundo produzindo 50 PJ/ano de biogás equivalente a gás natural (IRENA, 2017).

Europa

A Europa tem se destacado na produção de biogás. Entre 2009 e 2015, o número de plantas cresceu de seis mil para aproximadamente 17 mil (EBA, 2016). A Alemanha, especialmente, possuía aproximadamente

10.800 das unidades de produção em 2015.⁹ Ainda que o crescimento tenha sido expressivo, o biogás responde por apenas 1,9% do total de geração elétrica da União Europeia. Relativamente, apenas uma pequena percentagem das plantas de biogás foi aperfeiçoada para a produção de biometano – 0,3% do consumo de gás europeu. Um bom exemplo de como o estímulo governamental foi importante para o biometano é o Reino Unido, onde a introdução de *carbon price support*, em 2013, assim como da tarifa *feed-in* (FiT) por kWh de biometano injetado no *grid*, no contexto do Renewable Heat Incentive, resultou em de vinte a trinta plantas novas por ano, entre 2014 e 2016 (OIES, 2017).

Vale destacar a experiência alemã no contexto europeu.¹⁰ A primeira legislação para promover energia renovável foi criada em 1991, logo após a reunificação. O *Stromeinspeisungsgesetz* (StrEG) proporcionava a geração de energia por todas as fontes renováveis no despacho e estabelecia uma tarifa FiT¹¹ por vinte anos. O número de plantas a biogás cresceu de aproximadamente cem, em 1990, para mil na virada do século, ainda que três quartos delas fossem pequenas unidades, com capacidade inferior a 70 MW. No ano de 2000, entrou em vigor a *Erneuerbare Energien Gesetz* (Lei de Energia Renovável), aperfeiçoada em 2004 e 2009. A lei garantiu tarifa FiT para eletricidade renovável, bem como um fator redutor para essa mesma tarifa, entre 1% a.a. e 1,5% a.a., de modo a refletir a incorporação de melhorias tecnológicas, além de um “bônus de biomassa” para a geração de eletricidade a

⁹ O crescimento na Alemanha foi expressivo até 2014, quando começou a vigência de uma nova lei sobre energias renováveis que restringiu o uso de colheitas e concentrou-se no uso de resíduos. Por exemplo, plantas usando biometano recebem € 216,3/MWh de FiT na Alemanha, de acordo com a lei atual (STERN, 2017).

¹⁰ Neste parágrafo, acompanhou-se OIES (2017).

¹¹ O sistema FiT consiste no pagamento de uma tarifa mais vantajosa para as centrais geradoras que utilizam fontes renováveis de energia, quando comparada com as fontes convencionais. O objetivo é viabilizar a implantação de tais empreendimentos, que têm custos mais elevados de produção (BRASIL, 2010).

Tabela 1 | Tipos de plantas de biogás – países selecionados

# Plantas	Brasil Dinamarca Finlândia França Irlanda Noruega Coreia Suécia Suíça Holanda Reino Unido											Média Alemanha	
	Brasil	Dinamarca	Finlândia	França	Irlanda	Noruega	Coreia	Suécia	Suíça	Holanda	Reino Unido		Média Alemanha
Lodo de esgoto	5	65	15	60	14	25	24	135	463	82	146	94	1.400
Sobras orgânicas	1	-	9	11	-	11	25	21	26	11	66	16	95
Agricultura	8	82	8	105	8	4	8	26	89	105	53	45	7.800
Industrial	2	5	2	80	-	3	-	5	22	13	-	13	250
Aterros sanitários	6	30	39	80	8	85	21	55-		41	345	71	400
Total	22	182	73	336	30	128	78	242	600	252	610	240	9.945
% # Plantas	Brasil Dinamarca Finlândia França Irlanda Noruega Coreia Suécia Suíça Holanda Reino Unido											Média Alemanha	
	Brasil	Dinamarca	Finlândia	França	Irlanda	Noruega	Coreia	Suécia	Suíça	Holanda	Reino Unido		Média Alemanha
Lodo de esgoto	22,7	35,7	20,5	17,9	46,7	19,5	30,8	55,8	77,2	32,5	23,9	34,8	14,1
Sobras orgânicas	4,5	-	12,3	3,3	-	8,6	32,1	8,7	4,3	4,4	10,8	8,1	1,0
Agricultura	36,4	45,1	11,0	31,3	26,7	3,1	10,3	10,7	14,8	41,7	8,7	21,8	78,4
Industrial	9,1	2,7	2,7	23,8	-	2,3	-	2,1	3,7	5,2	-	4,7	2,5
Aterros sanitários	27,3	16,5	53,4	23,8	26,7	66,4	26,9	22,7	-	16,3	56,6	30,6	4,0
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Task 37 biogas country overview, 2014.
Disponível em: <<http://task37.ieaenergy.com/country-reports.html>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

partir de fontes derivadas de biomassa. Por fim, incorporou também um incentivo para uso do calor residual, promovendo plantas mais eficientes que combinassem produção de calor com energia. Isso fez com que as plantas passassem a receber um preço médio mais de quatro vezes acima do preço *spot* de eletricidade no atacado, e acima do preço pago por grandes consumidores industriais. Tais mecanismos levaram à construção de mais de sete mil plantas de biogás, com capacidade de geração próxima a 3,5 GW, e capacidade média de 500 MW por planta (OIES, 2017). Ocorre que tamanho crescimento foi deflagrado pelo uso de culturas agrícolas, em especial o milho, que fornecia 75% da matéria-prima para as plantas de biogás. Assim, um milhão de hectares, ou 8% da terra arável alemã, foram destinados a culturas para produção de biogás.

Em 2012, e novamente em 2014, ocorreu a remoção dos incentivos, com impacto dramático: se, entre 2009 e 2011, mil novas plantas eram adicionadas anualmente, com a nova legislação, o número de entrantes reduziu-se a uma centena de plantas em 2015. Seja como for, a geração de eletricidade a partir de biogás ainda produz aproximadamente 5% da demanda total de energia de 600 TWh. A Tabela 1 permite comparar a Alemanha com outros países representativos na Europa e no mundo, evidenciando os efeitos dos subsídios concedidos naquele país.

Estados Unidos da América (EUA)

Os EUA têm aproximadamente 2.100 plantas de biogás em operação, a maioria das quais em estações de tratamento de água. O Departamento de Energia (DOE) estima um potencial para 13 mil plantas, produzindo 40 TWh de eletricidade (USDA; US EPA; DOE, 2014).

A produção é incentivada por meio de créditos tributários. Entre os estados americanos, a Califórnia é o de maior destaque, contando com 276 sistemas de biogás operacionais em 2015, a maioria (151) com água de rejeito, seguidos por 102 em aterros (AMERICAN BIOGAS COUNCIL, 2015).

Tabela 2 | Sistemas de biogás dos EUA

	Estrume animal	Aterros	Águas de rejeito	Total
Operacionais	239	636	1.241	2.116
Potencial	8.241	1.086	3.681	13.008

Fonte: USDA – US DEPARTMENT OF AGRICULTURE; US EPA – US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; DOE – US DEPARTMENT OF ENERGY. Biogas opportunities roadmap. Ago. 2014. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/Biogas%20Opportunities%20Roadmap%208-1-14_0.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2018

O estado da Califórnia proporciona uma série de subsídios (ver Anexo 3) à produção do biogás. A existência de um mercado líquido no estado, a partir do Low Carbon Fuel Standard (LCFS), que qualifica tanto gás natural fóssil quanto gás natural renovável para créditos, aumenta o potencial para uma mudança no setor de transportes, substituindo os caminhões a diesel. Além disso, o programa nacional Renewable Fuel Standard (RFS) lista o biogás como um biocombustível avançado que gera Renewable Identification Numbers (RIN), vendidos a provedores de combustíveis não renováveis para adequação às normas do RFS (US EPA, 2017). A venda de RINs gerada a partir da produção de gases naturais renováveis também subsidia sua produção. Em 2014, entrou em vigor uma lei promovendo o transporte sustentável e autorizando o uso do Greenhouse Gas Reduction Fund para desenvolvimento de tecnologia, demonstração, plantas-piloto e oferta pré-comercial de caminhões.

Aproximadamente 20% do dinheiro gasto em 2017 será utilizado em caminhões pesados, aumentando progressivamente 50% dos fundos

em 2023. Além disso, o California's Sustainable Freight Action Plan, lançado em 2015, propõe maximizar “veículos de carga de emissão próxima a zero e equipamento movido à energia renovável até 2030” (SCHEITRUM *et al.*, 2017, p. 356), buscando especificamente o desenvolvimento de mais de cem mil veículos de carga e equipamento com emissão zerada. A Califórnia também dispõe de várias políticas que procuram aumentar o desenvolvimento do gás natural renovável: além do regime de créditos de carbono, há uma legislação que incentiva a conversão de biomassa, como a estratégia Short Lived Climate Pollutants SB 1383, que exige a redução de 40% de metano até 2030, com base nos níveis de 2013. A legislação também apresenta provisões para testar a interconexão com gasodutos e exige que a infraestrutura seja desenvolvida, bem como as políticas de aquisição, colocadas em prática para encorajar projetos de biometano em unidades de produção de laticínios.

Tais medidas ilustram a análise recente (SCHEITRUM *et al.*, 2017) de que nenhum gás renovável, de qualquer fonte, é comercialmente viável sem intervenção política na competição com o gás natural, que permanece mais barato. O mesmo estudo também conclui que a frota de caminhões pesados a gás natural deveria dobrar para promover investimento em infraestrutura de abastecimento e acompanhar o potencial da produção de gases renováveis, exigindo, além de avanços disruptivos em tecnologia de custo, políticas regulatórias que restrinjam a escolha na frota de transporte e subsídios para compra de caminhões a gás natural, de modo que a rede cresça até um volume suficientemente grande para gerar expansão automática.¹²

¹² O estudo também menciona que existem indicações de que a maior competição de mercado utilizando tanques de combustível fabricados na China possa reduzir o custo dos tanques de gás natural de caminhões entre 60% e 70%, mas a intervenção política ainda é necessária para fomentar o mercado.

China e Índia

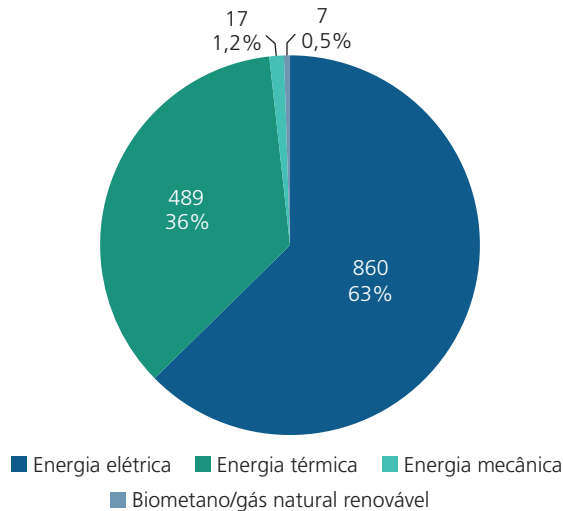
A utilização do biogás na China difere substancialmente do resto do mundo (ver Figura 1). Enquanto na China (e, em grande medida, na Índia) a totalidade do biogás é originada de biodigestores de pequena escala, para cozinhar alimentos nos lares, na Europa (especialmente Alemanha, Reino Unido e Itália), mais de 90% é usado para a produção de eletricidade e, nos EUA, os dois usos têm participação equivalente (IRENA, 2017). Há indicações de que a produção de biogás doméstico na China retrocedeu a um nível anterior a 2011, já tendo atingido um pico em diversas províncias. Em contraste, o biogás baseado em projetos de engenharia na agricultura mostra um crescimento acentuado (GU *et al.*, 2016). Na Índia, o principal problema parece estar nos custos para a colocação de plantas de biogás em áreas rurais de renda pequena ou média. Problemas adicionais incluem a inconstância do fornecimento de matérias-primas, a adaptação da tecnologia a especificidades regionais, além da imaturidade dos mercados nas regiões urbanas, onde os municípios não têm condições financeiras para tratamento dos dejetos. Tais problemas apontam a necessidade de apoio financeiro de governos centrais e estaduais, de modo a viabilizar os mercados (MITTAL; AHLGREN; SHUKLA, 2018).

Mercado do biogás no Brasil

As principais fontes de produção de biogás em escala comercial no Brasil são: a parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU); rejeitos da produção de açúcar e etanol de cana, como vinhaça e torta de filtro; e dejetos da pecuária suína. Em menor escala, também são utilizados: resíduos da produção de alimentos em geral (amido de mandioca e suco de laranja, como exemplos mais comuns); descarte de restaurantes; grama

(caso de Itaipu); dejetos da pecuária bovina e avícola; e efluentes sanitários. Independentemente da matéria-prima utilizada, a produção do biogás representa uma oportunidade de transformação de resíduos indesejados¹³ em fontes de energia, matéria-prima para fertilizantes e outros subprodutos economicamente aproveitáveis. A quase totalidade da produção de biogás no Brasil gera energia elétrica ou térmica, como se vê no Gráfico 4.

Gráfico 4 | Produção média de biogás por aplicação – 2015 (mil Nm³/dia)



Fonte: EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017.

Na matriz energética brasileira, em geral, a participação do biogás em produção efetiva passou de 0,01%, em 2010 (15 mil tep¹⁴ de um total de 269 milhões tep), para 0,05%, em 2016 (137 mil tep de um total de 288 milhões tep).

¹³ Estima-se que a degradação de materiais orgânicos gere emissão tal de CH⁴ que, se não recuperado e utilizado ou destruído, tem um impacto 21 vezes maior que o CO₂ sobre as mudanças climáticas (EPE, 2017).

¹⁴ Toneladas equivalentes de petróleo.

No Brasil, a energia produzida a partir do biogás entrou recentemente na fase de maturidade. A inclusão do biogás no plano de expansão da energia elétrica sinaliza que essa energia deverá emergir, nos próximos anos, como uma das principais formas de produção de energia renovável.

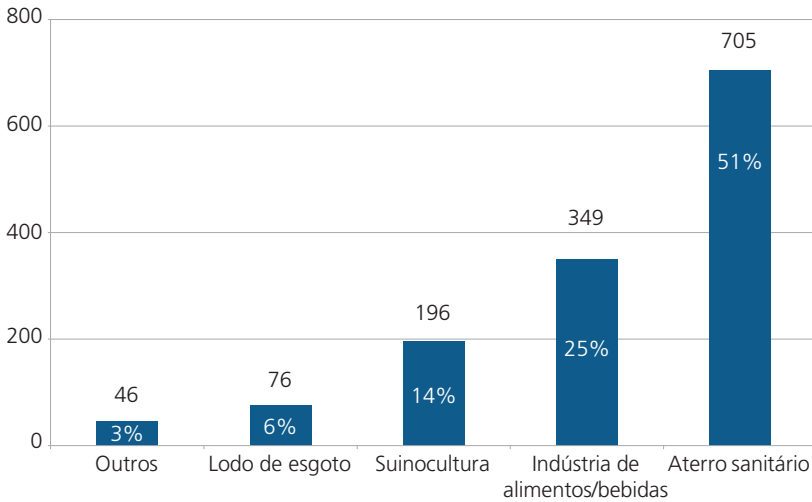
Como se observa pelos dados anteriores, o biogás apresenta-se de modo incipiente na oferta de energia. Mesmo considerando apenas as fontes de biomassa (8% da oferta interna nacional), o biogás atinge somente 1% da oferta. O setor, no entanto, desenvolve-se rapidamente: em 2015, havia 126 plantas, produzindo 1.373 mil Nm³/dia. A maioria das plantas está localizada no Sul (71) e no Sudeste (41) do país.

Ainda que os números absolutos sejam pequenos, a capacidade instalada de biogás para geração elétrica tem crescido substancialmente. Esse aumento passou de 20 MW em 2007 para 119 MW em 2016, aproveitando principalmente RSU, o que representa um crescimento de 22% a.a. Como existem diversas opções de substratos para a produção de biogás, é de se esperar que, com o aprimoramento das tecnologias específicas, o crescimento seja ainda mais relevante.

As boas perspectivas se refletem nos leilões de energia, em que 14 projetos a biogás foram cadastrados nos últimos leilões, tendo um deles sido habilitado e outro já está comercializando energia.

Principais fontes no Brasil

As principais fontes de produção de biogás, pela ordem, são os aterros sanitários, a indústria de alimentos e bebidas, a suinocultura e o lodo de esgoto, como se vê no Gráfico 5. Detalha-se a seguir a utilização desses substratos.

Gráfico 5 | Produção de biogás por substrato – 2015 (Nm³/dia)

Fonte: EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017.

Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (RSU)

O Brasil tem cerca de 208 milhões de habitantes, dos quais 80% residem em cidades. Essa população gera, anualmente, aproximadamente 80 milhões de toneladas de RSU, sendo 17,2% do total encaminhado para lixões, 24,1% para aterros controlados e 58,7% para aterros sanitários (esses dois últimos representam o meio mais adequado para tal finalidade) (ABRELPE, 2015).

O acúmulo de resíduos urbanos constituiu fonte de poluição e custos para as cidades.¹⁵ Uma vez superados os desafios relacionados à separação dos resíduos não orgânicos, o lixo urbano pode se transformar em fonte abundante de biogás.¹⁶

¹⁵ O biogás oriundo de RSU tem entre 50% e 55% de teor de metano.

¹⁶ Uma dificuldade importante relativa ao aproveitamento de RSU na produção de biogás é justamente a separação do resíduo orgânico do inorgânico, o que, conforme alegam as empresas do setor, teria custos proibitivos.

Em 2015, como se observa no Gráfico 5, 51% de todo o biogás produzido no país (705 mil Nm³/dia em média) foi gerado em aterros sanitários. Nesse ano, a capacidade instalada em plantas que utilizam RSU como matéria-prima representou 95% do total (EPE, 2017).

Um problema relativo ao biogás (particularmente, ao biometano) oriundo de aterros sanitários é seu alto teor de siloxanos, um contaminante cuja presença exige tratamento adicional para que possa ser utilizado na alimentação de motores. Recentemente, foram estabelecidos níveis máximos aceitáveis para a presença de siloxanos no biometano.¹⁷

Em setembro de 2017, entrou em funcionamento, em Caieiras (SP), a maior geradora de biogás de aterro com motogeradores do mundo, com capacidade de 30 MW de potência, suficiente para abastecer cerca de 80 mil residências. O biogás da planta provém do lixo coletado na região metropolitana de São Paulo. A energia gerada é vendida no mercado livre e distribuída por meio do Sistema Interligado Nacional (SIN). Na planta, que foi financiada com apoio do BNDES, são produzidos cerca de 17 mil m³ de biogás por hora, vendidos a um preço de aproximadamente R\$ 250 por MW/h.

Estações de tratamento de efluentes sanitários (ETE)

A coleta de biogás a partir de estações de tratamento de efluentes (ETE) originou-se na Inglaterra no fim do século XIX (NICOLINI, 2016). No Brasil, a primeira experiência de produção em escala de biogás

¹⁷ ANP NT 03/2017/SBQ/RJ; ABNT NBR 16561:2017 – Biometano – Determinação de siloxanos por cromatografia em fase gasosa e amostragem com tubo de dessorção térmica.

a partir do esgoto sanitário surgiu em Curitiba (PR), em projeto da CS Bioenergia (Sanepar e Catallini Bioenergia), com início no fim de 2017 e potência de 2,8 MW (expansível para 5,6 MW) (COPEL, 2017). A capacidade de processamento do projeto é de 900 m³/dia de lodo e 120 t/dia de RSU, com geração de 20 mil m³/dia de biogás (POSSETTI, 2017). A necessidade de processar os efluentes sanitários em áreas urbanas no Brasil indica um grande campo a ser explorado para essa tecnologia. No Brasil, o uso de biodigestores é limitado a poucas aplicações, em comparação a outros países. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000), foram identificados apenas 153 distritos brasileiros em que há biodigestores para tratamento do lodo de suas ETEs (ICLEI, 2010).

Produção de açúcar e álcool

No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a produção de açúcar e álcool, e o país é o maior produtor mundial, seguido de longe pela Índia. Segundo Conab (2016), na safra 2016-2017, foram produzidos no Brasil 657 milhões de toneladas de cana, o que gerou 28 bilhões de litros de etanol e 39 milhões de toneladas de açúcar. De cada tonelada de cana moída se extrai, por meio da filtragem do seu caldo, 30 kg a 40 kg de torta de filtro, enquanto cada litro de etanol gera de 10 a 12 litros de vinhaça, resíduo altamente contaminante. Ambos são matérias-primas para a produção do biogás, sendo que uma tonelada de torta gera entre 90 Nm³ e 120 Nm³ de biogás, e cada litro de vinhaça gera de 15 Nm³ a 25 Nm³ de biogás. Para 2017, a EPE projeta um processamento de 19 milhões de toneladas de torta de filtro e 256 bilhões de litros de vinhaça no país, que poderiam ser utilizados para gerar 1,8 bilhão de Nm³ de biogás de torta de filtro e 3,8 bilhões de Nm³ de biogás de vinhaça (EPE, 2017).

Da cana-de-açúcar também se extrai a palha, da qual também pode ser gerado o biogás, substituindo sua queima em caldeira de alta pressão, com muitos benefícios favoráveis ao biogás.¹⁸ Considera-se atualmente que 50% da palha gerada na colheita da cana pode ser retirada do solo sem prejuízo para a conservação de suas propriedades. Os demais 50% devem ser mantidos no solo para efeitos de fertilização.

É de origem sucroalcooleira a primeira planta de biogás contemplada em um leilão de energia no país, a qual deverá entrar em funcionamento em 2021.¹⁹

Pecuária, avicultura e suinocultura

Incidentalmente, foi a partir de uma demonstração da geração de gás por meio de uma mistura de estrume e água, feita por Louis Pasteur no século XIX, que o biogás, descoberto no século XVII, passou a ser considerado fonte de energia. Na década de 1940, a Índia começou a aproveitar, em plantas de geração de energia, o biogás oriundo de esterco de animais (GU *et al.*, 2016).

O Brasil tornou-se um dos maiores produtores mundiais de gado bovino, suíno e de frangos. Em 2016, a área total de pastagens no país ocupava 230 milhões de hectares. Essa atividade produz dejetos e outros resíduos da produção cujo descarte representa fonte de poluição do solo e de recursos hídricos, bem como de emissão de gás metano (não tratado) na atmosfera.

Apesar de o plantel de bovinos do Brasil ser estimado em 219 milhões de cabeças (USDA, 2017), número superior ao da população

¹⁸ Por exemplo, a prática da queima da palha da cana-de-açúcar é proibida no estado de São Paulo devido à poluição que causa na atmosfera.

¹⁹ A última seção descreve com mais detalhes esse ponto.

humana, estimado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em cerca de 208 milhões de habitantes (IBGE, 2016), e produzir cerca de 1.512.560 milhões de t/ano de resíduos (ABISOLO, 2016), sua contribuição para a produção do biogás é praticamente nula, devido ao fato de o gado bovino ser, no país, criado, majoritariamente, de forma extensiva, o que dificulta a coleta de seus resíduos (ABIOGÁS, 2016).

Na avicultura, apesar de a produção de frangos no Brasil ser a segunda maior do mundo, com um plantel estimado em 1,3 bilhão de animais (IBGE, 2016), esse é um segmento que ainda apresenta potencial restrito para a produção do biogás. Em primeiro lugar, os dejetos da produção avícola, coletados por meio da “cama de frango”, estimados em 9,93 milhões de t/ano (ABISOLO, 2016), são mais secos do que o ideal para seu aproveitamento na produção de biogás. Além disso, a “cama de frango” tem outros destinos economicamente lucrativos, como, por exemplo, a venda diretamente para a fabricação de fertilizante (nitrogênio), o que encarece a sua utilização como matéria-prima para o biogás.

Por sua vez, a suinocultura concentra praticamente toda a produção de biogás de origem pecuária no Brasil, apesar de, também, ainda ser diminuta. Com um plantel de cerca de 39 milhões de cabeças (USDA, 2017) e produção de dejetos estimada em 900 milhões t/ano (ABISOLO, 2016), produziu, em 2015, 196 mil Nm^3/dia , o que representou 14% do total produzido no país, para um potencial de produção de cerca de 123 mil Nm^3/dia . A pecuária suína utiliza água de forma intensiva, o que significa, ao mesmo tempo, um elevado custo ambiental para o processo de extração de sua carne e um custo relativamente baixo para a produção do biogás, dada a facilidade de sua coleta. A esse respeito, deve ser observada a escala produtiva (USDA, 2016).

Tabela 3 | Exemplos de resíduos agropecuários

Atividade	Número	Produção média/cabeça	Estimativa de resíduos produção
Avicultura	3,82 bilhões de aves de corte	2,6 kg/ciclo	9,93 milhões de t/ano de cama de aviário
Pecuária bovina	213 milhões de cabeças	20 kg/dia	1.512.560 milhões de t/ano
Suinocultura	37,5 milhões de cabeças	-	900 milhões de t

Fonte: ABISOLO - Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal. 2016. Disponível em: <<http://abisolo.com.br/anoario-edicoes-antiores/>>. Acesso em: 5 fev. 2018

Por fim, vale ressaltar o Plano ABC, citado anteriormente. Em relação à suinocultura (CASARIN, 2016), as linhas de crédito do Plano ABC procuram reduzir as emissões de GEE oriundas das atividades agropecuárias, aumentar a produção agropecuária em bases sustentáveis e adequar as propriedades rurais à legislação ambiental. As linhas de crédito são de até R\$ 2 milhões, por beneficiário, por ano agrícola, independentemente de outros créditos concedidos ao amparo de recursos controlados do crédito rural. O período de carência é de cinco anos, e o prazo de pagamento, de dez anos. Atualmente, as taxas cobradas são de 7,5% a.a. para os beneficiários do Programa Nacional de Apoio ao Médio Produtor Rural (Pronamp) e de 8% a.a. para os demais produtores, com financiamento de até 100% do projeto, sendo que é possível financiar até 30% do valor do projeto como custeio associado.

Resíduos da produção de alimentos em geral

Como já mencionado, todo resíduo orgânico gerado na produção de alimentos pode ser transformado em biogás. Um dos rejeitos da produção de alimentos mais utilizados no Brasil, atualmente, para a produção de biogás é a água de mandioca, tubérculo que alcançou a

produção de 23,71 milhões de toneladas no ano de 2016, com uma área colhida de 1,55 milhão de hectares (CONAB, 2016). A água de mandioca nada mais é do que o resíduo que se obtém de sua lavagem no processo de sua transformação em amido (ABIOGÁS, 2016). A água proveniente da produção de suco de laranja é outro resíduo utilizado na produção de biogás. Soja e milho também têm potencial e alguma utilização, atualmente.

Apoio do BNDES, potencial e propostas de política

O BNDES tem apoiado pioneiramente projetos de biogás, mas os investimentos ainda estão aquém do potencial vislumbrado. A Tabela 4 exemplifica os principais projetos.

Tabela 4 | Carteira BNDES – projetos de pesquisa e desenvolvimento em biogás e usinas termelétricas

Empresa/instituição.	Descrição	Ano	Valor total do projeto (R\$ milhões)
Geoenergética	Planta demonstração de produção de biogás a partir de resíduos da produção de etanol	2011	18,7
Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento/ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/ Master Agropecuária	Desenvolver, implantar e validar sistema biotecnológico modular de alta eficiência para tratamento de efluentes da suinocultura	2016	4,1

(continua)

(continuação)

Empresa/inst.	Descrição	Ano	Valor total do projeto (R\$ milhão)
Fundação de Apoio Institucional ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico da Universidade Federal de São Carlos e Algae	Planta-piloto de biodiesel a partir do uso da vinhaça para biodigestão e cultivo de microalgas.	2011	3,2
Universidade Federal do Ceará	Conversão de águas residuárias em biogás e lodo em estação de tratamento de esgoto para geração de energia	2016	3,4
Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa, Universidade Federal de Minas Gerais, Companhia Municipal de Limpeza Urbana	Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos por meio de metanização anaeróbia "via seca"	2014	10,3
Usina Termelétrica Termoverde Caieiras	Usina com potência instalada de 29,5 MW movida a biogás de resíduos urbanos (Caieiras/SP)	2015	78,3
Usina Termelétrica Minas do Leão	Usina com potência instalada de 8,6 MW movida a biogás de resíduos urbanos (Minas do Leão/RS)	2015	23,2

Fonte: Elaboração própria.

Em relação ao potencial apresentado pelo biogás de diferentes origens, é possível perceber a existência de um amplo espaço para expansão, especialmente no tocante ao biogás agroindustrial, e que políticas públicas podem ser criadas de modo a alavancar o avanço do setor.

De acordo com dados da Abiogás, resumidos na Tabela 5, o potencial brasileiro de biometano por fonte é o seguinte:

Tabela 5 | Potencial brasileiro de biometano por fonte (m³/dia)

Origem	Volume (milhões de m³/dia)
Sucroenergético	56
Alimentos	15
Saneamento	7

Fonte: ABIOGÁS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. Avanços do biogás no Brasil. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/area-exclusiva-ivforum>>. Acesso em: 24 out. 2017

Como mencionado anteriormente, esses dados implicam que seja suprida com biometano 47% da demanda atual de óleo diesel (sessenta bilhões de litros), ou, com biogás, um quarto da demanda de energia elétrica atual, presentemente em 473.395 GWh. A associação propõe uma escalada nas metas de produção do biometano de 500 mil m³/dia, em 2019, para 10,7 milhões m³/dia, em 2025, atingindo 32 milhões em 2030. Isso representa taxas de crescimento anuais de 66% no primeiro período (2019-2025) e de 24,5% no segundo (2025-2030). De acordo com a EPE, a oferta interna de biogás cresceu 45% a.a. entre 2010 e 2016, ainda que em 2016 apenas 0,05% da oferta interna de energia correspondesse ao produto. Mais importante que os números absolutos, vale ressaltar que as fontes renováveis já representam 82% da oferta interna de energia, com a biomassa respondendo, em 2016, por 50 TWh, ou 8%, aproximadamente. Nesse mesmo ano, entre as fontes de biomassa, o bagaço de cana respondia por 89% do total da oferta (EPE, 2017).

Em 2015, as plantas de biogás brasileiras estavam localizadas majoritariamente no Sul (71 plantas com 354 mil Nm³/dia) e no Sudeste (41 plantas com 892 mil Nm³/dia), seguidas do Centro-Oeste (12 plantas, 110 mil Nm³/dia) e Nordeste (duas plantas, 17 mil Nm³/dia). Observa-se que as plantas do Sudeste têm uma produção média quatro vezes superior às do Sul (EPE, 2017).

Em relação à potência instalada de biogás por substrato (em 2016), a grande maioria (95%) vem de RSU. Aterros sanitários também apresentam produção média mais elevada.

Adicionalmente, é fundamental ressaltar, como já mencionado, a participação do biogás nos últimos leilões do Ambiente de Contratação Regulada (ACR), com 14 projetos cadastrados nos últimos leilões, um projeto habilitado tecnicamente e outro projeto já comercializando energia (Usina Bonfim, em Guariba, São Paulo).

As condições mais adequadas para a utilização de biomassa agrícola na produção de biogás estão no setor sucroalcooleiro. A EPE estima um crescimento de 2% a.a. na tonelagem de cana processada entre 2016 e 2026, com aumento proporcional na quantidade de vinhaça (5,4% a.a. no mesmo período) e torta de filtro (2,6% a.a.). A EPE também projeta que o setor sucroalcooleiro possa sair de uma produção de 5,6 bilhões de Nm³ de biogás em 2017 para 8,4 Nm³ em 2026, representando um crescimento de 4,6% a.a. no período. Isso significaria um aumento relevante na injeção de biogás no Sistema Integrado Nacional, que passaria de 32 MW médios para 233 MW médios entre 2016 e 2026, correspondendo a um aumento de 22% a.a.

Entre as principais barreiras à realização do potencial do biogás no país, incluem-se:

- mercado incipiente, com pequena relevância e previsibilidade;
- inconsistências entre os marcos regulatórios estaduais e federal;
- diversidade de substratos, com grande variedade regional;
- custo dos equipamentos para biodigestão e acesso a financiamentos para sua realização; e

- desconhecimento dos benefícios do produto e das condições de viabilidade técnico-econômica do investimento em biogás.

Dessa forma, as propostas de política devem contemplar:

- aperfeiçoamento dos marcos regulatórios, incentivando a inserção do biogás na matriz energética nacional;
- avanços na geração distribuída, de modo a alavancar o desenvolvimento regional;
- incentivos à aquisição de biodigestores;
- diversificação dos riscos, bem como do conjunto dos investidores, em produto com mínima exposição cambial; e
- estudos independentes que avaliem a viabilidade técnico-econômica de diferentes modelos de produção de biogás.

É importante destacar que já existem políticas em andamento em vários estados brasileiros, em relação ao biogás. Em São Paulo, foi criado em 2012 o Programa Paulista de Biogás, que estabeleceu a adição de um percentual mínimo de biometano ao gás canalizado comercializado no estado (Decreto 58.659/2012). Recentemente, a Deliberação ARSESP 744/2017 dispôs sobre as condições de distribuição de biometano na rede de gás canalizado no estado de São Paulo. No estado do Rio de Janeiro, a ANP aprovou, em setembro de 2017, o controle de qualidade do biometano produzido pela planta de Tratamento de Biogás GNR Dois Arcos, em São Pedro da Aldeia (RJ), com capacidade de produção de 10.000 m³/dia. Essa foi a primeira aprovação após a publicação da Resolução ANP 685/2017, que regulamenta a qualidade do biometano de aterros sanitários e ETEs. As leis do estado do Rio de Janeiro impõem que concessionárias de distribuição de gás canalizado adquiram, de

forma compulsória, todo o gás natural renovável ofertado no estado. Paraná e Santa Catarina também se adiantam em políticas públicas para o desenvolvimento do biogás e do biometano: no Paraná, está em elaboração um Plano Estratégico de Biomassa, incluindo um grupo de trabalho responsável pelo Marco Legal do Biogás. Em Santa Catarina, o Marco Legal encontra-se em estágio avançado de elaboração. Outros estados certamente seguirão esses passos, contribuindo para o avanço da estrutura regulatória para o biogás.

Conclusão

Este artigo buscou explicar o estágio atual e o potencial da produção de uso do biogás, sobretudo aquele obtido a partir de resíduos da produção agropecuária e agroindustrial.

Em função das crescentes preocupações ambientais, tanto para acelerar as substituições de fontes fósseis para a produção de energia como para melhorar e ampliar as alternativas de tratamento de resíduos orgânicos, o biogás tem sido alvo de diversas iniciativas de fomento ao redor do mundo, com destaque para países como a Alemanha e os EUA.

No Brasil, o biogás também tem apresentado crescimento significativo. Em 2016, o país tinha quase 120 MW de capacidade instalada de geração elétrica a partir de biogás, o que é um volume seis vezes superior ao registrado em 2007, sendo que 95% desse valor se refere a plantas que utilizam RSU. Isso demonstra que o biogás de resíduos urbanos já é uma realidade e deve continuar crescendo.

Por outro lado, o potencial dos resíduos agroindustriais ainda permanece pouco utilizado, sobretudo na produção de biogás em larga escala.

Embora esteja prevista para 2021 a entrada em operação da primeira termoelétrica de biogás de resíduos agroindustriais, com 21 MW de capacidade, esse fato ainda representa pouco, comparado ao potencial do setor.

De fato, o potencial do biogás não se limita à geração de eletricidade renovável. Com o desenvolvimento tecnológico de tratores e caminhões movidos a gás, abre-se uma excelente oportunidade para substituição gradativa do diesel nas operações agropecuárias, que representam 15% do consumo nacional, contribuindo para a redução de emissões de CO₂ e para a sustentabilidade ambiental.

Para que esse potencial seja plenamente aproveitado, contudo, são necessárias políticas públicas que gerem estímulos necessários não apenas para o desenvolvimento e a adoção de tecnologias de produção do biogás, mas também que incentivem o consumo do produto.

Dessa forma, uma vez estabelecido um arcabouço regulatório que incentive sua maior inserção, o biogás terá papel fundamental a desempenhar no atingimento das metas de redução de emissões de CO₂ definidas pelo Acordo de Paris e no aumento da competitividade e sustentabilidade do setor agroindustrial do Brasil.

Referências

ABIÓGÁS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. Biogás e biometano no Brasil. Programa Renovabio, dez. 2016. Brasília. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/4323103/ABioga%CC%81s.pdf/8e80e093-4042-4c24-ad9e-851c6190b399>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

_____. Avanços do biogás no Brasil. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/area-exclusiva-ivforum>>. Acesso em: 24 out. 2017.

ABIQUIM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. *O desempenho da indústria química brasileira em 2017*. Disponível em: <https://abiquim.org.br/uploads/guias_estudos/desempenho_industria_quimica_2017.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2018.

ABISOLO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE TECNOLOGIA EM NUTRIÇÃO VEGETAL. *Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal*. 2016. Disponível em: <<http://abisolo.com.br/anuario-edicoes-antiores/>>. Acesso em: 5 fev. 2018.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015*. Disponível em: <www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>. São Paulo, 2015. Acesso em: 5 fev. 2018.

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER. Renewable Fuel Standard. 2017. Disponível em: <www.afdc.energy.gov/laws/RFS>. Acesso em: 5 fev. 2018.

AMERICAN BIOGAS COUNCIL. *Biogas state profile: Califórnia, 2015*. Disponível em: <https://www.americanbiogascouncil.org/State%20Profiles/ABCBiogasStateProfile_CA.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2018.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. *Principais indicadores do setor de fertilizantes*. 2016. Disponível em: <<http://anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00>>. Acesso em: 2 jun. 2016.

ARSESP – AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Deliberação ARSESP 144, de 26 de julho de 2017. Disponível em: <<http://www.arsesp.sp.gov.br/LegislacaoArquivos/ldl7442017.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. In: FORUM BNDES DO BIOGÁS, Rio de Janeiro, nov. 2017.

BOND, T.; TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, v. 15, p. 347-354, 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel. Nota Técnica 43, de 8 de setembro de 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0043_GD_SRD.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2018.

_____. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 8, de 30 de janeiro de 2015. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

_____. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução 685, de 29 de junho de 2017. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

_____. Lei n 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm>. Acesso em: 16 fev. 2018.

CASARIN, M. A. *Microgeração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos: uma contribuição para a sustentabilidade da suinocultura*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

COELHO, J. M. Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/area-exclusiva-ivforum>>. Acesso em: 25 out. 2017.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, v. 3, safra 2016/17 - n. 2, segundo levantamento. Brasília: ago. 2016.

COPEL – COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. Avanços do biogás no estado do Paraná. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017.

CRUZ, A. C.; PEREIRA, F. S.; FIGUEIREDO, V. S. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. *BNDES Setorial*, n. 45, p. 137-187, 2017. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/11814>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

EBA – EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. *Statistical report*, 2016.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2017.

———. Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017.

FOLEGATTI, M. RenovaCalc. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, 17 out. 2017, São Paulo. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/area-exclusiva-ivforum>>. Acesso em: 30 out. 2017. (acesso restrito)

GU, L. *et al.* Where is the future of China's biogas? Review, forecast, and policy implications. *Petroleum Science*, v. 13, p. 604-624, 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12182-016-0105-6>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa da Pecuária Municipal*. 2016. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2016_v44_br.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2018.

ICLEI – BRASIL – GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. *Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos*. São Paulo: Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, 2010.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Statistics 2017, renewables information: Overview (2017 overview)*. Paris, 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/renewables-information---2017-edition---overview.html>>. Acesso em: 5 fev. 2018.

IPNI – INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. *Fertilizantes*. 2015. Disponível em: <<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132#evolucao>>. Acesso em: 5 fev. 2018.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Biogas for road vehicles: Technology brief*. Abu Dhabi, 2017. Disponível em: <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biogas_for_Road_Vehicles_2017.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2018.

MARQUES, H. M. S. M. *Vinhoto de cana de açúcar – aproveitamento e impactos ambientais na região de Ibatí/PR*. Trabalho de Conclusão de Curso

(Especialização em Ensino em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ibatí, 2013.

MITTAL, S.; AHLGREN, E.O.; SHUKLA, P.R. Barriers to biogas dissemination in India: a review. *Energy Policy*, v. 112, p. 361-370, 2018.

NICOLINI, D. R. W. *Produção de biogás a partir do tratamento de efluentes sanitários*. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Ambiental) – Departamento de Economia Rural e Extensão, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

OIES – THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES. Biogas. A significant contribution to decarbonising gas markets? *Energy Insight*, n. 15, 2017. Disponível em: <<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/06/Biogas-A-significant-contribution-to-decarbonising-gas-markets.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

PEREIRA, E. R. *et al. Biodigestores: tecnologia para manejo de efluentes da pecuária*. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/pdfs/1255981651.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2017.

POSSETTI, G. R. *Experiências da Sanepar em gestão sustentável de energia*. In: VI DIÁLOGOS DO SANEAMENTO, 2017, Porto Alegre. Disponível em: <https://www.abes-rs.org.br/novo/_materiais/materiais_jknhwuuxfj8q.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2018.

REN21 – RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. *Renewables 2017: global status report*. Paris, 2017. Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2018.

SÃO PAULO. Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. Decreto 58.659, de 4 de dezembro de 2012. Institui o Programa Paulista de Biogás e dá providências correlatas. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2012/decreto-58659-04.12.2012.html>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

SCHEITRUM, D. *et al.* California low carbon fuel policies and natural gas fueling infrastructure: synergies and challenges to expanding the use of RNG in transportation. *Energy Policy*, v. 110, p. 355-364, 2017.

STERN, J. The future of gas in decarbonising European energy markets: the need for a new approach. 2017. (Oies Paper NG 116). Disponível em:

<<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/01/The-Future-of-Gas-in-Decarbonising-European-Energy-Markets-the-need-for-a-new-approach-NG-116.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

US EPA – US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Renewable Fuel Standard Program*. 2017. Disponível em: <<https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Foreign Agricultural Service*. Livestock and poultry: world markets and trade. Out. 2017. Disponível em: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1488>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

USDA – US DEPARTMENT OF AGRICULTURE; US EPA – US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; DOE – US DEPARTMENT OF ENERGY. *Biogas opportunities roadmap*. Ago. 2014. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/Biogas%20Opportunities%20Roadmap%208-1-14_0.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2018.

Anexo 1 – Composição do biogás e correspondência energética

O biogás apresenta uma composição de gases que estão presentes em diferentes quantidades, dependendo principalmente da sua fonte de origem, com a seguinte composição média:

Propriedades do biogás de fermentação anaeróbica

Substância	% no biogás de fermentação anaeróbica
Metano	50%-85%
Dióxido de carbono	15%-50%
Nitrogênio	0%-1%
Oxigênio	0,01% – 1%
Hidrogênio	Traços
Amônia	Traços
Siloxanos	0 mg/m ³ -5 mg/m ³

Fonte: OIES - THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES. Biogas. A significant contribution to decarbonising gas markets? Energy Insight, n. 15, 2017. Disponível em: <<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/06/Biogas-A-significant-contribution-to-decarbonising-gas-markets.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

Anexo 2 – Evolução do ambiente regulatório

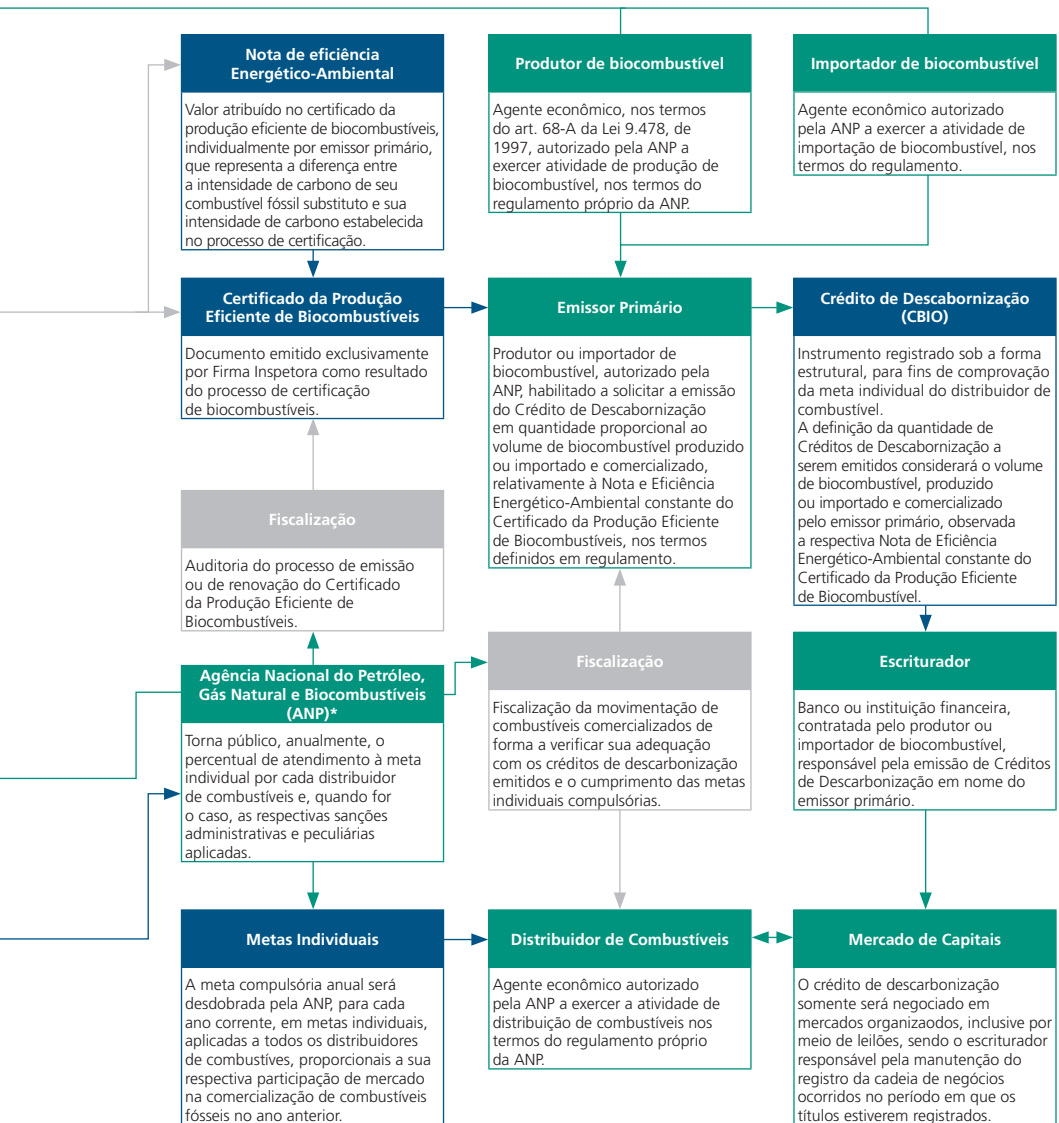


Fonte: EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017.

Anexo 3 – Subsídios do estado da Califórnia

Tipo do projeto	Subsídio estadual	Custos de infraestrutura	Eletricidade/ MWh	Frota de veículos	Padrão de gasoduto	Valor de crédito Low Carbon Fuel Standard
Gás de aterro	Não	Baixo	\$ 70	Caminhões de lixo	Muito difícil	Pequeno a médio
Biogás de laticínios	US\$ 100 milhões	Alto	\$ 180	Não	Moderado	Muito alto
Tratamento de água	Possível	Pequeno	\$ 127	Nenhuma, exceto de colocalização	Moderado	Médio
Restos de alimentos	US\$ 40 milhões	Alto	\$ 127	Algumas	Moderado	Alto
Resíduo da agricultura	US\$ 7 a US\$ 10 milhões	Alto	\$ 180	Não	Inexistente	Desconhecido
Resíduos florestais	Possível	Alto	\$ 199	Não	Ainda inexistente	Provavelmente alto
Conexão a gasoduto	US\$ 40 milhões					
Caminhões de gás natural	Até US\$ 180 milhões					

Fonte: LEVIN, J. *2^o generation bioenergy projects in CA*. In: FORUM BIOGAS, Universidade de São Paulo. Apresentação. São Paulo, nov. 2017.



Fonte: EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017.)

