

BIOGÁS: EVOLUÇÃO RECENTE E POTENCIAL DE UMA NOVA FRONTEIRA DE ENERGIA RENOVÁVEL PARA O BRASIL

Artur Yabe Milanez

Guilherme Baptista da Silva Maia

*Diego Duque Guimarães**

Palavras-chave: Biogás. Potencial energético. Energia renovável.

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

BIOGAS: RECENT EVOLUTION AND POTENTIAL OF A NEW FRONTIER FOR RENEWABLE ENERGY IN BRAZIL

Artur Yabe Milanez

Guilherme Baptista da Silva Maia

*Diego Duque Guimarães**

Keywords: Biogas. Energy potential. Renewable energy.

* Respectively, sectoral manager and economists from the Biofuels and Agrofood Complex Department of BNDES's Industry, Service and Foreign Trade Unit.

Resumo

Conhecido há muitos anos, o processo de produção de biogás utilizando resíduos e efluentes agropecuários, passou por inúmeros reveses em sua implementação no Brasil. Contudo, mais recentemente, a evolução tecnológica e a difusão do conhecimento técnico no setor têm levado a uma rápida expansão no número de plantas em operação e, conseqüentemente, no volume de biogás produzido. Embora auspicioso, o crescimento recente ainda é bastante tímido diante do potencial de geração que um país com um agronegócio tão desenvolvido pode atingir. Por suas características, a geração de biogás depende de uma série de fatores, como o tipo de resíduo utilizado, a quantidade de metano, a qualidade do biodigestor, entre outros. Esse montante de variáveis leva a distintas estimativas quanto ao potencial de geração do biogás. Este artigo busca contribuir nesse debate, apresentando algumas estimativas desse potencial.

Abstract

Known for many years, the biogas production process using agricultural waste and effluents has suffered numerous setbacks in its implementation in Brazil. However, more recently, technological developments and the spread of technical knowledge in the sector have led to a rapid expansion in the number of plants in operation and, therefore, in the volume of biogas produced. Although auspicious, the recent growth is still rather timid in view of the potential of generation that a country with such a developed agribusiness can achieve. Due to its characteristics, the generation of biogas depends on a series of factors such as the type of waste used, the amount of methane, the quality of the biodigester and others. This number of variables leads to different estimates regarding the potential for biogas generation. This article seeks to contribute to this debate, presenting some estimates of this potential.

Introdução

O biogás tem a matéria-prima de sua produção nas biomassas (resíduos orgânicos), notadamente os resíduos sólidos urbanos e da produção agropecuária, aí compreendidos vinhaça, palha e bagaço de cana, caroço de algodão e dejetos de animais (bovinos, suínos, aves etc.). A produção do biogás, quando este deriva de atividades agropecuárias, é também um fator de segurança energética, pois diminui as dificuldades de atendimento da demanda por energia elétrica em áreas distantes, do meio rural.¹

Como é sabido, o biogás é resultante da digestão anaeróbica de diversos organismos microbianos. Nessa digestão, matérias orgânicas complexas transformam-se em compostos simples, como metano e dióxido de carbono, liberando alguns resíduos, como amônia, sulfeto de hidrogênio e fosfatos (COSTA, 2006).

Em linhas gerais, esse processo envolve três etapas: fermentação, acetogênese e metanogênese. Na primeira fase, há a conversão de matéria orgânica em células menores e sua posterior transformação em ácidos solúveis e outros compostos. Na segunda, esses produtos são convertidos em ácidos acéticos, hidrogênio e dióxido de carbono. Finalmente, na terceira fase, ocorre a formação do metano.

As características do biogás dependem da temperatura, pressão, concentração de metano e outros gases inertes e/ou ácidos. É importante

1 A produção e as aplicações do biogás são tratadas aqui sumariamente. Essas questões foram aprofundadas anteriormente em Milanez e outros (2018).

ressaltar esses pontos, pois o potencial energético do biogás está diretamente relacionado com a concentração de metano existente na mistura gasosa.

Teoricamente, é possível estimar a produção de metano por meio da estequiometria da digestão anaeróbica. Contudo, na prática, a produção efetiva costuma ser menor do que a estimada. Isso ocorre porque há diversas perdas associadas ao processo, decorrentes, por exemplo, da dispersão de parte do gás para a atmosfera. Dessa forma, para se calcular com maior precisão o potencial energético do biogás, é fundamental ter uma boa estimativa das perdas de metano associadas ao processo produtivo (SOUZA, 2010).

O Brasil, com sua pujante agropecuária, tem alto potencial de aproveitamento dos resíduos agropecuários na produção de biogás e, conseqüentemente, alto potencial de geração de energia. O biogás é aproveitado principalmente de três formas: na geração de energia térmica, na produção de energia elétrica e na produção de biometano.

O uso mais tradicional do biogás é sua queima para geração de calor em caldeiras ou em sistemas de aquecimento em geral. A maior dificuldade para sua utilização está na presença de gás sulfídrico (H_2S), que aumenta a corrosão, reduzindo a vida útil da máquina; e do dióxido de carbono (CO_2), que reduz seu poder calorífico. Esses problemas podem ser contornados por meio de revestimentos com materiais resistentes à corrosão e da instalação de purgadores e linhas de condensação (ARAÚJO; FEROLDI; URIO, 2014).

A purificação do biogás leva ao biometano, combustível gasoso com alto teor de metano que, por suas características, é intercambiável com o gás natural veicular (GNV) em todas as suas aplicações. O processo de purificação consiste essencialmente em isolar o metano (CH_4) de

outras substâncias, resíduos e impurezas. Há vários processos com distintas vantagens e desvantagens, entre os quais, os mais comuns são a purificação por membranas, a purificação criogênica, a purificação por absorção, a purificação biológica e a lavagem por água (SILVA, 2017). A qualidade do biometano proveniente de resíduos agropecuários é regulamentada pela Resolução ANP 8/2015.

Na conversão para energia elétrica, o biogás é transformado em energia mecânica por combustão controlada. A energia mecânica ativa um gerador que produz a energia elétrica. Há várias tecnologias disponíveis, no entanto, as mais utilizadas são as turbinas a gás e os geradores de combustão interna.

Nas turbinas a gás, um compressor eleva a pressão do ar, injetando-o na câmara de combustão. O oxigênio queima o biogás, liberando energia para o acionamento da turbina que, por sua vez, aciona o gerador de eletricidade. Microturbinas têm o mesmo princípio de funcionamento, mas a potência do gerador está limitada a 250 KW.

Os motores a combustão interna também realizam a transformação de uma reação química em energia mecânica. Tal processo se dá por ciclos termodinâmicos que envolvem a expansão, compressão e alteração na temperatura dos gases. Esses motores podem ter ignição por centelha (ciclo Otto) ou por compressão (*diesel*) e os mais comuns utilizam dois e quatro tempos, ou seja, o ciclo termodinâmico se completando, respectivamente, a cada uma ou duas voltas do eixo.

As potencialidades do biogás como fonte de energia renovável em um país com uma enorme produção agropecuária são claramente gigantes. Contudo, por suas diversas peculiaridades, há sempre dúvidas sobre o real potencial energético do biogás no Brasil. Este artigo busca contribuir nesse debate buscando ter um panorama das estimativas

desse potencial. Para tanto, foi organizado, além desta introdução, em quatro seções. Na próxima, é elaborado um breve histórico do biogás e seu atual estágio no país. Na terceira seção, é realizada uma resenha sobre as principais estimativas da produção de biogás, com destaque para as estimativas agregadas da Associação Brasileira do Biogás (ABiogás). Na quarta seção, são apresentadas as possibilidades de fomento pelo BNDES e algumas sugestões de políticas públicas. Por fim, são tecidos alguns comentários finais.

O biogás no Brasil

O biogás começa a ganhar impulso no Brasil a partir dos choques no preço do petróleo promovidos pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (Opep), na década de 1970. Como o país, à época, importava cerca de 80% de seu consumo interno, buscou-se incrementar o uso de energias alternativas. O biogás era considerado uma alternativa viável para a diminuição de derivados de petróleo na matriz energética.

Em 1977, foi criado o Projeto de Difusão do Biogás, no âmbito da Empresa Brasileira de Tecnologia e Extensão Rural (Emater), executado no estado de São Paulo e no Distrito Federal. A ausência de mão de obra especializada dificultou o atingimento dos objetivos do programa (KARLSSON *et al.*, 2014).

Em 1982, o Governo Federal passou a estimular a construção de biodigestores, no bojo do Programa de Mobilização Energética (PME) – Decreto 87.079, de 2 de abril de 1982 – usando materiais simples e de baixo custo. Embora a Emater do Paraná tivesse estimado que havia cerca de três mil biodigestores em operação no Brasil até 1984, foram

inúmeras as dificuldades encontradas para difundir o uso do biogás. Faltava conhecimento técnico sobre a construção e operação dos biodigestores. A ausência de equipamentos devidamente projetados levava à adaptação de equipamentos, acarretando baixa durabilidade, baixa eficácia e custo elevado. Essas dificuldades levaram à perda de confiança nos sistemas de produção de biogás e ao progressivo abandono do uso de biodigestores (CIBIOGÁS, 2020).

O biogás voltou ao foco nos anos 1990, dessa vez impulsionado pela questão ambiental, que passou a ocupar o centro das discussões sobre o aquecimento global e as mudanças climáticas decorrentes das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A queima do biogás foi vista como uma forma de reduzir os GEE, por meio de projetos inseridos no chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que possibilitava a venda de créditos de carbono gerados no processo.² Vale ressaltar que o biogás não necessariamente era aproveitado como fonte de energia, bastando ser queimado em um *flare*. Nesse mercado, os produtores rurais não estavam integrados ao processo, sendo apenas fornecedores da biomassa em troca de uma percentagem da venda dos créditos. Como o processo não se sustentava economicamente, mais uma vez a biodigestão foi gradualmente abandonada (MARIANE, 2018).

Ressalte-se que, no caso anterior, desperdiçava-se uma das principais vantagens do biogás, que é sua ação sobre as emissões de GEE em duas frentes distintas. Como visto em Milanez e outros (2018), primeiramente a produção de biogás mitiga a emissão de gases (principalmente metano e CO₂), oriundos da degradação da biomassa não aproveitada, por meio da queima do metano. Mas, sua transformação em energia térmica,

2 O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo é o procedimento de outorga e aprovação de projetos que geraram créditos de carbono no mercado internacional. Implementado pelo Protocolo de Kyoto, buscava auxiliar na promoção do desenvolvimento sustentável das nações.

elétrica ou biometano possibilita a substituição de combustíveis fósseis no processo produtivo agroindustrial, gerando uma redução adicional nas emissões de GEE. O resultado final pode ser uma pegada negativa de carbono.

A despeito de suas vantagens enquanto fonte renovável de energia, o histórico de reveses do biogás no Brasil criou uma dificuldade reputacional que só foi superada recentemente, em virtude do aprimoramento tecnológico e da ampliação da capacitação técnica do setor.

De fato, inicialmente, utilizavam-se biodigestores convencionais que operavam com cargas orgânicas reduzidas e não retinham grandes quantidades de biomassa. Além disso, em geral, eram construídos com materiais de baixo custo, o que ocasionava diversos problemas de operação e manutenção. Com o desenvolvimento tecnológico, não apenas esses equipamentos rudimentares foram sendo descartados e substituídos por equipamentos mais aprimorados, como também foram sendo desenvolvidos biodigestores de alta taxa, isto é, equipamentos de alto rendimento caracterizados por dispositivos que retêm grande quantidade de biomassa (SANTOS, 2019).

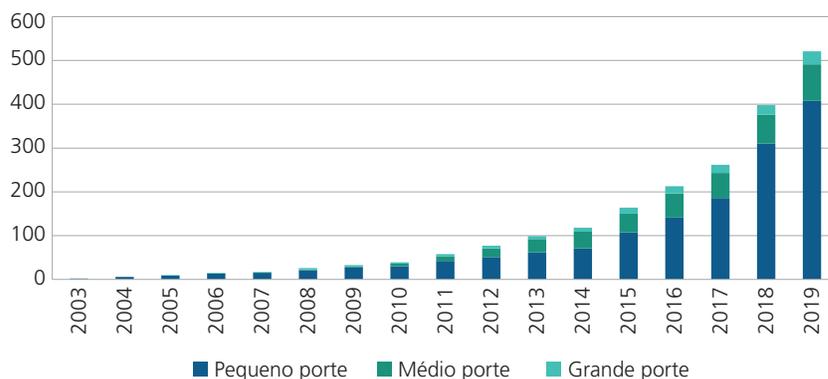
O desenvolvimento de equipamentos específicos, de alta performance, desenhados para atender a situações concretas, em muito se beneficiou de experiências no exterior, notadamente na Alemanha e na Califórnia (Estados Unidos da América). O conhecimento técnico e a capacitação operacional foram se ampliando com base em incentivos que os governos locais concediam para a produção de biogás.

Um novo estímulo à expansão do biogás no Brasil veio com a implementação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) – Lei 10.438, de 26 de abril de 2002, e Lei 10.762, de 11 de novembro de 2003 – que objetivava ampliar a geração de

energia elétrica por meio de pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e das fontes eólica e biomassa, em conformidade com a redução nas emissões de CO₂ previstas no Protocolo de Kyoto. No que se refere especificamente à biomassa, a tarifa fixada pelo Proinfa ficou aquém do que os investidores esperavam, o que resultou, no primeiro leilão, em uma contratação de apenas cerca de 60% dos megawatts reservados ao setor sucroalcooleiro.

A instituição da geração distribuída, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), foi um impulso adicional à biodigestão, pois o excedente de energia elétrica gerado nas propriedades rurais passou a poder ser inserido nas redes de distribuição. Como resultado desses diversos fatores, a instalação de plantas de biogás, de todos os portes, ganhou um grande impulso nos últimos anos, como pode ser visto no Gráfico 1.

Gráfico 1 | Plantas de biogás em operação por porte



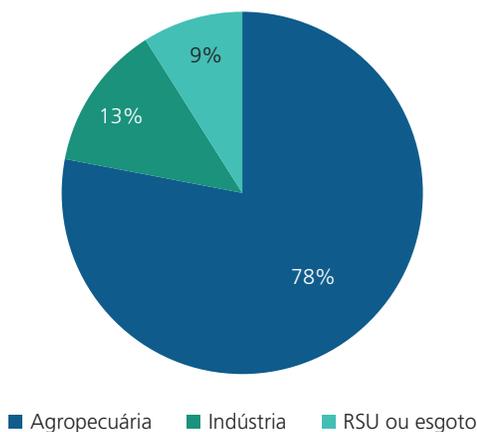
Fonte: Elaboração própria, com base em dados da Cibiogás, disponíveis em: <https://cibiogas.org/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

Segundo dados da Cibiogás, em 2019 havia 521 plantas de geração de biogás em operação no país, 15 em fase de implementação e 12 sendo

reformadas ou reformuladas. Juntas, elas são capazes de gerar um volume de cerca de 1,8 bilhão de m³ de biogás.

Quando se observam as fontes de substratos utilizadas pelos sistemas de biodigestão no Brasil, fica clara a prevalência de substratos de origem agropecuária na produção de biogás, como se observa no Gráfico 2. Contudo, embora os substratos agropecuários sejam majoritários, as plantas de biogás que os utilizam são responsáveis por apenas 12% do volume total de biogás produzido. A maior parte de biogás gerado, cerca de 76% do volume total, tem origem nas plantas que processam resíduos sólidos urbanos ou efluentes das estações de tratamento de esgoto. Os 12% restantes são produzidos por resíduos da indústria.

Gráfico 2 | Frequência de plantas de biogás por fonte de substrato



Fonte: Elaboração própria, com base em dados da Cibiogás, disponíveis em: <https://cibiogas.org/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

No que se refere à aplicação energética, o maior volume de biogás produzido, cerca de 1,16 bilhão de m³ por dia, representando 86% do total, é utilizado na geração de energia elétrica. Os principais usos são discriminados na Tabela 1.

Tabela 1 | Classificação por aplicação energética do biogás no Brasil em 2019

Aplicação	Volume de biogás (mil Nm ³ /d)	Participação na produção total (%)
Energia elétrica	1.168	86
Energia térmica	132	10
GNR/biometano	37	3
Energia mecânica	7	1

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da Cibiogás, disponíveis em: <https://cibiogas.org/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

A análise dos dados existentes sobre a produção de biogás no Brasil, em especial o volume produzido por meio da utilização de resíduos agropecuários, *vis-à-vis* à produção do agronegócio brasileiro, permite intuir o imenso potencial ainda inexplorado de utilização dessa fonte de energia renovável. Há diversos estudos que tentaram quantificar esse potencial. Alguns buscaram definir potenciais teóricos, construídos por meio da definição de parâmetros de cálculo. Outros tentaram, com base em experimentos empíricos, extrair os volumes produzidos de substratos distintos. Em comum, está a tentativa de se quantificar as possibilidades de produção do biogás utilizando biomassas diversas. Esse é objeto da próxima seção.

Estimativas de potencial de oferta de biogás de resíduos agroindustriais

Os gases produzidos pela digestão anaeróbica, em especial o metano, além de terem grande potencial energético, produzem uma energia limpa, renovável, capaz de reduzir as emissões de CO₂. Como há grande flexibilidade no tamanho e escala dos biodigestores, existe um enorme potencial para a geração compartilhada de energia elétrica. Com isso, o

produtor agropecuário ganha em estabilidade, pois há maior previsibilidade dos gastos em energia e menor risco de instabilidade e interrupção no fornecimento de energia.

No entanto, os ganhos ambientais não se restringem às emissões de carbono, sendo significativamente maiores quando se levam em conta outros aspectos no manejo de resíduos do processo produtivo. Os efluentes, como a vinhaça na produção de etanol ou resíduos sólidos decorrentes da produção pecuária, têm outros efeitos deletérios sobre o meio ambiente. A contaminação do solo, dos lençóis freáticos e dos rios representam ameaças à manutenção de recursos naturais essenciais à nossa sobrevivência e à fauna e flora locais. A utilização dos efluentes nos biodigestores para produção de energia reduz o potencial poluente e riscos sanitários decorrentes do processo produtivo e, uma vez que a biodigestão não remove os nutrientes encontrados nos efluentes, não prejudica a utilização dos resíduos como fertilizantes na agricultura.

A despeito de suas inúmeras vantagens, permanece a dúvida sobre o potencial energético do biogás gerado por resíduos sólidos orgânicos. Isso acontece por vários motivos, relacionados principalmente ao tipo de biomassa utilizada na biodigestão.

O tipo de resíduo determina o potencial efetivo de geração de biogás, isto é, o potencial químico de cada substrato é fundamental na determinação desse potencial energético. Cada substrato tem sua composição química alterada por vários fatores. Tomem-se as frutas como exemplo: espécies diferentes têm diferentes substratos que, ademais, são afetados pelo processo de amadurecimento da fruta. Dejetos animais, por sua vez, podem ser afetados por contaminantes, como antibióticos, usados na criação desses animais.

Embora o potencial energético de distintos substratos só possa ser realizado por meio da obtenção de amostras específicas do material que será utilizado na biodigestão, há estimativas mais genéricas que são elaboradas por diversas instituições, públicas e privadas, que permitem ter uma ideia geral desse potencial. A Tabela 2 apresenta, por exemplo, as estimativas para diversos substratos elaboradas pela Agência de Recursos Renováveis Alemã, a Fachagentur Nachwachsende Rohstoff e.V. (FNR). Note-se que se referem aos principais substratos utilizados na Alemanha.

Tabela 2 | Geração de biogás em alguns substratos

Substrato	Massa seca orgânica (MSo)	Produção de biogás	Produção de metano	Quantidade de metano
	%MSo	Nm ³ /ton substrato	Nm ³ /ton substrato	Nm ³ /ton MSo
Esterco líquido bovino	75 a 82	20 a 30	11 a 19	110 a 275
Esterco líquido suíno	75 a 86	20 a 35	12 a 21	180 a 360
Esterco bovino	68 a 76	60 a 120	33 a 36	130 a 330
Esterco de aves	75	130 a 270	70 a 140	200 a 360
Silagem de milho	85 a 98	170 a 230	89 a 120	234 a 364
Silagem de gramíneas	70 a 95	170 a 200	93 a 109	300 a 338
Grãos de cereais	97	620	320	380
Beterraba-sacarina	90	120 a 140	65 a 76	340 a 372
Beterraba-forrageira	90	75 a 100	40 a 54	332 a 364

Fonte: Portal do Biogás [20??].

É importante destacar que há muita variação nas metodologias empregadas pelas diversas instituições para estimar o potencial energético do biogás, resultando em diferentes valores para o mesmo substrato. Além disso, como foi dito, as perdas associadas ao processo de biodigestão levam a uma expressiva oscilação na quantidade de metano, como pode ser observado na Tabela 2.

Há uma grande variedade de biomassas utilizadas na produção de biogás. Cada localidade ou país tem uma especialização produtiva que define uma quantidade de rejeitos que tornam determinada biomassa mais abundante. Além disso, há um custo de oportunidade em se utilizar uma biomassa em função de seus possíveis usos alternativos. Com o intuito de entender melhor o potencial energético do país na geração de biogás, serão analisadas as duas principais fontes de biomassa da agropecuária brasileira.

Principais resíduos animais

Sabidamente, o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de proteína animal no mundo. A comparação com os dados do U.S. Department of Agriculture (USDA), que sistematiza as principais estatísticas de produção e exportação dos países no mundo, permite observar como o Brasil se destaca entre seus competidores internacionais.

Os números das três principais carnes produzidas no Brasil são ilustrativos: carne de frango, carne suína e carne bovina. No que se refere à carne de frango, o país produziu, em 2019, cerca de 13,6 milhões de toneladas, permanecendo como o maior exportador mundial, com 3,7 milhões de toneladas. Já em relação à carne bovina, o Brasil possui o maior rebanho do mundo e é o maior exportador, tendo produzido 10,1 milhões de toneladas e exportado cerca de 1,9 milhão de toneladas em 2019. Por fim, são produzidas 3,9 milhões de toneladas de carne suína e, embora a produção brasileira se destine essencialmente ao consumo interno, o país é o quarto maior exportador, com cerca de 9,2% das exportações mundiais (cerca de 800 mil toneladas). Com esses números, pode-se intuir o tamanho do potencial energético da produção de biogás com base em resíduos animais.

O potencial de geração de biogás utilizando dejetos produzidos pela avicultura de corte e pela avicultura de postura foi avaliado por diversos autores. Zanini e outros (2015) procuraram estimar a produção de biogás com base nesses dejetos em um conjunto de municípios no noroeste do Rio Grande do Sul. O rebanho da região foi estimado em 34 milhões de aves de corte e 4,8 milhões de aves de postura.

Os autores avaliaram que a estimativa da quantidade de dejetos por unidade animal (UA) deve levar em conta o peso inicial e final da ave, bem como o tempo de permanência no confinamento. Para aves de corte, considerou-se 47 dias e, para aves de postura, 365 dias de confinamento. Com base na estimativa de 0,18 kg/dia por UA, os autores calcularam que seria possível produzir cerca de 55 milhões de m³ de biogás com as aves de corte e 9,9 milhões de m³ de biogás com as aves de postura, o que equivale a 59,7 KWh em energia elétrica, suficiente para abastecer 24,9 mil residências com consumo médio de 200 KW.

A produção de biogás na suinocultura utiliza, em geral, resíduos diluídos em água de lavagem, o que é conhecido como chorume. A conversão do chorume em biogás depende principalmente da biodegradabilidade da matéria orgânica, da eficácia da conversão do biodigestor e da fração de matéria orgânica utilizada pelas bactérias em seu crescimento. Além disso, há outros fatores, como a temperatura, posto que influencia a atividade biológica dos micro-organismos envolvidos na biodigestão.

Souza e outros (2004) realizaram um exercício, de acordo com o qual, partindo do pressuposto de que suínos produzem cerca de 72 litros de chorume por dia, seria possível estimar a produção de 0,775 m³ diários de biogás por animal. Para efeito de geração de energia elétrica, os autores

consideraram a eficiência de conversão de cerca de 25% utilizando-se de geradores de ciclo Otto e um poder calorífico de 6,5 KWh/m³.

Coldebella e outros (2008), ao avaliarem a viabilidade da geração de energia elétrica por meio do biogás, chegaram a estimativas ligeiramente distintas. Tomando por base uma propriedade com uma unidade produtora de leitões em Toledo (PR), com cerca de mil matrizes e cinco mil leitões, concluíram que os suínos geraram entre 60 e 85 litros de chorume nas três unidades de referência, isto é, porca reprodutora em ciclo fechado, porca reprodutora em criação de leitões e porca em exploração de engorda. Com base nos valores gerados de chorume nas três unidades de referência, foi possível estimar uma produção diária por animal de 0,799 m³ de biogás na exploração de engorda, 0,866 m³ de biogás na criação de leitões e 0,933 m³ de biogás no ciclo fechado.

Em um estudo mais detalhado, Mito e outros (2018) elaboraram um amplo levantamento bibliográfico dos trabalhos que buscaram avaliar o volume de dejetos produzido por suínos e bovinos confinados e as principais metodologias existentes para estimar o potencial de produção de biogás e biometano com esses resíduos. Os potenciais teóricos foram cotejados com os resultados efetivos obtidos em uma propriedade situada em São Miguel do Iguazu (PR), utilizada como unidade de observação real.

No levantamento realizado, a produção de efluentes apresentou dados muito variáveis, pois o volume de água utilizada depende do manejo utilizado na propriedade. No caso dos suínos foi necessário sistematizar os dados de acordo com cada categoria de animal (leitão creche, crescimento e terminação, matriz fêmea, maternidade, matriz macho) e com os sistemas de produção (ciclo completo, crechário, unidade produtora

de leitões, unidade produtora de leitões desmamados e unidade de crescimento e terminação).

Para as categorias de suíno, os autores optaram por adotar os valores mais validados pela literatura, que seriam os apresentados nos trabalhos de Oliveira (1993) e Tavares (2016). Esses valores são expostos na Tabela 3.

Tabela 3 | Produção diária de efluentes para categorias de suínos

Categoria	Oliveira (1993) Litros animal/dia	Tavares (2016) Litros animal/dia
Leitão creche	1,4	1,6
Crescimento e terminação	7,0	4,5
Matriz fêmea	16,0	-
Maternidade	27,0	-
Matriz macho	9,0	-

Fonte: Elaboração própria, com base em Oliveira (1993 *apud* Mito e outros, 2018) e Tavares (2016 *apud* Mito e outros, 2018).

Já para os sistemas de produção, os valores médios encontrados na literatura para a produção de efluentes em litros por animal/dia foram os seguintes: ciclo completo, 90,9; unidade produtora de leitões, 54; e unidade de crescimento e terminação, 10,28 (TAVARES, 2016 *apud* MITO *et al.*, 2018).

No caso da produção de efluentes, em sistemas de produção confinados, para bovinos de corte e bovinos de leite, os valores médios obtidos foram, respectivamente, 34,8 litros por animal/dia e 57,7 litros por animal/dia (TAVARES, 2016 *apud* MITO *et al.*, 2018).

Para a estimativa teórica do potencial de biogás, os autores adotaram as metodologias de Chen (1983), Intergovernmental Panel on Climate Change – (IPCC) (2006) e Kunz e Oliveira (2006), que determinam o volume de metano. O valor estimado de biogás foi obtido

considerando-se que o metano representa cerca de 60% do biogás. Utilizaram ainda a metodologia do Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS-ER, 2009).

Essas metodologias utilizam importantes parâmetros, como os sólidos voláteis e a capacidade máxima de produção de biogás por dejetos. Sólidos voláteis se referem à fração dos sólidos totais que será fermentada no biodigestor produzindo biogás. Quanto maior for a fração de sólidos voláteis presente na biomassa, maior será a produção de biogás para uma dada eficiência do biodigestor.

Os valores médios, obtidos com base na pesquisa bibliográfica, para a concentração de sólidos voláteis e para a produção de metano pelos dejetos, de acordo com os animais, são apresentados na Tabela 4.

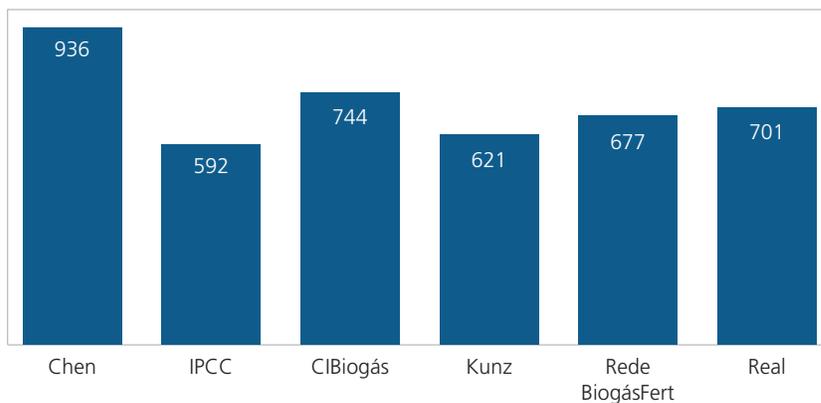
Tabela 4 | Valores médios de sólidos voláteis (SV) e produção de metano (B), por espécie

Categoria	SV (g_{sv}/L)	B (m³CH₄/kg_{sv})
Suíno	35,38	0,38
Bovino de leite	50,54	0,15
Bovino de corte	51,41	0,17

Fonte: Elaboração própria, com base em Mito e outros (2018, p. 38-40).

Por fim, com o intuito de demonstrar os diferentes resultados obtidos com base em parâmetros e metodologias diferentes, os autores estimaram a produção de biogás usando o número de animais da unidade produtiva de São Pedro Colombari, isto é, cinco mil cabeças. Além das quatro metodologias citadas anteriormente, foi feita outra estimativa com parâmetros selecionados baseada em Chen (1983), que se denominou Rede BiogásFert. Os resultados foram comparados com a vazão média real de biogás, monitorada durante o período de estudo na unidade. Os resultados podem ser observados no Gráfico 3.

Gráfico 3 | Estimativas de produção de biogás (m³/dia)



Fonte: Elaboração própria, com base em Mito e outros (2018).

Note-se que a metodologia de Chen (1983), utilizando os parâmetros originais e outros selecionados (Rede BiogásFert), altera substancialmente os valores teóricos estimados de biogás. No entanto, a seleção desses parâmetros gerou o resultado teórico mais próximo do efetivo gerado na propriedade, mostrando-se bastante realista. Por outro lado, deve-se lembrar que as instalações e o manejo dos dejetos interferem na quantidade e na qualidade dos efluentes, sendo a geração de biogás sempre influenciada pelo teor vigente de sólidos voláteis (MITO *et al.*, 2018).

As demais atividades de produção animal também geram resíduos aproveitáveis na produção de biogás. Quadros e outros (2010), em um experimento controlado na Bahia com ovinos e caprinos, constatou que a produção de biogás atingiria cerca de 0,061 m³ de biogás por quilo de esterco dos animais. No entanto, esses valores podem variar muito em função da temperatura, alimentação e manejo dos animais.

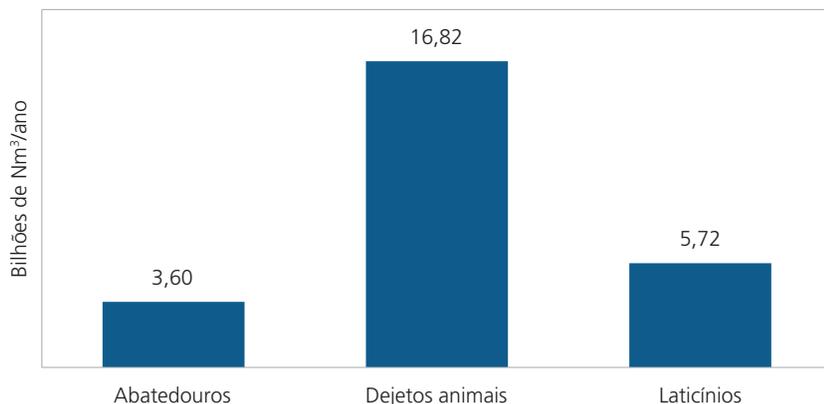
A ABiogás vem, desde 2015, aprimorando uma metodologia que lhe permita estimar, com a maior precisão possível, o potencial brasileiro

na produção de biogás. Assim, busca-se estimar qual seria o volume de biogás produzido se todo o potencial do país fosse efetivamente explorado.

A ABiogás divide a estimativa do potencial de produção de biogás em setores, um dos quais é a agroindústria. Nesse setor, estão incluídos os resíduos animais, isto é, os dejetos das diversas criações de animais, sejam de abatedouros ou de laticínios. Cabe destacar que os valores estimados buscam apresentar o maior potencial técnico possível para cada resíduo, tendo como referência modelos de negócio reais, disponibilizados por empresas associadas.

Foram assumidas algumas premissas, de acordo com o substrato, para uma série de variáveis, como geração e aproveitamento de resíduos, teor de matéria seca, teor de sólidos totais e sólidos voláteis e rendimento do biogás. Os valores estimados do potencial de biogás para o ano de 2019 encontram-se no Gráfico 4.

Gráfico 4 | Potencial de biogás a partir de resíduos e efluentes de animais (2019)



Fonte: Elaboração própria, com base em ABiogás (2020).

Resíduos de cana-de-açúcar

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção total de cana-de-açúcar na safra 2019-2020 foi de 642,7 milhões de toneladas. A grande maioria dessa produção é processada por cerca de 360 usinas em operação atualmente no país.

O setor sucroenergético, no qual se gera um grande volume de resíduos orgânicos, como a palha, o bagaço, a vinhaça e a torta de filtro, concentrados espacialmente em grandes unidades produtivas, é favorável à produção do biogás. De fato, o total produzido de biogás oriundo do setor sucroenergético foi de 45 mil Nm³ por dia, em 2018, segundo a Cibiogás.

Se for considerada somente a geração de energia elétrica por meio da biomassa, segundo o Sistema de Informação de Geração (Siga), da Aneel, o setor sucroenergético detém hoje em torno de 7,2% da potência outorgada no Brasil, com 11,7 GW, o que representa 77% do total da energia oriunda da biomassa.

A palha da cana-de-açúcar, que pode ser removida do campo sem prejuízo à produção – estima-se em 50% –, também tem alto potencial energético. Uma usina pode, por meio de suas características, mapear a quantidade de palha que será removida a cada safra, realizando, dessa forma, seu planejamento energético com base nesse substrato.

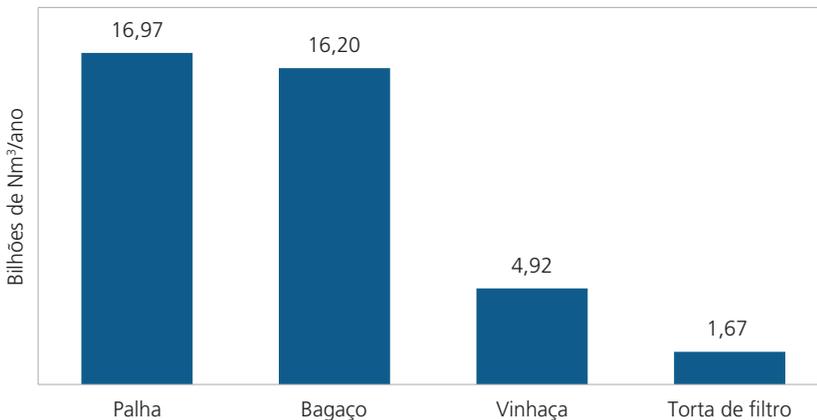
Tradicionalmente o bagaço de cana-de-açúcar é queimado diretamente em caldeiras para a produção de calor. Alternativa muito mais interessante, a biodigestão da celulose e hemicelulose por fermentação anaeróbica costuma produzir um biogás com alto teor de metano, elevando o potencial de geração de energia do setor sucroalcooleiro (PENTEADO *et al.*, 2018).

A vinhaça, subproduto da produção do etanol (a produção de um litro de etanol pode gerar até 18 litros de vinhaça) tem um alto potencial poluente do meio ambiente, podendo alterar as propriedades do solo e até mesmo contaminar os lençóis freáticos. Com a biodigestão anaeróbica, sua carga orgânica é diminuída, produzindo energia e reduzindo seus impactos ambientais.

A torta de filtro é proveniente da filtração do caldo extraído das moendas no filtro rotativo. Assim como a vinhaça, sua utilização tradicional é na forma de fertilizante para o canavial. O desenvolvimento tecnológico possibilitou sua utilização como substrato na produção de biogás.

A cana-de-açúcar, seja para a produção de açúcar, seja para a produção de álcool, tem uma série de subprodutos que podem ser utilizados na produção de biogás. As estimativas do potencial do setor sucroenergético por substrato elaboradas pela ABiogás são apresentadas no Gráfico 5.

Gráfico 5 | Potencial de biogás para cada resíduo e efluente do setor sucroenergético (safra 2019-2020)



Fonte: Elaboração própria, com base em ABiogás (2020).

Dentre as estimativas para o potencial energético do setor sucroalcooleiro, destacam-se as realizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que tem como uma de suas atribuições a responsabilidade de apurar e consolidar dados do setor energético, produzindo estatísticas sobre a oferta de energia no Brasil. A Tabela 5 traça um panorama da oferta potencial de biogás do setor no país ao longo desta década.

Tabela 5 | Potencial de biogás para o setor sucoenergético

	Unidade	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Cana processada	Mt	652,94	674,41	691,85	708,06	718,08	728,22	738,16	749,15	759,94	769,85
Projeção de etanol 1G	Mm ³	30,10	31,61	32,75	33,91	34,52	35,27	36,05	37,03	38,05	39,22
Biogás potencial PDE 2030	MNm ³	5.389	5.630	5.817	6.005	6.111	6.235	6.364	6.524	6.689	6.873
Biogás (quartil mais eficiente)	MNm ³	2.562	2.675	2.763	2.851	2.901	2.959	3.020	3.095	3.172	3.257

Fonte: Adaptado de EPE (2020).

Ressalte-se que as projeções na Tabela 5 se referem a valores de produção de biogás do setor sucoenergético considerando a possibilidade de produção para o grupo de usinas que efetivamente estejam aptas a concretizar o volume de investimento necessário ao longo dos próximos anos.

Mandioca, milho e soja

Dada a importância de algumas culturas na produção agrícola brasileira, a ABiogás considera que há outros resíduos e efluentes gerados que podem apresentar um grande potencial na produção de biogás. São decorrentes da produção e processamento da mandioca, milho e soja.

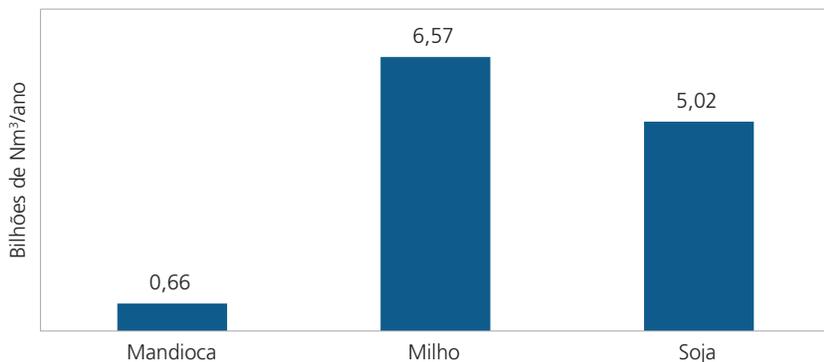
O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de mandioca, tendo a produção atingido um volume de 17,5 milhões de toneladas em 2019, segundo a pesquisa de Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE. O processamento da raiz da mandioca produz efluentes com elevados teores de biogás.

Em diversos países, o milho é um importante substrato para a produção de biogás. Segundo a Conab (2020), o Brasil atingiu uma produção de 102,5 milhões de toneladas em 2019, credenciando-se como um dos maiores produtores mundiais. A palha residual oriunda de sua produção tem um alto potencial energético.

A soja, principal produto do agronegócio brasileiro, que atingiu o volume recorde na safra 2019-2020 de 124,8 milhões de toneladas (Conab, 2020), é considerada um dos maiores potenciais de geração do biogás, obtido principalmente pela casca do grão, um excelente aliado na co-geração de resíduos com maior teor de umidade segundo a ABiogás.

Os potenciais de geração de biogás para a mandioca, o milho e a soja estimados pela ABiogás estão representados no Gráfico 6.

Gráfico 6 | Potencial de biogás a partir de resíduos e efluentes de mandioca, milho e soja – 2019



Fonte: Elaboração própria, com base em ABiogás (2020).

A Tabela 6 resume os potenciais de produção de biogás por segmento, inclusive para resíduos sólidos e saneamento, bem como os montantes de eletricidade e biometano que poderiam ser produzidos em virtude desses potenciais. Para efeito de comparação, o potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em cerca de 172 GW (EPE, 2020).

Tabela 6 | Potencial brasileiro de biogás e biometano por fonte em 2019

Origem	Volume biogás (bilhões de m³/ano)	Volume biometano (bilhões de m³/ano)	Geração elétrica equivalente (GW/ano)
Sucroenergético	39,76	21,06	85,17
Agroindustrial	38,39	19,55	72,10
Saneamento	6,84	2,62	10,28

Fonte: Elaboração própria, com base em ABiogás (2020).

O apoio do BNDES e políticas públicas

O BNDES vem apoiando o desenvolvimento de energias renováveis, incluindo o biogás, há muito tempo. Nos últimos dez anos, por exemplo, somente projetos de plantas de biogás de resíduos agropecuários receberam um total de investimentos de R\$ 566,8 milhões, dos quais, R\$ 369,3 milhões se destinaram a projetos de resíduos agroindustriais. Note-se que R\$ 339,3 milhões foram nos últimos três anos, em linha com a expansão recente do setor.

Tabela 7 | Projetos de biogás apoiados pelo BNDES

Empresa/ instituição	Descrição	Ano	Valor total do projeto (R\$ milhão)
Biogás de resíduos agroindustriais			
Geoenergética	Planta demonstração de produção de biogás utilizando resíduos da produção de etanol	2011	18,7
FAI/Ufscar e Algae	Planta piloto de biodiesel utilizando vinhaça para biodigestão e cultivo de microalgas	2011	3,2
Embaré Indústria Alimentícia	Ampliação da estação de tratamento de efluentes industriais e instalação de sistema de biodigestão visando a geração de biogás com base na matéria orgânica presente no efluente	2015	3,8
Faped/Embrapa/ Master Agropecuária	Desenvolvimento, implantação e validação de sistema biotecnológico modular de alta eficiência para tratamento de efluentes da suinocultura	2016	4,1
Empresa Agrícola	Implantação de um gerador a biogás e sistema de filtragem e purificação de biogás na fazenda São Bernardo no município de Patrocínio (MG)	2016	0,2
Raizen Geo Biogás	Construção de uma planta de produção de energia elétrica por meio da geração de biogás utilizando os subprodutos da produção de etanol e açúcar com capacidade de até 21 MW	2018	153,7
Copavel Cooperativa Agro	Expansão da Unidade de Produção de Leitões II (UPL II), localizada no município de Cascavel (PR) com aproveitamento do biogás de dejetos para geração de energia elétrica para consumo próprio	2019	46,0
Cocal Energia	Implantação de planta de biogás para produção de biometano e geração de energia elétrica por meio do uso de resíduos da produção de etanol e açúcar	2020	139,6
Total dos investimentos			369,3

(Continua)

(Continuação)

Empresa/ instituição	Descrição	Ano	Valor total do projeto (R\$ milhão)
Biogás RSU ou ETE			
Fundep, UFMG, Comlurb	Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos por meio de metanização anaeróbia “via seca”	2014	10,3
Usina Termelétrica UTE Minas do Leão	Usina com potência instalada de 8,6 MW movida a biogás de resíduos urbanos (Minas do Leão-RS)	2015	23,2
Usina Termelétrica UTE Termoverde Caieiras	Usina com potência instalada de 29,5 MW movida a biogás de resíduos urbanos (Caieiras-SP)	2015	78,3
UFC	Conversão de águas residuárias em biogás e lodo em estação de tratamento de esgoto para geração de energia	2016	3,4
CS Bioenergia	Construção de usina de biodigestão anaeróbia, para geração de biogás a ser integralmente empregado na geração de energia elétrica	2016	86,3
Total dos investimentos			201,5

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da carteira do BNDES em 2.9.2020.

Além de suas linhas mais tradicionais (Finem, Finame, BNDES Automático etc.), o BNDES tem apoiado projetos com impacto ambiental relevante, por meio de instrumentos como o Fundo Clima, linha bastante competitiva que opera com taxas de juros diferenciadas. Nesse caso, o BNDES pode financiar até 80% dos itens financiáveis, sendo o valor mínimo do financiamento de R\$ 3 milhões e o máximo, R\$ 30 milhões a cada 12 meses. O prazo pode atingir até 16 anos.

Vale lembrar que, durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21) da UNFCCC, o Brasil, tomando como base o volume de emissões 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. O país já vinha avançando no estabelecimento de uma Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), abrangendo diversos setores, quando houve a promulgação da Lei 12.187/2009, que buscou concretizar o desenvolvimento produtivo sustentável e se desdobrou em planos setoriais, os quais, por sua vez, estabeleceram indicadores, metas e ações específicas de redução das emissões de carbono.

Um desses planos setoriais dedicou-se à agropecuária. Trata-se do Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC). Estima-se que, atualmente, a atividade agropecuária seja responsável por cerca de 37% das emissões de CO₂ equivalente no Brasil.

Uma das principais formas de atuação do Plano ABC é o tratamento de dejetos e efluentes da produção agropecuária. Em especial, destaca-se a produção de biogás que, utilizando esses resíduos na biodigestão, provoca 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, garantindo a redução da emissão de GEE.

Segundo a ABiogás (2020), o potencial teórico total brasileiro de geração de biogás purificado equivaleria a aproximadamente 40,02 bilhões de litros de *diesel* por ano (1,08 m³ de biometano = 1,0 litro de *diesel*) o que, considerando o consumo de *diesel* informado no anuário de vendas da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), de 57,3 bilhões de litros, representa cerca de 70% de todo o *diesel* consumido no Brasil em 2019.

Uma dificuldade na utilização do Plano ABC para financiar novas plantas de biogás decorre das restrições impostas pelos limites de

financiamento individual, de R\$ 2 milhões, e coletivo, de R\$ 8 milhões, vigentes atualmente. Esses limites foram concebidos para garantir uma difusão maior dos recursos, permitindo que pequenos produtores tivessem acesso ao financiamento. No entanto, seria interessante, tendo em vista a otimização tanto do Programa ABC, quanto dos efeitos ambientais desejados, que esses limites fossem ampliados, permitindo o financiamento a projetos maiores. Há casos em que vários pequenos produtores só conseguem viabilizar a geração de biogás caso atuem conjuntamente, fornecendo seus dejetos orgânicos para um único biodigestor, operado por uma cooperativa ou consórcio.

Por outro lado, segundo a ABiogás (2020), a escala mínima para a produção de eletricidade renovável por meio de biogás é de 3 MW a 5 MW de potência e os investimentos mínimos necessários somam R\$ 20 milhões, bem acima dos valores hoje destinados aos empreendimentos individuais. Para unidades construídas com potência acima de 10 MW (tamanho ideal do ponto de vista econômico), a serem implementadas em cooperativas ou consórcios de produtores com elevada produção de resíduos, o valor requerido seria superior a R\$ 50 milhões.

A ampliação dos limites individual e coletivo teria ainda o benefício de potencializar a utilização dos recursos alocados na mitigação da emissão de GEE, sem comprometer o acesso dos pequenos e médios produtores. A observação dos efeitos nas safras dos anos seguintes permitiria o ajuste fino no aprimoramento do programa.

Ademais, atualmente, o Programa ABC apoia apenas investimentos na biodigestão de resíduos de origem animal, o que exclui boa parte do potencial do setor de biogás, majoritariamente oriundo de resíduos de origem vegetal, como no caso do setor sucroenergético. Portanto, seria oportuna a inclusão dos projetos de biodigestão de resíduos vegetais como elegíveis ao Programa ABC.

Cabe ainda lembrar que uma das principais oportunidades de mercado do biometano seria a substituição do *diesel* usado no setor agropecuário, em caminhões, tratores, colheitadeiras e outros maquinários agrícolas. Eventuais excedentes poderiam ser comercializados por meio da rede de gasodutos existentes ou atendendo a veículos urbanos ou rodoviários que circulam nas regiões não abrangidas pela rede de gasodutos.

Com o desenvolvimento tecnológico de caminhões, tratores e outros maquinários agrícolas movidos a gás, ampliaram-se as oportunidades para a substituição gradativa do *diesel* nas operações agropecuárias. Assim, para incentivar a aquisição de tratores e outros maquinários agrícolas movidos a gás, bem como sua fabricação no Brasil, e, indiretamente, os investimentos em biodigestão de resíduos nas propriedades agrícolas, poderiam ser incluídos os tratores e demais maquinários agrícolas movidos a biometano no Moderfrota, em uma faixa de menor custo, dadas suas externalidades benéficas ao meio ambiente, configurando assim um “Moderfrota verde”.

Comentários finais

O Brasil está acostumado a superlativos quando se fala em produção agropecuária. Quando não é o maior, está sempre entre os principais produtores ou exportadores de proteínas animais, grãos, açúcar etc. Esses processos produtivos sempre acarretaram a geração de uma imensa quantidade de resíduos que, a princípio, eram considerados um grande problema a ser resolvido. No entanto, esses resíduos podem ser vistos como uma gigantesca oportunidade para a geração de energia mais limpa e renovável.

A produção de biogás por meio da digestão anaeróbica desses resíduos é conhecida há bastante tempo no país, mas, por uma série de percalços

históricos, teve seu desenvolvimento postergado. Nos últimos anos, contudo, o desenvolvimento tecnológico aprimorou o conhecimento do potencial dos diversos substratos, difundiu o conhecimento técnico e levou à criação de equipamentos específicos, como biodigestores de alta taxa, muito mais eficientes e confiáveis. O resultado foi um aumento da confiança no processo e uma rápida expansão no número de plantas produtoras de biogás no país.

As vantagens do biogás são inequívocas. Do ponto de vista ambiental, o biogás é conhecido por ter uma pegada negativa de carbono, pois pode atuar tanto na redução da emissão de metano, com seu aproveitamento na geração de energia, como também na substituição de combustíveis fósseis no consumo de energia ao longo do processo produtivo da unidade de produção agropecuária.

Em um país com as dimensões territoriais do Brasil, a difusão e a transmissão de energia sempre foram um problema, em razão da magnitude dos investimentos demandados. Ao aproveitar os resíduos locais e utilizá-los para produzir energia elétrica ou biometano, os produtores rurais não só ganham independência, como também contribuem na oferta de energia, ao exportar o excedente para a rede na geração distribuída.

A produção de caminhões movidos a gás no Brasil, iniciada em 2020, aumenta sobremaneira o potencial de consumo de biometano. Os novos caminhões podem funcionar com GNV ou biometano, separadamente ou misturados no tanque, pois ambos têm praticamente a mesma composição química, sendo substitutos plenos. A ampliação de seu uso deverá contribuir decisivamente na redução de GEE.

Segundo a ABiogás (2020), o potencial total de energia elétrica correspondente à conversão do potencial de biogás bruto a ser produzido no Brasil é de cerca de 170,9 TWh/ano, equivalente a 35,4% da energia

consumida no país (482 TWh/ano, segundo a EPE). O potencial de *diesel*, por sua vez, correspondente à conversão do biogás purificado, representaria aproximadamente 70% do *diesel* consumido no país em 2019.

Com tamanho potencial, não é de espantar o crescimento acelerado das plantas produtivas de biogás observado nos últimos anos. No entanto, a produção total atual ainda é muito pequena comparativamente ao seu potencial. Ajustes nos programas de incentivos à geração e consumo de energia renovável poderiam contribuir decisivamente para o aproveitamento desse enorme potencial, ao qual alguns já se referem como o “pré-sal caipira”.

Referências

ABIOGÁS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. *O potencial brasileiro de biogás*. São Paulo (SP), 2020. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2020/11/NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf. Acesso em: 22 mar. 2021.

ARAÚJO, A. V.; FEROLDI, M.; URIO, M. B. Uso de biogás em máquinas térmicas. *Journal of Agronomic Sciences*, Umuarama, v. 3, n. especial, p. 274-290, 2014.

BRASIL, Presidência da República. *Decreto nº 87.079, de 2 de abril de 1982*. Aprova as diretrizes para o Programa de Mobilização Energética. Brasília, DF, 1982. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-87079-2-abril-1982-436644-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 22 mar. 2021.

BRASIL, Presidência da República. *Lei 10.438, de 26 de abril de 2002*. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica., dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A,

de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Brasília, DF, 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/110438.htm. Acesso em: 22 mar. 2021.

BRASIL, Presidência da República. *Lei 10.762, de 11 de novembro de 2003*. Dispõe sobre a criação do Programa Emergencial e Excepcional de Apoio às Concessionárias de Serviços Públicos de Distribuição de Energia Elétrica, altera as Leis nos 8.631, de 4 de março de 1993, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Brasília, DF, 2003. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/L10.762.htm. Acesso em: 22 mar. 2021.

BRASIL, Presidência da República. *Lei 12.187, de 29 de dezembro de 2009*. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, DF, 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12187.htm. Acesso em: 22 mar. 2021.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. *Agricultural Wastes*, West Bengal (Índia), v. 8, n. 2, p. 65-81, 1983.

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – BIOGÁS. *Manual de equações e metodologias do simulador*: plataforma de informações para energias renováveis. Foz do Iguaçu, 2009.

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro. [201?]. Disponível em: <https://cibioogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro>. Acesso em: 2 out. 2020.

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. *Nota técnica: Nº 002/2010 – Panorama do Biogás no Brasil em 2019*. Foz do Iguaçu, abr. 2020. Disponível em: <https://biblioteca.cibioogas.org/biblioteca/notatecnica/pdf/panorama-do-biogas-no-brasil-em-2019.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.

COLDEBELLA, A. *et al.* Viabilidade da geração de energia elétrica através de um motor gerador utilizando biogás na suinocultura. *Informe Gepec*, Toledo (PR) v. 12, n. 2, p. 44-55, jul./dez. 2008.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 7 – Safra 2019/20 – Décimo segundo levantamento*. Brasília, set. 2020.

- COSTA, D. F. *Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto*. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Cenários de Oferta de Etanol e Demanda do ciclo Otto 2021-2030*. Rio de Janeiro (RJ), 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-255/topico-542/EPE-DPG-SDB-Bios-NT-02-2020-r0_Cenarios_de_Oferta_de_Etanol.pdf. Acesso em: 6 jan. 2021.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Agropecuária Municipal (PAM) - 2019*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Emissions from livestock and manure management. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Hayama, Kanagawa (Japão), v. 4, c. 10, p. 1-20, 2006.
- KARLSSON, T. *et al. Manual básico de biogás*. Lajeado: Editora da Univates, 2014.
- KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. *Revista de Política Agrícola*, Brasília (DF), ano 15, n. 3, p. 28-35, 2006.
- MARIANE, L. *Biogás: diagnósticos e propostas de ações para incrementar seu uso no Brasil*. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2018.
- MILANEZ, A. Y. *et al. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas*. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-276, 2018.
- MITO *et al. Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil*. *Documentos Embrapa nº 196*. Concórdia, Embrapa Suínos e Aves, 2018
- OLIVEIRA, P. A. V. *Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos*. Concórdia: Embrapa-CNPSA, 1993.
- PENTEADO, M. C. *et al. Análise do potencial de geração de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça e bagaço de cana*. *BIOFIX Scientific Journal*, Curitiba (PR), v. 3 n. 1, p. 26-33, 2018.

PORTAL DO BIOGÁS. Potencial de geração do biogás. Belém (PA): Portal do Biogás/Grupo EMA, [20??]. Disponível em: <https://www.portaldobiogas.com/potencial-de-geracao-de-biogas/>. Acesso em: 26 ago. 2020.

QUADROS, D. G. *et al.* Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande (PB), v. 14, n. 3, p. 326-332, 2010.

SANTOS, I.W.S. Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da vinhaça de usinas de álcool para a produção de energia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

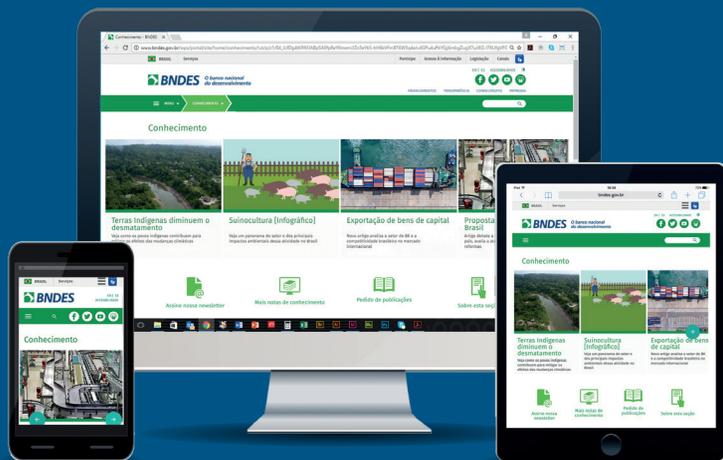
SILVA, C. B. *Abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SOUZA, C. L. *Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB*. Dissertação (Especialização em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SOUZA, S. M. N. *et al.* Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá (PR), v. 26, n. 2, p. 127-133, 2004.

TAVARES, J. M. R. *Modelagem do consumo de água, produção de dejetos e emissão de gases de efeito estufa e amônia na suinocultura*. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

ZANINI, N *et al.* *Avaliação do potencial de geração de energia a partir dos dejetos avícolas na região do Corede-Serra – RS – Brasil*. In: IV SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS. Rio de Janeiro, 5 a 7 de maio de 2015.



Acesse a seção de Conhecimento de nosso portal para mais conteúdos sobre economia e desenvolvimento e para acompanhar o lançamento de nossos livros, artigos e estudos técnicos.

www.bndes.gov.br/conhecimento

Esta obra foi editada pelo
Departamento de Comunicação
em Cormorant Garamond
em março de 2021.