

PEDRO HENRIQUE GONÇALVES RIGUEIRA PINHEIRO CASTRO

**ESTUDO DAS EXTERNALIDADES DO BIOGÁS NA MATRIZ ENERGÉTICA DO
BRASIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Delly Oliveira Filho

Coorientadores: André Pereira Rosa
Luis Manuel Navas Gracia

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C355e
2023

Castro, Pedro Henrique Gonçalves Rigueira Pinheiro, 1995-
Estudo das externalidades do biogás na matriz energética do
Brasil / Pedro Henrique Gonçalves Rigueira Pinheiro Castro. –
Viçosa, MG, 2023.

1 tese eletrônica (166 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Delly Oliveira Filho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.067>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Biogás. 2. Energia renovável. 3. Digestão anaeróbia.
4. Recursos energéticos - Planejamento - Brasil. 5. Hidrogênio
como combustível. 6. Automação. I. Oliveira Filho, Delly,
1957-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 665.776

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

PEDRO HENRIQUE GONÇALVES RIGUEIRA PINHEIRO CASTRO

**ESTUDO DAS EXTERNALIDADES DO BIOGÁS NA MATRIZ ENERGÉTICA DO
BRASIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 30 de novembro de 2023.

Assentimento:



Documento assinado digitalmente
PEDRO HENRIQUE GONÇALVES RIGUEIRA PINHEIRO CASTRO
Data: 23/02/2024 10:51:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pedro Henrique Gonçalves Rigueira Pinheiro Castro

Autor



Documento assinado digitalmente
DELLY OLIVEIRA FILHO
Data: 23/02/2024 13:50:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Delly Oliveira Filho
Orientador

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, graça e misericórdia.

À minha família por todo o apoio, compreensão e carinho, em especial aos meus pais Gilmar Pinheiro Cunha Castro e Ana Maria Gonçalves Rigueira Castro. Ao meu irmão Vitor Henrique Gonçalves Rigueira Pinheiro Castro por sempre me dar suporte, muito além do que poderia esperar. A Talita Aparecida Teixeira Aguiar por estar sempre ao meu lado e me apoiando nos estudos, mesmo nos momentos em que a dedicação necessária ao doutorado nos restringiu de estarmos juntos.

Ao professor Delly Oliveira Filho pelas orientações indispensáveis ao longo deste trabalho e de toda minha trajetória na pós-graduação. As oportunidades e ensinamentos foram muito maiores do que se pôde escrever em uma pesquisa científica.

Aos professores coorientadores André Pereira Rosa e Luís Manuel Navas Gracia pelas orientações ao longo da execução deste trabalho. Em especial ao professor André Pereira Rosa pela oportunidade de aprendizado, integração ao seu grupo de pesquisa e principalmente pela sempre atenção e dedicação.

Aos professores da UFV que desde o ciclo básico contribuíram para minha formação acadêmica. Em especial ao professor José Vitor Nicacio pelas oportunidades de aprendizado ao longo de toda pós-graduação.

Aos amigos e a toda equipe de pesquisadores da Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de fazer o curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

CASTRO, Pedro Henrique Gonçalves Rigueira Pinheiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2023. **Estudo das externalidades do biogás na matriz energética do Brasil**. Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: André Pereira Rosa e Luis Manuel Navas Gracia.

A agropecuária brasileira está entre as maiores do mundo, com destaque na produção de proteínas e de grãos. Para o tratamento dos resíduos orgânicos oriundos dessa enorme produção agropecuária é necessário adequar as técnicas produtivas brasileiras para o atendimento também da legislação ambiental. Nesse sentido, a digestão anaeróbia é atualmente uma das opções mais consolidadas no Brasil e apresenta oportunidades diante de outras técnicas, como a compostagem e a produção de biogás. Este biocombustível pode ser purificado a biometano ou permitir a geração de hidrogênio verde, o que pode promover diversas oportunidades ao planejamento energético brasileiro. Essas oportunidades ou impactos decorrentes da utilização de fontes renováveis de energia podem ser internalizadas em análises econômicas mais aprofundadas que englobam também externalidades envolvidas. Na literatura, apesar de reconhecidas, as externalidades do biogás são pouco exploradas, em especial com relação à quantificação econômica. Nesta pesquisa foi proposta uma metodologia para quantificação de uma série de externalidades relacionadas à geração de energia elétrica por meio da queima do biogás. O valor econômico do conjunto de externalidades do biogás pode superar, em alguns casos, o valor da energia elétrica gerada por esse combustível. Avaliou-se também, comparativamente, o valor das externalidades da geração de energia elétrica por meio do biogás e de sistemas fotovoltaicos, demonstrando que as externalidades do biogás superam o valor econômico das de sistemas fotovoltaicos. Essas valiosas constatações reforçam a importância do aprimoramento das políticas públicas brasileiras de incentivo às fontes renováveis e do planejamento energético como um todo. Atualmente, no Brasil, incentiva-se igualmente a geração distribuída de energia de fontes renováveis, por meio de uma única tarifa *net metering*. Como forma de impulsionar o crescimento da produção de biogás no país, avaliaram-se, por meio de simulação, a produção mais automatizada de biogás e aspectos econômicos da implementação de sistemas de aquecimento com revolvimento e diferentes espessuras de isolamento em biodigestores do tipo lagoa coberta. Os resultados dessa simulação indicaram que em

um biodigestor instalado na Zona da Mata mineira, na latitude de 20° 34' 07,2" S, foi possível aumentar a produção de biogás em até cerca de 12%. Concluiu-se que, em climas mais frios do que o do local estudado, a viabilidade econômica dos sistemas simulados pode ser cerca de até 10 vezes maior. Tendo em vista as externalidades ambientais positivas do biogás e a pequena exploração do seu potencial de produção, avaliaram-se rotas e o potencial de produção dos seus derivados biometano e, ou, hidrogênio verde a partir de resíduos orgânicos da pecuária, produção vegetal e saneamento urbano. Essa avaliação apontou que o potencial brasileiro seria suficiente para substituir mais da metade da demanda dos combustíveis não renováveis do setor de transportes do país, que atualmente é o de maior demanda energética. Assim, nesta pesquisa foram evidenciados aspectos do planejamento energético como forma de permitir ao Brasil aumentar a renovabilidade energética em sua matriz, por meio do uso mais intensivo do biogás ou de seus derivados biometano e, ou, hidrogênio verde.

Palavras-chave: Biodigestão. Energia renovável. Planejamento energético. Hidrogênio verde. Automação.

ABSTRACT

CASTRO, Pedro Henrique Gonçalves Rigueira Pinheiro, D.Sc., Federal University of Viçosa, November 2023. **Study of the externalities of biogas in Brazil's energy matrix.** Co-supervisors: André Pereira Rosa and Luis Manuel Navas Gracia.

Brazilian agriculture is among the largest in the world, with focus on the production of proteins and grains. To treat the organic waste arising from this enormous agricultural production, it is necessary to adapt the Brazilian production techniques so that it also complies with environmental legislation. In this sense, anaerobic digestion is currently one of the most consolidated alternatives in Brazil and presents opportunities compared to other techniques, such as composting and biogas production. This biofuel can be purified to biomethane or allow the generation of green hydrogen, which can promote several opportunities for Brazilian energy planning. These opportunities or impacts resulting from the use of renewable energy sources can be internalized in more in-depth economic analyses that also include involved externalities. In the literature, despite being acknowledged, the externalities of biogas are poorly explored, especially in relation to economic quantification. In this work, a methodology was proposed which allowed the quantification of a series of externalities related to the generation of electrical energy through the biogas burning. The economic value of the set of externalities of biogas can exceed, in some cases, the value of the electrical energy generated by this fuel. The value of the externalities of generating electrical energy through biogas and photovoltaic systems was also evaluated comparatively, demonstrating that the externalities of biogas exceed the economic value of those of photovoltaic systems. These valuable findings reinforce the importance of improving Brazilian public policies to encourage renewable sources and energy planning as a whole. Currently, in Brazil, the distributed generation of energy from renewable sources is also encouraged, through a single net metering tariff. As a way to boost the growth of biogas production in the country, the more automated production of biogas and the economic aspects of implementing heating systems with revolution and different thicknesses of insulation in covered lagoon-type biodigesters were evaluated through simulation. The results of this simulation indicated that in a biodigester installed in the forest zone in the state of Minas Gerais at a latitude of 20° 34' 07.2" s, the biogas production was raised by up to around 12%. It was concluded that, in places whose

climate is colder than the location in this work, the economic viability of the simulated systems can be up to 10 times greater. considering that the positive environmental externalities of biogas and the small exploitation of its production potential, routes and the production potential of its biomethane derivatives and/or green hydrogen from organic waste from livestock farming, vegetable production and urban sanitation were evaluated this assessment indicated that brazilian potential would be sufficient to replace more than half of the demand for non-renewable fuels in the country's transport sector, which currently has the highest energy demand. As a result, this work highlighted aspects of energy planning as a way to allow Brazil to increase energy renewability in its matrix, through the more intensive use of biogas or its biomethane derivatives and, or, green hydrogen.

Keywords: Biodigestion. Renewable energy. Energy planning. Green hydrogen. Automation.

RESUMEN

CASTRO, Pedro Henrique Gonçalves Rigueira Pinheiro, D.Sc., Universidad Federal de Viçosa, noviembre de 2023. **Estudio de las externalidades del biogás en la matriz energética de Brasil.** Asesor: Delly Oliveira Filho. Codirectores: André Pereira Rosa y Luis Manuel Navas Gracia.

La agropecuaria brasileña se encuentra entre las más grandes del mundo, destacándose en la producción de proteínas y granos. Para el tratamiento de los residuos orgánicos provenientes de esta enorme producción agropecuaria, es necesario adecuar las técnicas productivas brasileñas para cumplir también con la legislación ambiental. En este sentido, la digestión anaerobia es actualmente una de las opciones más consolidadas en Brasil y presenta oportunidades frente a otras técnicas, como el compostaje y la producción de biogás. Este biocombustible puede ser purificado a biometano o permitir la generación de hidrógeno verde, lo que puede promover diversas oportunidades en la planificación energética brasileña. Estas oportunidades o impactos derivados de la utilización de fuentes de energía renovables pueden ser internalizados en análisis económicos más profundos que también abarquen externalidades involucradas. En la literatura, a pesar de estar reconocidas, las externalidades del biogás son poco exploradas, especialmente en lo que respecta a la cuantificación económica. En esta investigación, se propuso una metodología para la cuantificación económica de externalidades relacionadas con la generación de energía eléctrica mediante la quema del biogás. El valor económico del conjunto de externalidades del biogás puede superar, en algunos casos, el valor de la electricidad generada por este combustible. También se evaluó comparativamente el valor de las externalidades en la generación de energía eléctrica mediante biogás y sistemas fotovoltaicos, demostrando que las externalidades del biogás superan el valor económico de las de sistemas fotovoltaicos. Estas valiosas constataciones refuerzan la importancia del perfeccionamiento de las políticas públicas brasileñas de incentivo a las fuentes renovables y de la planificación energética en su conjunto. Actualmente, en Brasil, se fomenta igualmente la generación distribuida de energía a partir de fuentes renovables, mediante una única tarifa de net metering (medición neta). Como una manera de impulsar el crecimiento de la producción de biogás en el país, se evaluaron, mediante simulación, la producción más automatizada de biogás y los aspectos económicos de la implementación de sistemas de calentamiento con

mezclado y diferentes espesores de aislamiento en biodigestores del tipo laguna cubierta. Los resultados de esta simulación indicaron que en un biodigestor instalado en la Zona de la Mata Mineira, a una latitud de 20° 34' 07,2" S, fue posible aumentar la producción de biogás en aproximadamente un 12%. Se concluye que, en climas más fríos que el del lugar estudiado, la viabilidad económica de los sistemas simulados puede ser hasta 10 veces mayor. Dadas las externalidades ambientales positivas del biogás y la escasa exploración de su potencial de producción, se evaluaron rutas y el potencial de producción de sus derivados, biometano y/o hidrógeno verde, a partir de residuos orgánicos de la pecuaria, producción vegetal y saneamiento urbano. Esta investigación señaló que el potencial brasileño sería suficiente para sustituir más de la mitad de la demanda de combustibles no renovables del sector de transporte del país, que actualmente es el de mayor demanda energética. Así, en esta investigación se destacaron aspectos de la planificación energética como una forma de permitir que Brasil incremente la renovabilidad energética en su matriz, mediante el uso más intensivo del biogás o de sus derivados, biometano y/o hidrógeno verde.

Palabras clave: Biodigestión. Energía renovable. Planificación energética. Hidrógeno verde. Automatización.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 4.1 – Modelagem do biodigestor tipo lagoa coberta	99
Figura 4.2 – Temperaturas do ambiente, do solo e a velocidade do vento utilizados como dados de entrada para as simulações para o período de um ano.....	101
Figura 4.3 – Fluxograma do processo de modelagem e simulação dos sistemas de aquecimento e do revolvimento do biodigestor tipo lagoa coberta.....	102
Figura 4.4 – Fluxo de energia e matéria na planta de geração de energia elétrica alimentada por efluente da suinocultura	105
Figura 4.5 – Temperatura da biomassa para o cenário-base e para as simulações de aquecimento com revolvimento no biodigestor.....	108
Figura 4.6 – Produção de energia diária para o cenário-base simulado e para as simulações de aquecimento com revolvimento no biodigestor	109
Figura 4.7 – Tempo de retorno do investimento para aquisição do isolamento térmico de EPS 100 em função da temperatura do biodigestor.....	117
Figura 4.8 – Oportunidade econômica decorrente da geração de energias elétrica e térmica em função da temperatura de operação do biodigestor para diferentes espessuras de isolamento.....	118
Figura 4.9 – Energia produzida pelo biogás em função da temperatura da biomassa, normalizada para a temperatura do cenário-base, i.e., 23,58 °C	119
Figura 5.1 – Potencial de produção de biometano por meio da biodigestão de resíduos orgânicos de diferentes fontes no Brasil	142
Figura 5.2 – Histórico e planejamento energético do setor de transportes rodoviários do Brasil.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Custos de mão de obra para construção e operação de diferentes biodigestores tubulares não automatizados, no Brasil, aplicáveis a resíduos de suinocultura.....	39
Tabela 2.2 – Custo estimado com as despesas de saúde pública e impactos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica no Brasil.....	41
Tabela 2.3 – Custo evitados com biogás para geração de energia elétrica e térmica	44
Tabela 2.4 – Valor econômico da externalidade subprodutos da biodigestão para diferentes cenários.....	46
Tabela 2.5 – Valor econômico da externalidade emprego e renda para diferentes cenários.....	47
Tabela 2.6 – Valor econômico da externalidade armazenamento de energia	47
Tabela 2.7 – Valor econômico estimado para as externalidades estudadas.....	51
Tabela 3.1 – Externalidades e perspectivas avaliadas para as fontes de geração renováveis biogás e sistemas FV	67
Tabela 3.2 – Custos nivelados de eletricidade para geração de energia elétrica de biogás e de sistemas FV no Brasil.....	69
Tabela 4.1 – Propriedades térmicas dos materiais simulados.....	100
Tabela 4.2 – Valor econômico do material isolante EPS, energia elétrica e energia térmica	106
Tabela 4.3 – Energia produzida pelo biogás, consumo do sistema de aquecimento do afluentes e energia elétrica injetada na rede para o caso de aproveitamento de calor de cogeração no primeiro ano de operação	110
Tabela 4.4 – Balanço de energia térmica da cogeração e energia térmica e consumida para aquecimento do biodigestor para o caso de aproveitamento de calor de cogeração no primeiro ano de operação	111

Tabela 4.5 – Balanço de energia para simulação de 10 anos de operação do biodigestor com sistemas de aquecimento com revolvimento e diferentes espessuras de isolamento térmico	113
Tabela 4.6 – Valoreconômico da energia elétrica injetada na rede e da energia térmica da cogeração produzida pela queima do biogás, para simulação de 10 anos de operação do biodigestor	115
Tabela 4.7 – Dimensão característica, área, volume e relação área/volume aplicáveis para avaliação qualitativa de perdas térmicas em biodigestores	120
Tabela 5.1 – Técnicas de produção de hidrogênio via eletrólise, desafios e oportunidades.....	135
Tabela 5.2 – Principais rotas de produção de hidrogênio verde a partir de biomassa, desafios e oportunidades.....	137
Tabela 5.3 – Técnicas de purificação de biogás para biometano, eficiência, demanda energética, desafios e oportunidades.....	139
Tabela 5.4 – Consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário do Brasil em 2022	141
Tabela 5.5 – Eficiências de automóveis e de veículos de carga com diferentes tecnologias de propulsão.....	141
Tabela 5.6 – Possibilidades de atendimento à demanda de hidrogênio verde proposta para o setor de transporte rodoviário do Brasil até 2050	147
Tabela 5.7 – Consumo específico energético para diferentes modais de transporte	149

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a.a.	Ao ano.
cm	Centímetro.
EPS	Poliestireno expandido.
FV	Fotovoltaico.
g	Grama
GEE	Gases de Efeito Estufa.
GJ	GigaJoule.
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo.
GWP	Global Warming Potential.
i.e.	Isto é.
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change.</i>
K	Kelvin.
kg	Quilograma.
kJ	QuiloJoule.
km	Quilômetro.
kPa	QuiloPascal.
kW	QuiloWatt.
kWh	QuiloWatt hora.
m	Metro.
Máx.	Máximo.
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.
Min.	Mínimo.
MJ	MegaJoule.
ml	Mililitros.
mm	Milímetro.
Mtep	Mega tonelada equivalente de petróleo.
MW	MegaWatt.
MWh	MegaWatt hora.
nd	Dado não disponibilizado.
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio.
O	Oeste.

PEAD Polietileno de alta densidade.

R\$ Reais.

S Sul.

TWh TeraWatt hora.

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem.
A_e	Valor da externalidade armazenamento de energia.
B	Produção relativa de metano.
B_0	Produção final do metano.
B_{LC}	Biodigestor Lagoa Coberta.
c	Energia elétrica produzida a partir de 1 m ³ de biogás.
C_{BIO}	Créditos de descarbonização.
C_c	Valor econômico da externalidade créditos de carbono
CH_4	Metano.
CO_2	Dióxido de carbono.
CO_{2eq}	Dióxido de carbono equivalente.
C_{mo}	Custo específico com mão de obra para construção.
C_o	Custo específico para operação.
C_{pb}	Capacidade de produção específica de biogás.
d_s	Despesas de saúde pública e impactos ambientais.
E	Energia elétrica ou térmica gerada a partir de 1 m ³ de biogás.
E_r	Valor da externalidade emprego e renda.
EU_{ETS}	European Union Emissions Trading System.
H_2	Hidrogênio.
H_2O	Água.
L_{COE}	Levelized Cost of Electricity.
m_c	Concentração de metano.
n	Eficiência energética da geração de energia elétrica.
N_2	Nitrogênio.
N_2O	Óxido nitroso.
O_2	Oxigênio.
°C	Graus Celsius.
P	Preço do biogás.
P_b	Quantidade de biogás produzido.
P_{ce}	Poder calorífico do energético.
P_{ci}	Poder calorífico inferior do metano.

p_{CH_4}	Potencial de aquecimento global do CH_4
P_{dCH_4}	Produção diária de energia do biodigestor.
p_e	Perdas de energia elétrica do Brasil na transmissão e distribuição
P_e	Preço do energético.
p_i	Período por ano de não fornecimento de energia elétrica.
p_K	Valor comercial do potássio.
p_N	Valor comercial do nitrogênio.
p_{N_2O}	Potencial de aquecimento global do N_2O
P_{nf}	Prejuízo do não fornecimento de energia elétrica.
p_P	Valor comercial do fósforo.
q	Vazão do afluente.
q_b	Poder calorífico inferior do biogás.
q_{CH_4}	Emissões de CH_4 por kg de resíduo de suinocultura em compostagem.
q_K	Quantidade de potássio no digestato
q_N	Quantidade de nitrogênio no digestato
q_{N_2O}	Emissões de N_2O por kg de resíduo de suinocultura em compostagem.
q_P	Quantidade de fósforo no digestato
R	Valor da externalidade redução das despesas com saúde pública e impactos ambientais.
R_p	Valor econômico da externalidade redução de perdas nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica
S_b	Valor da externalidade subprodutos da biodigestão.
S_{VT}	Sólidos voláteis totais.
T	Temperatura da biomassa.
tCO_{2eq}	Tonelada de dióxido de carbono equivalente.
t_{fp}	Tarifa no horário fora de ponta.
t_p	Tarifa no horário de ponta.
T_{RH}	Tempo de retenção hidráulica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	22
1.1. Contribuição e originalidade da pesquisa.....	24
1.2. Estrutura da tese.....	25
1.3. Referências.....	27
2. EXTERNALIDADES DA BIODIGESTÃO DE DEJETOS DA SUINOCULTURA NO BRASIL: OPORTUNIDADE PARA POLÍTICA ENERGÉTICA.....	29
2.1. Resumo	29
2.2. Introdução.....	29
2.3. Objetivos	33
2.3.1. Objetivo geral	33
2.3.2. Objetivos específicos.....	33
2.4. Metodologia.....	33
2.4.1. Estimativa do valor econômico do biogás.....	34
2.4.2. Estimativa do valor econômico das externalidades.....	35
2.5. Resultados e discussão.....	43
2.5.1. Quantificação do valor econômico do biogás.....	43
2.5.2. Valor econômico das externalidades.....	44
2.6. Conclusões e implicações em políticas energéticas	52
2.7. Referências	53
3. COMPARAÇÃO DE EXTERNALIDADES DO BIOGÁS E ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO	61
3.1. Resumo.....	61
3.2. Introdução.....	61
3.3. Objetivo	66
3.3.1. Objetivo geral	66

3.3.2. Objetivos específicos.....	66
3.4. Metodologia.....	66
3.4.1. Emissões evitadas	67
3.4.2. Emprego e renda.....	69
3.4.3. Externalidades peculiar de cada fonte renovável de geração	70
3.4.4. Avaliação qualitativa de externalidades	70
3.5. Resultados e discussão.....	71
3.5.1. Emissões evitadas	72
3.5.2. Emprego e renda.....	73
3.5.3. Externalidades particulares de cada fonte de geração.....	74
3.5.4. Avaliação qualitativa de externalidades	76
3.6. Avaliação de políticas públicas	80
3.6.1. Contexto mundial	81
3.6.2. Políticas públicas no contexto brasileiro	81
3.6.3. Externalidades como fator estratégico	83
3.7. Conclusões.....	84
3.8. Referências	85
4. EFEITO DA AUTOMAÇÃO E DO CONTROLE NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS ...	94
4.1. Resumo	94
4.2. Introdução.....	95
4.3. Objetivo	98
4.3.1. Objetivo Geral	98
4.3.2. Objetivos específicos.....	98
4.4. Metodologia.....	98
4.4.1. Modelagem e simulações do biodigestor lagoa coberta	99
4.4.2. Validação da simulação	104

4.4.3. Balanço energético e avaliação econômica	104
4.4.4. Avaliações complementares	107
4.5. Resultados e discussão.....	107
4.5.1. Modelo simulado	107
4.5.2. Validação da simulação	112
4.5.3. Balanço energético e avaliação econômica	113
4.5.4 Avaliações complementares.....	119
4.6. Conclusão.....	121
4.7. Referências	122
5. HIDROGÊNIO VERDE E BIOMETANO COMO RECURSOS ENERGÉTICOS ESTRATÉGICOS PARA O SETOR DE TRANSPORTE DO BRASIL.....	129
5.1. Resumo	129
5.2. Introdução.....	129
5.3. Rotas de produção do hidrogênio verde e biometano	135
5.4. Planejamento energético para setor de transportes	140
5.5. Discussão	148
5.6. Conclusão.....	151
5.7. Referências	152
6. CONCLUSÃO GERAL	160
6.1. Sugestões para estudos futuros	164
6.2. Limitações desta tese	165

1. INTRODUÇÃO GERAL

A produção agropecuária brasileira tem grande expressividade no cenário mundial. O Brasil em 2020 detinha o maior rebanho de bovinos do mundo e o terceiro maior na produção de carne bovina, suína e frango. A produção agrícola do país também detém grande relevância mundial sendo o terceiro maior de frutas e liderando a produção de açúcar e café (EMBRAPA, 2023). Com tamanha escala de produção agropecuária, o volume de resíduos e o consequente impacto ambiental atingem patamares que inspiram soluções inadiáveis. Assim, unir técnicas que permitam o tratamento dos resíduos aliado a produção de biocombustíveis é uma oportunidade significativa para o Brasil (PANDYASWARGO et al., 2019).

Os resíduos orgânicos, quer provenientes da produção agrícola, da pecuária ou do saneamento urbano, demandam alternativas para destinação que visem minimizar impactos ambientais. Dentre as alternativas para o tratamento ambiental dos resíduos orgânicos está a digestão anaeróbia. Esse processo pode permitir, por exemplo: o tratamento de excrementos animais, efluentes de processos agroindustriais com alta carga orgânica e de resíduos de origem vegetal. Esta opção possui vantagens notáveis frente a outras como a compostagem, isso pois não demanda oxigênio, mitiga a emissão de poluentes e permite o aproveitamento energético (DADRASNIA et al., 2021). Além do mais, a digestão anaeróbia, especialmente de resíduos orgânicos, possibilita produzir biogás e biofertilizantes simultaneamente, permitindo, assim, reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa (ACHINAS; EUVERINK, 2020; NESHAT et al., 2017; CHOWDHURY et al., 2020).

Diversos países têm buscado novas fontes de energia renováveis para reduzir a emissão de poluentes, incentivando, por exemplo, a produção de biogás (LUO et al., 2021). E o que pode explicar esse incentivo ao desenvolvimento do biogás é o fato de a sua utilização ser mais vantajosa do que a de outras fontes renováveis, pelo fato de permitir diminuir as atuais emissões de gases de efeito estufa. Como exemplo de vantagens adicionais deste biocombustível, cita-se o fato de ele permitir a geração de energia elétrica, o que pode propiciar aumento de renda no campo (ROCKENBACH et al., 2016). O biogás fornece diversas possibilidades e usos estratégicos, no entanto

o maior desenvolvimento desse biocombustível requer investimentos e planejamento para que o Brasil possa desenvolver, sustentavelmente, a sua matriz energética.

Além da geração de energia elétrica por meio da queima do biogás, outra possibilidade é que ele possa ser purificado a biometano (KHAN, 2020). Outra oportunidade é a sua conversão em hidrogênio via reforma a vapor do biogás (NOOIJER et al., 2018). Assim, o biometano e, ou, o hidrogênio verde oriundos do processo de digestão anaeróbia podem ter aplicações diretas, por exemplo, no setor de transporte (LI et al., 2020). Essa oportunidade permite maior eficiência e demonstra a importância que o biogás pode ter na matriz energética brasileira.

A atual matriz energética nacional conta com predominância de fontes não renováveis que foram responsáveis por fornecer cerca de 53% da energia consumida em 2022. Os principais recursos não renováveis são os derivados do petróleo, seguidos do gás natural. A participação deste último foi responsável por suprir 10,5% da matriz em 2022 (MME, 2023). Desse modo, novas fontes renováveis se fazem essenciais como forma de permitir que o país possa se tornar mais independente de recursos energéticos não renováveis. Nessa linha, para permitir maior aproveitamento do potencial de produção de biogás de resíduos, que atualmente é inferior a cerca de 2%, políticas de incentivo são necessárias (ABIOGAS, 2023).

Assim, o que se observa é um grande potencial de produção de biogás no Brasil. No entanto, ainda pouco explorado e com tendência de crescimento inferior à de outras fontes renováveis. Isso pode ser verificado em comparação com outras fontes, a exemplo da solar FV. Esta última apresentou crescimento médio superior a 100% a.a. de 2013 a 2022; em contrapartida, o crescimento médio do biogás utilizado para geração de energia elétrica no mesmo período foi inferior a cerca de 13% a.a. (MME, 2023). O que se pode concluir é que um energético com tanto potencial como o biogás precisa ser mais bem explorado no Brasil.

As experiências brasileiras com projetos para produção de biogás, especialmente por meio do tratamento de efluentes no meio rural, não foram, em boa parte, promissoras. Projetos desde os anos de 1980 apresentaram dificuldades técnicas para dimensionamento, manutenção e, sobretudo, assistência de especialistas (SINIGAGLIA et al., 2022). Assim, conclui-se que a falta de políticas públicas para promoção do biogás permite que as experiências passadas de projetos

fracassados sejam entraves para o aproveitamento do potencial brasileiro de produção do biogás, enriquecido ou não com biometano e, ou, hidrogênio verde.

As políticas públicas de incentivo às fontes de energia renováveis no Brasil precisam ser continuamente revisadas, de forma geral, para o desenvolvimento também do biogás. Assim, estudos que possam contribuir para uma maior compreensão dos efeitos externos da produção do biogás, i.e., externalidades ou de técnicas que possam aumentar a viabilidade econômica de produção do biogás de resíduos, e de seus subprodutos como o hidrogênio verde, podem ser impulsionadores do desenvolvimento desta importante fonte renovável de energia.

1.1. Contribuição e originalidade da pesquisa

As contribuições desta pesquisa estão relacionadas aos seguintes fatores: desenvolvimento de metodologias para quantificação das externalidades do biogás; avaliação comparativa do valor das externalidades entre sistemas a biogás e sistemas FV para geração de energia elétrica; desenvolvimento de simulações para avaliação dos efeitos de técnicas de automação e controle na produção de biogás em biodigestores do tipo lagoa coberta; e, por último, proposição de planejamento para implementação do biometano e hidrogênio verde produzidos a partir de resíduos orgânicos no Brasil.

O que se espera é que os resultados alcançados nesta pesquisa possam ser utilizados como embasamento para o Plano Nacional do Biogás Brasileiro. Espera-se também que os resultados desta pesquisa, especialmente em termos de avaliação das externalidades, possam justificar políticas públicas de incentivo à produção de biogás. Em específico, a comparação de externalidades entre o biogás e sistemas FV evidenciou a necessidade de reavaliar políticas públicas de incentivo às fontes renováveis, haja vista a disparidade entre o valor das externalidades dessas duas fontes.

A avaliação das externalidades é um campo de estudos ainda pouco explorado, particularmente em termos de avaliação quantitativa delas. Desse modo, a pesquisa foi inovadora em propor metodologia que permitiu estimar, economicamente, o valor de externalidades da produção de biogás. Foi realizada também uma avaliação econômica comparativa entre as externalidades da geração de energia elétrica, por

meio de sistemas a biogás e sistemas FV. Importantes resultados foram alcançados, principalmente porque se estimou que as externalidades do biogás podem, em diversas situações, superar o valor econômico da energia elétrica gerada por essa fonte.

A avaliação, por meio de simulação, da implementação de sistemas automáticos de aquecimento com revolvimento em biodigestores apontou que os biodigestores do tipo lagoa coberta podem ter sua eficiência aumentada na produção de energia. Em especial para regiões frias, os sistemas de aproveitamento de calor da cogeração, aliado ao sistema de aproveitamento de calor do efluente, podem ser fundamentais para viabilizar o processo de biodigestão. Assim, espera-se que os sistemas simulados possam ser auxiliares na promoção de desenvolvimento de fontes renováveis de energia no Brasil, em específico do biogás no meio rural. Entre as razões, destaca-se o fato que estes sistemas de produção de biogás são, ao mesmo tempo, promotores de saneamento.

A estimativa do potencial brasileiro de produção de biometano e hidrogênio verde a partir do biogás produzido de resíduos orgânicos ressaltou quão significativo esses combustíveis podem ser para favorecer o aumento da renovabilidade da matriz energética brasileira. Analisando energeticamente as diferentes rotas de produção do hidrogênio verde, concluiu-se que a digestão anaeróbia para produção de biogás e posterior reforma para hidrogênio verde é uma das mais viáveis atualmente. Isso reforçou a importância do biogás até mesmo para produzir o hidrogênio verde, tido como um dos “energéticos do futuro”. Além do mais, a proposta de planejamento envolvendo a transição energética no setor de transporte brasileiro pôde demonstrar a relevância ainda maior dos biocombustíveis obtidos a partir de resíduos orgânicos.

1.2. Estrutura da tese

Esta tese está organizada em seis capítulos, sendo o primeiro a introdução geral, seguida de quatro capítulos em forma de artigos científicos e o último, que é a conclusão geral.

O primeiro capítulo da tese é a Introdução geral que contém: a introdução acerca do tema abordado na tese; a contribuição e originalidade da pesquisa especialmente na área do estudo de externalidades, biodigestores com automação e

planejamento energético; a apresentação da estrutura da tese; e as limitações da pesquisa, que podem ser aprimoradas em trabalhos futuros.

O segundo capítulo da tese é composto pelo manuscrito do artigo científico intitulado “Externalidades da biodigestão de dejetos da suinocultura no Brasil: oportunidade para política energética”. Apresenta uma metodologia para quantificação econômica das externalidades decorrentes da produção de biogás no Brasil. Os resultados apontam a importância econômica das externalidades, bem como o efeito significativo no planejamento energético.

O terceiro capítulo desta tese é composto pelo manuscrito do artigo científico intitulado “Comparação de externalidades do biogás e energia solar fotovoltaica para o planejamento energético”. Também como enfoque de planejamento energético, as externalidades da geração de energia elétrica por meio do biogás e de sistemas FV foram economicamente comparadas. O que se evidenciou foi que a discrepância entre os valores das externalidades pode reforçar investimentos prioritários para o desenvolvimento da produção de biogás.

O quarto capítulo da tese é composto pelo manuscrito do artigo científico intitulado “Efeito da automação e do controle na produção de biogás”. Por meio de simulações, foi avaliado o efeito na produção de biogás a partir da implementação de sistemas de aquecimento com revolvimento em biodigestor do tipo lagoa coberta. Os resultados indicaram que na região de Teixeira, MG, a produção de biogás pode ser aumentada em cerca de 12%, no entanto nas regiões mais frias se podem ter maiores incrementos na produção decorrentes do aquecimento com revolvimento.

O quinto capítulo da tese é composto pelo manuscrito do artigo científico intitulado “Hidrogênio verde e biometano como recursos energéticos estratégicos para o setor de transporte do Brasil”. Pode-se estimar o potencial brasileiro de produção de biometano e hidrogênio verde a partir de resíduos da pecuária, da produção vegetal e do saneamento urbano. Os resultados evidenciam que o aproveitamento dessas fontes de resíduos orgânicos pode ser responsável por suprir mais da metade da demanda dos combustíveis não renováveis utilizados no setor de transporte do país.

O sexto capítulo da tese é denominado Conclusão geral e apresenta a síntese das conclusões dos capítulos anteriores e sugestões de trabalhos futuros, relacionados a avaliação de externalidades, avaliação de ciclo de vida, automação e controle e planejamento energético.

1.3. Referências

ABIOGAS, **Programa nacional do biogás e biometano**. 2023. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023.

ACHINAS, S.; EUVERINK, G. J. W. Rambling facets of manure-based biogas production in Europe: a briefing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109566, mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109566>.

CHOWDHURY, T.; CHOWDHURY, H.; HOSSAIN, N.; AHMED, A.; HOSSEN, M. S.; CHOWDHURY, P.; THIRUGNANASAMBANDAM, M.; SAIDUR, R. Latest advancements on livestock waste management and biogas production: bangladeshs perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122-818, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122818>.

DADRASNIA, A.; MUÑOZ, I. B.; YÁÑEZ, E. H.; LAMKADDAM, I. U.; MORA, M.; PONSÁ, S.; AHMED, M.; ARGELAGUET, L. L.; WILLIAMS, P. M.; OATLEY-RADCLIFFE, D. L. Sustainable nutrient recovery from animal manure: a review of current best practice technology and the potential for freeze concentration. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 128106, set. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128106>.

EMBRAPA. **Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>. Acesso em: 02 mar. 2023.

KHAN, I. Waste to biogas through anaerobic digestion: hydrogen production potential in the developing world - a case of bangladesh. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 32, p. 15951-15962, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.038>.

LI, G.; CUI, P.; WANG, Y.; LIU, Z.; ZHU, Z.; YANG, S. Life cycle energy consumption and GHG emissions of biomass-to-hydrogen process in comparison with coal-to-hydrogen process. **Energy**, v. 191, p. 116588, jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.116588>.

LUO, B.; KHAN, A. A.; ALI, M. A. S.; YU, J. An evaluation of influencing factors and public attitudes for the adoption of biogas system in rural communities to overcome energy crisis: a case study of pakistan. **Science of the Total Environment**, v. 778, p. 146208, jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146208>.

MME Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

NESHAT, S. A.; MOHAMMADI, M.; NAJAFPOUR, G. D.; LAHIJANI, P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 308-322, nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>.

NOOIJER, N.; GALLUCCI, F.; PELLIZZARI, E.; MELENDEZ, J.; TANAKA, D. A. P.; MANZOLINI, G.; ANNALAND, M. V. S. On concentration polarisation in a fluidized bed membrane reactor for biogas steam reforming: modelling and experimental validation. **Chemical Engineering Journal**, v. 348, p. 232-243, set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.205>.

PANDYASWARGO, A. H.; GAMARALALAGE, P. J. D.; LIU, C.; KNAUS, M.; ONODA, H.; MAHICHI, F.; GUO, Y. Challenges and an Implementation Framework for Sustainable Municipal Organic Waste Management Using Biogas Technology in Emerging Asian Countries. **Sustainability**, v. 11, n. 22, p. 6331, 11 nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/su11226331>.

SINIGAGLIA, T.; FREITAG, T. E.; MACHADO, A.; PEDROZO, V. B.; ROVAI, F. F.; GUILHERME, R. T. G.; LANZANOVA, T. D. M.; NORA, M. D.; MARTINS, M. E. S. Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 24, p. 12074-12095, mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.234>.

ROCKENBACH, F. L.; SOUZA, A. M.; OLIVEIRA, J. H. R. Economic feasibility of biogas production in swine farms using time series analysis. **Ciência Rural**, v. 46, n. 7, p. 1295-1300, jul. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20141848>.

2. EXTERNALIDADES DA BIODIGESTÃO DE DEJETOS DA SUINOCULTURA NO BRASIL: OPORTUNIDADE PARA POLÍTICA ENERGÉTICA

2.1. Resumo

A produção agropecuária brasileira de suínos gera imensa quantidade de resíduos orgânicos que devem ser tratados a fim de diminuir os impactos ambientais. A digestão anaeróbia é atualmente a alternativa mais consolidada, e seu uso promove o tratamento de efluentes e permite a produção de biogás, que proporciona diversas oportunidades, que podem ser internalizadas economicamente na forma de externalidades. Esta pesquisa possibilitou identificar e desenvolver uma metodologia para quantificar as externalidades relacionadas à produção e utilização do biogás proveniente da biodigestão de dejetos suínos. As externalidades estudadas foram: créditos de carbono, subprodutos da digestão, emprego e renda, armazenamento de energia, redução de gastos com saúde pública e impactos ambientais e qualidade de energia. A quantificação das externalidades, sob a perspectiva do produtor rural resultou que as externalidades créditos de carbono, subprodutos da biodigestão e armazenamento de energia podem valer mais do que o valor econômico do próprio biogás. Já as demais externalidades, avaliadas sob a perspectiva da sociedade, também podem superar o valor do biogás. Portanto, é evidente a importância da internalização das externalidades e o seu papel fundamental na proposição de políticas públicas, uma vez que as externalidades também são benefícios sociais e podem justificar investimentos governamentais.

Palavras-chave: Impactos indiretos. Resíduos orgânicos. Energia renovável.

2.2. Introdução

A digestão anaeróbia viabiliza a produção de biogás a partir de resíduos e tem sido projetada como a solução mais indicada tecnicamente para o gerenciamento de dejetos (CHOWDHURY et al., 2020). Frisa-se aqui que o biogás como fonte de energia renovável é, em geral, fruto da diminuição de impactos ambientais e, portanto, pode ser considerado uma etapa de melhoria da qualidade ambiental e da água

(BEHMEL et al., 2018). Assim, esse processo tem se tornado tendência na produção de biogás, com oportunidades como o reúso da água e a utilização do digestato como biofertilizante (HOLLAS et al., 2023). Devido à larga escala de produção suinícola no Brasil, tem-se a grande geração de resíduos orgânicos, cuja alternativa para solucionar esse problema ambiental é o tratamento de dejetos em biodigestores (NAGARAJAN et al., 2019; ABPA, 2022; SOUSA et al., 2022).

As oportunidades decorrentes da produção do biogás são muitas, como melhorias sociais e ambientais, que são as chamadas externalidades positivas ou benefícios indiretos (BARTCZAK et al., 2017). As externalidades, em geral, podem ser definidas como impactos positivos ou negativos causados no ambiente externo advindos de determinada atividade e que podem ser quantificados física e economicamente (MARTINEZ-SANCHEZ et al., 2015; JENSEN; SKOVSGAARD, 2017). A produção de biogás pela digestão anaeróbia é uma atividade que impacta significativamente o ambiente, ocasionando externalidades de elevado interesse, denominadas neste estudo como externalidades do biogás. As externalidades do biogás são, na sua maioria, positivas, a exemplo da produção de biofertilizantes e da possibilidade de armazenamento deste gás para a geração de energia elétrica em horários convenientes (ARDOLINO et al., 2020).

A externalidade mais notável da produção e utilização do biogás é a mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE), pois, caso o metano (CH_4) fosse emitido para a atmosfera, ter-se-ia impacto maior, posto que o metano é cerca de 34 vezes mais prejudicial do que o dióxido de carbono (CO_2) para o aquecimento da atmosfera (IPCC, 2013). Além do metano, outros gases, que também têm elevado potencial poluidor, deixam de ser diretamente emitidos, como o óxido nitroso (N_2O) (FRØSETH et al., 2014). Essa característica pode ser descrita como “poder limpante” do biogás, uma vez que a sua utilização para gerar energia térmica e, ou, elétrica não apenas deixa de emitir, como pode mitigar as emissões pela conversão de CH_4 em CO_2 .

Uma limitação para a produção de biogás está na dificuldade de operação de biodigestores com baixo nível de automação, que são os modelos mais utilizados no Brasil (SOUSA et al., 2020). Outra consideração é que a implementação de biodigestores propicia externalidades locais negativas a uma distância de quase 2 km de residências (KREKEL, 2020). O grande desafio para estabelecer a consolidação do biogás no país está relacionado às experiências pouco favoráveis que os

produtores rurais já enfrentaram no passado. Muitos projetos no início dos anos de 1980 foram subutilizados por dificuldades técnicas, falhas de dimensionamento e falta de material e de assistência de especialistas (SINIGAGLIA et al., 2022). Melhor dizendo, a falta de um impulsionador no setor faz que as experiências do passado sejam freios ao desenvolvimento do potencial brasileiro de produção e aproveitamento de biogás; com isso, tem-se um desafio ao planejamento energético.

Sendo assim, quantificar as externalidades pode ser fundamental para um conhecimento mais aprofundado do biogás como fonte renovável de energia. Compreender os desafios e oportunidades das externalidades é ponto-chave para o planejamento energético visando ao aumento da produção de biogás e a programas de incentivo bem consolidados e robustos dos pontos de vista econômico, ambiental, social e tecnológico. A compreensão mais aprofundada das externalidades pode contribuir diretamente para aumento de investimentos em programas de incentivo ao biogás no Brasil. Dessa forma, pode ser possível ao país expandir ainda mais a renovabilidade de sua matriz energética, tornando-se destaque mundial e exemplo a ser seguido.

Os produtores rurais chineses tiveram um programa de incentivo financeiro para construção de biodigestores que permitiu grande expansão na produção de biogás. Esse incentivo resultou na construção de 40 milhões de novas unidades. Apesar desse programa, vários projetos foram abandonados em razão das dificuldades de operação e da baixa rentabilidade (WANG et al., 2016). Uma política energética para desenvolvimento mais eficaz poderia ser a criação de um subsídio para a geração de energia elétrica e calor, o que permitiria viabilizar e manter a operação dos biodigestores. Essa alternativa poderia ajudar, de maneira mais efetiva, o fortalecimento do setor, pois as políticas atuais de incentivo ao biogás são menores do que o valor econômico das externalidades, justificando, assim, novos programas governamentais (WANG et al., 2016).

Além do mais, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e outras formas de incentivos, por meio de créditos de carbono associados à atividade, podem vir a permitir/incentivar a viabilidade econômica da produção de biogás. O que se percebe é que, atualmente, as externalidades do biogás são subestimadas ou não contabilizadas pela complexidade inerente à avaliação delas. Como exemplo, pode-se citar o estudo de Wang et al. (2016), que quantificaram apenas os benefícios

indiretos, i.e., externalidades positivas, na produção de biogás referentes à mitigação de gases causadores do efeito estufa, pois, segundo eles, a quantificação de outras externalidades positivas precisa “de mais esforços no futuro”. Esses autores citam também benefício social como possível outra externalidade positiva sem, no entanto, indicarem métodos de discriminar e quantificar.

Acredita-se que existem outras externalidades positivas, como: melhoria do saneamento, especialmente da qualidade da água e do ar; possibilidade de disponibilização de biofertilizantes; entre outras (MANESH et al., 2020). Apesar de tantos benefícios, Sovacool et al. (2021) afirmam que o estudo e determinação das externalidades são ainda superficiais, ou seja, apenas qualitativos, e necessitam de mais pesquisas. Além desses autores, vale citar Verner et al. (2021), que relatam que há dificuldade em converter os benefícios do biogás em vantagens econômicas, pois alguns desses benefícios estão na forma de externalidades, que não podem ser facilmente quantificadas financeiramente. A questão que se coloca é: não seriam esses benefícios mais diretamente para a sociedade envolvida? Melhor dizendo, o que poderia ser o caso de envolver políticas públicas para a sociedade e não somente, por exemplo, para o produtor rural?

Nessa linha de avaliação, menciona-se, ainda, Nordahl et al. (2020), que destacam que as estimativas de externalidades estão em estágios de avaliação econômica preliminar e enfatizam a importância de estudos para quantificação, por meio de avaliações mais detalhadas. O que se conclui é que atualmente o estudo das externalidades das energias renováveis é um campo aberto, o que para o biogás não é diferente (CASTRO et al., 2022). Apesar de existirem pesquisas na área, têm-se, na maioria das vezes, avaliações qualitativas de parte das externalidades do biogás (WANG et al., 2016; MANESH et al., 2020; SOVACOOOL et al., 2021; VERNER et al., 2021).

A produção de biogás gera muitas externalidades positivas que devem ser internalizadas nas avaliações, na perspectiva dos produtores rurais e da sociedade como um todo. Dessa forma, conhecer o valor econômico das externalidades é primordial para (re)elaboração de políticas públicas para incentivo a essa fonte renovável de energia. Entre as políticas públicas que devem ser afetadas, destacam-se aquelas relacionadas ao saneamento e, prioritariamente, ao planejamento energético. O que se espera é que os resultados possam ser utilizados no

embasamento e desenvolvimento de políticas públicas para fomento do uso do biogás como combustível renovável.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo geral

Propor metodologia para quantificar economicamente uma série de externalidades da digestão anaeróbia de resíduos da suinocultura para produção de biogás para geração de energia elétrica e calor.

2.3.2. Objetivos específicos

- Determinar as externalidades do biogás.
- Determinar o valor econômico do biogás.
- Estimar o valor econômico das externalidades em função do valor econômico do biogás.

2.4. Metodologia

Inicialmente, foi efetuada a estimativa do valor econômico do biogás utilizando a metodologia de custos evitados com outras fontes energéticas e considerando a capacidade de geração de energia elétrica e, ou, de calor. Essa etapa foi proposta para a obtenção de três cenários de precificação do biogás para que as externalidades pudessem ser estimadas em função do valor econômico deste produto. Também foi necessária porque, no Brasil, a comercialização do biogás ainda não é realidade por conta da falta de políticas energéticas que estimulem a produção desse biocombustível.

Posteriormente, para as externalidades da produção e utilização do biogás decorrentes da digestão anaeróbia de resíduos da suinocultura, foi proposta uma metodologia para estimar o valor econômico desse combustível de acordo com a perspectiva de avaliação do produtor rural ou da sociedade. Para isso, considerou-se que as externalidades em questão podem ser percebidas em granjas de suínos de médio e de grande porte (OCONNOR et al., 2021). A quantificação das externalidades

foi feita em relação ao valor econômico do biogás, em que se construiu um quadro sintetizando os resultados numéricos desses efeitos econômicos.

Apesar de os resultados serem representativos para o Brasil especificamente, considerou-se dados de Minas Gerais, que é o quarto maior estado produtor de carne suína do país e o terceiro do ponto de vista econômico. Essa consideração se dá pelo fato de Minas Gerais possuir grande potencial para produção de biogás, o que pode contribuir significativamente para aumentar a renovabilidade da matriz energética nacional.

2.4.1. Estimativa do valor econômico do biogás

Para precificar o biogás oriundo dos dejetos de suinoculturas, considerou-se que esse biocombustível pode ter concentração de metano que varia de 50% a 75% (INDRAWAN et al., 2018). A capacidade energética do biogás foi estimada com base no poder calorífico inferior, determinado pelo também poder calorífico inferior do metano, segundo o modelo linearizado de Nong et al. (2020) apresentado na Equação 2.1

$$Q_b = 35,93m_c + 0,0199 \quad (2.1)$$

onde Q_b é o poder calorífico inferior do biogás em MJ/m³ e m_c é a concentração de metano, adimensional.

Assim, a precificação desse gás foi realizada com base em custos evitados com energia elétrica, diesel e, ou, lenha, devido à capacidade de geração de energia elétrica e calor pelo biogás. Para estimar a produção de energia elétrica, considerou-se a eficiência energética de plantas de cogeração e geração de energias elétrica e térmica (PÖSCHL et al., 2010; BUDZIANOWSKI, 2016; MUCHE et al., 2016). Os intervalos de eficiências adotados se deram pela possibilidade de utilização de diferentes tecnologias e capacidades do conjunto motor-gerador.

A estimativa do preço do biogás, por meio de custos evitados, foi feita de acordo com a Equação 2.2 em que se considerou o poder calorífico dos combustíveis e preço dos energéticos em comparação

$$P = \frac{0,68P_e Q_b}{P_{ce}} \quad (2.2)$$

onde P é a estimativa de preço do biogás em R\$/m³, P_e é o preço do energético a ser comparado em R\$/kg e P_{ce} é o poder calorífico do energético a ser comprado em MJ/kg em comparação e o do biogás em MJ/m³.

Conhecendo a capacidade de geração de energias elétrica e térmica do biogás, estimou-se o valor econômico do biogás em função de custos evitados com: (i) energia elétrica no meio rural do estado de Minas Gerais, Brasil, na modalidade tarifária rural B2, obtido por média ponderada do histórico dos respectivos valores das tarifas de janeiro de 2015 a dezembro de 2021 (ANEEL, 2022a; CLARKE, 2022; CEMIGD, 2022); (ii) energia térmica, estimada com base na metodologia de custos evitados com lenha e diesel, que são os combustíveis com menor e maior custo por unidade energética, respectivamente (MFRURAL, 2022; MME, 2023a). A fim de obter a estimativa de valor econômico do biogás, consideraram-se três cenários de utilização do biogás para: (i) geração de energia elétrica, (ii) geração de energia elétrica e térmica pela cogeração e (iii) geração de calor. Esses três cenários foram determinados para prospectar uma estimativa de valor econômico do biogás por meio de custos evitados com outros energéticos para geração de energia elétrica e, ou, térmica.

A Equação 2.3 foi utilizada para obter a energia térmica ou elétrica gerada pelo biogás

$$E = 3,6 Q_b n \quad (2.3)$$

onde E é energia elétrica e/ou térmica gerada a partir de 1 m³ de biogás em kWh/m³, n é a eficiência energética para geração de energia elétrica e/ou térmica.

2.4.2. Estimativa do valor econômico das externalidades

Créditos de carbono

Para estimar o valor econômico da externalidade “créditos de carbono”, adotou-se a metodologia de emissões evitadas e a perspectiva do produtor rural, pois a ele competem os benefícios econômicos. Observa-se nessa externalidade que

disposição dos resíduos sem o tratamento via digestão anaeróbia, a exemplo da compostagem, propicia emissões de gases causadores do efeito estufa, predominantemente CH₄ e N₂O (BURG et al., 2018). Assim, a avaliação da externalidade foi feita considerando estes dois cenários: digestão anaeróbia e compostagem. Pela diferença de emissões entre essas duas técnicas, calcularam-se créditos de carbono equivalentes. Foi considerado que a digestão anaeróbia permite diminuir o impacto ambiental da disposição de resíduos da suinocultura, constituídos de fezes e urina (OLIVEIRA, 1993).

Considerou-se que esses resíduos dispostos em compostagem emitem, pela degradação da matéria orgânica, cerca de 32,49 gramas de CH₄ por kg de resíduo (q_{CH_4}) (LEI et al., 2022). As emissões de N₂O podem atingir 0,01125 a 0,020 g de N₂O por kg de resíduo da suinocultura (q_{N_2O}) (SARDÁ et al., 2020; OLIVEIRA, 2001). Considerando que a digestão anaeróbia permite o aproveitamento energético do biogás por meio da sua queima para geração de energia elétrica e, ou, térmica. O CH₄ é convertido em CO₂ e o óxido nitroso, em N₂. Assim, o potencial de contribuição para o aquecimento global é mitigado de forma significativa.

A externalidade foi calculada assumindo o valor econômico de créditos de carbono decorrente das emissões evitadas em tCO_{2eq} para a produção de biogás. Para isso, considerou-se: (i) a produção específica de biogás por kg de resíduo da suinocultura, segundo a metodologia de Kunz, de 2006 (p_b) que é de cerca de 0,0302 a 0,0453 m³ de biogás por kg de resíduo da suinocultura (p_b). A estimava segundo Kunz (2006) considera a concentração de metano no biogás, a capacidade máxima teórica de produção de metano pelo resíduo de 0,45 m³CH₄/kg de sólido volátil e a concentração de sólidos voláteis de 53,1 g_{sv}/L (MITO, 2018); (ii) o potencial de aquecimento global, do inglês Global Warming Potential (GWP), do CH₄ (p_{CH_4}) e do N₂O (p_{N_2O}) (IPCC, 2013). Reunindo esses elementos, por meio da Equação 2.4, foi possível estimar o valor econômico dessa externalidade em função da cotação de créditos de carbono (INVESTING, 2022)

$$C_C = \frac{(q_{CH_4} p_{CH_4} + q_{N_2O} p_{N_2O}) c_c}{p_b 10^6} \quad (2.4)$$

onde C_c é o valor econômico da externalidade créditos de carbono em R\$/m³ de biogás. Por último o valor da externalidade créditos de carbono foi calculado também em percentual do valor do biogás, considerando os três cenários de precificação do biogás apresentado na seção 2.4.1.

Subprodutos da biodigestão

A externalidade subprodutos da biodigestão foi quantificada economicamente sob a perspectiva do produtor rural a partir da premissa de que a opção mais viável para aproveitamento do digestato é a sua utilização como biofertilizante (BURG et al., 2018). O digestato contém Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK), que são nutrientes essenciais para todas as culturas. Essa opção de uso do digestato em substituição, ao menos parcial, aos fertilizantes minerais pode ser quantificada e, conseqüentemente, precificada. Assim, adotou-se a metodologia de custos evitados, uma vez que o NPK pode deixar de ser adquirido pelos produtores rurais que adotarem a utilização do digestato como biofertilizante.

A utilização do digestato como biofertilizante depende, essencialmente, da sua composição, pois há resíduos biodigeridos, cuja concentração de NPK (nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K)) pode ser variável, razão por que se considera que o digestato proveniente de suinoculturas contém as composições apontadas por Lukehurst et al. (2010) e Cândido et al. (2022). Melhor explicando, os fertilizantes que compõem o NPK comercial no Brasil são nitrogênio (ureia), fósforo (fosfato monoamônico) e potássio (KCl), cujos preços são, respectivamente, 4,592, 4,816 e 4,424 reais/kg, referentes a setembro de 2022. Utilizando as conversões desses compostos em nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), é possível avaliar o valor econômico da externalidade pela quantidade de macronutrientes produzidos em função da quantidade de biogás, por meio da Equação 2.5 (MAPA, 2022; MME, 2001)

$$S_b = \frac{\frac{q_N p_N}{0,45} + \frac{q_P p_P}{0,48} + \frac{q_K p_K}{0,52}}{p_b} \quad (2.5)$$

onde S_b é o valor da externalidade subprodutos da biodigestão atribuído pelos macronutrientes presentes, P_b é a produção de biogás por kg de digestato, q_N é a quantidade de nitrogênio no digestato, p_N é o valor comercial do nitrogênio, q_P é a

quantidade de fósforo no digestato, p_p é o valor comercial do fósforo, q_k é a quantidade de potássio no digestato, p_k é o valor comercial do potássio. O fator 0,45 se refere a conversão de Ureia a N e 0,48 se refere a conversão de fosfato monoamônico para P 0,52 de kCl para K (MAPA, 2022; MME, 2001; Kuntz, 2006).

O valor econômico da externalidade subprodutos da biodigestão foi calculado para três cenários: (i) mais otimista, em que foi considerada a composição com a maior concentração possível de nutrientes; (ii) intermediário, em que se considerou a composição com a menor concentração de nutrientes; e (iii) menos otimista, considerando-se a composição com apenas o nutriente com menor valor econômico e com concentração média, o valor da externalidade obtido em cada das três situações anteriores foi calculado também em percentual do valor do biogás, considerando os três cenários de precificação do biogás apresentado na seção 2.4.1.

Emprego e renda

Para estimar o valor econômico da externalidade emprego e renda, foi considerada a oportunidade de criação de emprego e renda oriundos da produção de biogás. Essa externalidade foi avaliada sob a perspectiva da sociedade, haja vista que a geração de vagas de emprego proporciona melhores condições de vida e oportunidades para a população em geral. Considerou-se que o processo de produção de biogás, por meio da digestão anaeróbia, demanda mão de obra para a construção e operação dos reatores. Na Tabela 2.1 são apresentados os custos de mão de obra para construção de diferentes biodigestores no Brasil.

Considerou-se a operação do biodigestor por um período de 10 anos, e assim o valor econômico das externalidades emprego e renda foi calculado levando-se em conta o seu valor igual ao custo com mão de obra para operação mais o custo de construção, rateados pelo período de operação. Procedeu-se aos cálculos para três cenários: (i) mais otimista, considerando-se dados da respectiva linha da Tabela 2.1, em que se obteve o maior valor econômico da externalidade; (ii) intermediário, considerando-se a média dos resultados obtidos para cada linha da Tabela 2.1, em que se obteve o valor econômico médio da externalidade; e (iii) menos otimista, considerando-se dados da respectiva linha da Tabela 2.1, em que se obteve o menor valor econômico da externalidade.

Tabela 2.1 – Custos de mão de obra para construção e operação de diferentes biodigestores tubulares não automatizados, no Brasil, aplicáveis a resíduos de suinocultura

Capacidade de produção específica de biogás (C_{pb}) biogás/mês biodigestor)	de (m^3 de)	Custo específico com mão de obra para construção * (C_o) (R\$/ m^3)	Custo específico para operação (C_{mo}) (R\$/mês m^3)	Referência
75.000		28,70	0,71	(NOGUEIRA et al., (2015)
21.870		27,53	nd	(AVACI et al., 2013)
27.330		26,20	nd	(AVACI et al., 2013)
16.620		31,70	nd	(AVACI et al., 2013)
3.600**		23,40	nd	(DIEL et al., 2020)

1 dólar = 5,20 reais em setembro de 2022; nd = dado não disponibilizado.

*Os valores foram estimados considerando a mão de obra para instalação igual a 50% do custo total de instalação.

**Valor estimado pela geração de energia elétrica considerando 1,62 kWh/ m^3 de biogás a 50% de teor de CH₄ (NISHIMURA et al, 2008).

Considerando a operação do biodigestor por um período de 10 anos, por meio da Equação 2.6 pode-se estimar o valor da externalidade emprego e renda (E_r) proporcionada diretamente pela produção de biogás

$$E_r = \frac{\frac{C_{mo}}{120} + C_o}{C_{pb}} \quad (2.6)$$

onde C_{mo} é o custo com mão de obra para construção do biodigestor, C_o é o custo de operação mensal do biodigestor e C_{pb} é a capacidade de produção de biogás mensal. O valor da externalidade emprego e renda foi calculado também em percentual do valor do biogás, considerando os três cenários de precificação do biogás apresentado na seção 2.4.1.

Armazenamento de energia

O biogás pode ser armazenado com relativa facilidade no interior dos biodigestores ou reservatórios exclusivos para essa finalidade. O armazenamento permite que o biogás seja utilizado para geração de energia elétrica de forma não

uniforme ao longo do dia. Assim, todo o biogás produzido pode ser usado para geração de energia apenas no horário em que o sistema elétrico é mais solicitado e, ou, o retorno financeiro for maior, i.e., horário de ponta que corresponde a um período de três horas por dia, em dias úteis, enquanto as demais 21 horas e os finais de semana e feriados nacionais são considerados como período fora de ponta. Esse sistema é utilizado no Brasil para tarifação de energia elétrica e faz a distinção de preços nesses dois períodos. Ressalta-se que essa tarifação, denominada tarifa horosazonal, taxa separadamente consumo e demanda (ANEEL, 2023b).

Considerando que o modelo tarifário brasileiro pode prever a tarifação binômia, ou seja, com distinção entre o horário de ponta e o fora de ponta, calculou-se a externalidade visando ao ganho pela diferença de preço da energia elétrica nesses dois horários. Assim, essa externalidade foi calculada considerando que o biogás pode permitir a geração de energia elétrica apenas no horário de ponta, razão por que se calculou a externalidade pela diferença entre um cenário de geração uniforme ao longo do dia para outro de apenas geração no horário de ponta.

Considerou-se a possibilidade de armazenamento do biogás, o que pode permitir que ele seja utilizado em sua totalidade no horário de ponta. A estimativa da externalidade considera que possa haver mudança do padrão de geração de um cenário de geração uniforme, ou seja, 21 horas no período fora de ponta e três horas no horário de ponta, em dias úteis, para geração total apenas no horário de ponta e com comercialização/utilização da energia exclusivamente nesse horário.

O armazenamento de biogás pode permitir também o suprimento de energia nos períodos de não fornecimento da concessionária de energia, i.e., horários de contingências. Sabe-se que o prejuízo do não fornecimento pode variar de 9,67 a 42,43 vezes o valor econômico da energia fornecida (EURASAT, 2019A; EURASAT, 2019B; REICHL, 2013; ZACHARIADIS, 2012). Considerou-se que, em média, o período de interrupção de fornecimento da Cemig D, que é a concessionária de distribuição de energia elétrica de Minas Gerais, foi de 10 horas/ano (ANEEL, 2022a).

Pôde-se calcular o valor econômico estimado da externalidade armazenamento de energia por meio da Equação 2.7

$$A_e = \frac{21(t_p - t_{fp})}{c} + \frac{p_i p_{nf}}{8760c} \quad (2.7)$$

onde A_e é o valor da externalidade armazenamento de energia, c é energia elétrica produzida a partir de 1 m^3 de biogás em kWh/m^3 e t_p é a tarifa no horário de ponta e t_{fp} é a tarifa no horário fora de ponta, p_i é o período por ano de não fornecimento de energia elétrica, em horas, p_{nf} é o prejuízo do não fornecimento de energia elétrica, em função do valor da energia fornecida e c é energia elétrica produzida a partir de 1 m^3 de biogás em kWh/m^3 . O valor da externalidade armazenamento de energia foi calculado também em percentual do valor do biogás, considerando o segundo cenário de precificação apresentado na seção 2.4.1. pois nesse caso, considerou-se apenas a possibilidade de geração de energia elétrica.

Redução das despesas com saúde pública e impactos ambientais

A externalidade redução das despesas com saúde pública e impactos ambientais foi quantificada considerando que a geração de energia elétrica por meio do biogás pode ser um substituto da utilização da energia elétrica proveniente da atual matriz elétrica brasileira. Para permitir estimar essa externalidade, quantificaram-se as despesas com saúde pública e impactos ambientais proporcionados tipicamente por cada tipo de fonte de geração que compõem a matriz energética nacional. Os valores dessas despesas para a América Latina foram propostos por Rafaj e Kypreos (2007) e Karkour et al. (2020) e podem ser vistos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Custo estimado com as despesas de saúde pública e impactos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica no Brasil

Fonte de geração de energia elétrica	¹ Custo em R\$/kWh	² Custo em R\$/kWh
Carvão e derivados	0,667800	0,023
Hidráulica	0,006825	0,002
Biomassa	0,002048	-
Eólica	0,006825	0,003
Solar	0,006825	0,006
Gás natural	0,088730	0,047
Derivados de petróleo	0,127600	0,081
Nuclear	0,035700	0,001

Fonte: (¹Rafaj e Kypreos, 2007; ²Karkour et al., 2020).

Considerou-se a atual composição da matriz elétrica do Brasil para estimar as despesas de saúde pública e impactos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica, em R\$/kWh (d_s). A geração de energia elétrica por meio da queima do biogás oriundo da digestão anaeróbia de resíduos de suinoculturas é um recurso energético que pode ser implementado na matriz energética. E, assim, estimou-se a externalidade redução das despesas com saúde pública e impactos ambientais (R) por meio da Equação 2.8

$$R = d_s q_b n \quad (2.8)$$

onde q_b é o poder calorífico inferior do biogás em kWh/m³. Por último, o valor da externalidade redução das despesas com saúde pública e impactos ambientais foi calculado também em percentual do valor do biogás, considerando o segundo cenário de precificação do biogás apresentado na seção 2.4.1. pois aqui novamente se considerou apenas a geração de energia elétrica.

Qualidade de energia

A externalidade qualidade de energia foi subdividida em duas subexternalidades: perdas nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica e perfil de tensão. A primeira foi calculada, pois a geração de energia elétrica por meio do biogás sob a forma de geração distribuída possibilita reduzir as perdas dos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica. Na segunda, considera-se que possa haver melhoria do perfil de tensão pela inserção também da geração distribuída, o que diminui as compensações pagas aos usuários do sistema elétrico.

Para quantificação da externalidade redução de perdas nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, considerou-se que a produção de biogás permite o atendimento da demanda de energia elétrica localmente, pois viabiliza a geração de energia elétrica sob a forma de micro e minigeração distribuída. Para isso, considerou-se que as perdas de energia elétrica da distribuição podem ser evitadas graças à inserção da geração distribuída. Considerando que as perdas de energia elétrica do Brasil na transmissão e distribuição são cerca de 17% (p_e) (ANEEL,

2021; ANEEL, 2022b), pôde-se estimar por meio da Equação 2.9 o valor da externalidade

$$R_p = \frac{1 + p_e}{c} \quad (2.9)$$

onde R_p é o valor econômico estimado da externalidade redução de perdas nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, em percentual do valor econômico do biogás.

A externalidade melhoria do perfil de tensão foi calculada considerando que a inserção da geração distribuída pode permitir que os custos com o pagamento de multas e compensações pelo descumprimento do perfil de tensão possam ser evitados, por isso considerou-se que esses custos evitados podem ser internalizados sob a perspectiva da sociedade. O valor econômico da externalidade pode ser estimado por meio da metodologia proposta por Castro et al. (2022) e se baseia na metodologia de custos evitados com compensações pagas aos consumidores. Para isso foram considerados o total das compensações pagas no ano 2022, o total de energia consumida nesse mesmo ano e a eficiência de conversão de 20% a 45% do biogás em energia elétrica (ANEEL, 2023; MME, 2022; BUDZIANOWSKI, 2016).

2.5. Resultados e discussão

2.5.1. Quantificação do valor econômico do biogás

A estimativa de poder calorífico do biogás de acordo com o modelo linearizado de Nong et al. (2020) resultou em uma aproximação linear variando de 17,99 MJ/m³ a 26,97 MJ/m³, nas concentrações de 50% a 75% de metano no biogás. Inicialmente, obteve-se o preço da energia elétrica segundo a tarifa B2 rural de 0,6554 R\$/kWh, do diesel de 0,66 R\$/kWh de energia térmica e da lenha de 0,05 R\$/kWh de energia térmica. Tais valores foram utilizados para estimar o preço do biogás por meio da metodologia de custos evitados em granjas de suínos. Os resultados são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Custo evitados com biogás para geração de energia elétrica e térmica

Geração de energia e custos evitados	Tipo de geração					
	Elétrica		Cogeração, Custos evitados com diesel e (lenha)		Térmica, Custos evitados com diesel e (lenha)	
	Min.*	Max.*	Min.*	Max.*	Min.*	Max.*
Geração elétrica, em kWh	1,00	3,37	1,65	3,00	0,00	0,00
Geração térmica, em kwh	0,00	0,00	2,39	3,75	4,00	6,74
Valor econômico, em R\$/m ³ de biogás	0,65	2,21	2,66(1,21)	4,42(2,17)	1,78(0,21)	3,01(0,36)

*Min. e Max. se referem às situações de menor e maior rendimento de conversão energética e concentração de metano.

Pelos resultados obtidos da geração de energia elétrica, da cogeração e da geração de energia térmica, pode-se concluir que o cenário menos otimista seria a utilização exclusiva do biogás para a geração de energia térmica em substituição à lenha. Nessa situação, o biogás pode gerar uma economia de até 0,29 R\$/m³, em média. O cenário intermediário ocorre quando o biogás é utilizado para a geração de energia elétrica, atingindo, em média, 1,43 R\$/m³. O cenário mais otimista acontece na situação de cogeração com custos evitados de diesel, em que o biogás pode gerar até 3,54 R\$/m³, em média. Foram considerados os valores médios obtidos para cada um desses cenários, pois a eficiência e a concentração de metano no biogás podem depender, respectivamente, do porte da granja e da eficiência do processo de biodigestão. É importante destacar que a metodologia proposta se destina apenas à estimativa do valor econômico. A viabilidade de cada uma das três alternativas citadas pode depender do porte da granja e da demanda energética.

2.5.2. Valor econômico das externalidades

Créditos de carbono

A estimativa de valor econômico da externalidade créditos de carbono sob a perspectiva do produtor rural revelou que o valor da externalidade pode variar de 2,10 a 3,15 R\$/m³ de biogás. O valor econômico inferior foi obtido considerando o mínimo de emissões de poluentes, enquanto o maior, 3,15 R\$/m³, foi obtido para situação extrema oposta. Para a externalidade, o valor de 2,10 R\$/m³ de biogás representa 726,89%, 157,31% e 59,55% do valor econômico do biogás para os respectivos

cenários calculados: menos otimista, intermediário e mais otimista. O valor de 3,15 R\$/m³ de biogás da externalidade representa 1.087,80%, 235,41% e 89,11% do valor econômico do biogás para os respectivos cenários calculados: menos otimistas, intermediários e mais otimistas.

É interessante destacar que os resultados são relativos à cotação de créditos de carbono de R\$85,98 por tCO_{2eq}. A cotação dos créditos de carbono, que teve início em 2005 com a implantação do MDL, está defasada desde o começo do enfraquecimento desse mercado em 2012. Portanto, o mercado de créditos de carbono ainda carece de atenção (MICHAELOWA et al., 2019). No cenário brasileiro, após a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 (COP21) foi estabelecida a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que por sua vez regulamentou créditos de descarbonização (C_{BIO}) (B3, 2022). Em setembro de 2022, a cotação do C_{BIO} foi de 101,97 R\$/tCO_{2eq} (DATAGRO, 2022). Se considerarmos esse valor, temos que a externalidade pode representar de 70,62% a 1.290,10% do valor econômico do biogás gerado, ou seja, um aumento de cerca de 19% se comparado com a cotação de créditos de carbono e com tendência de crescimento, dadas as crescentes preocupações ambientais.

Subprodutos da biodigestão

Os resultados da externalidade subprodutos da biodigestão são vistos na Tabela 2.4 e demonstram que, para os preços de fertilizantes praticados no ano 2022, o valor econômico da externalidade em questão pode alcançar até cerca de seis vezes o valor econômico estimado para o biogás. Esse resultado foi para um cenário em que, no Brasil, os fertilizantes NPK atingiram alto valor econômico e houve um aumento da ordem de 100% devido à pandemia de Covid-19 e à guerra na Ucrânia (ESALQ, 2022). Mesmo considerando os preços praticados anteriores ao cenário pandêmico vivenciado no setor agrícola brasileiro, o valor econômico da externalidade ainda poderia ser superior ao valor econômico estimado para o biogás.

Tabela 2.4 – Valor econômico da externalidade subprodutos da biodigestão para diferentes cenários

Cenários de avaliação da externalidade	Aproveitamento de fertilizante, em kg por tonelada de digestato			Valor econômico da externalidade, em R\$/m ³ de biogás	Valor econômico da externalidade em relação aos três cenários de precificação do biogás, em % do valor econômico do biogás		
	N	P	K		Mais otimista: biogás a 3,54 R\$/m ³	Intermediário: biogás a 1,34 R\$/m ³	Menos otimista: biogás a 0,29 R\$/m ³
Mais otimista	4,00	0,80	2,00	1,74	49,28	130,20	601,60
Intermediário	1,80	0,10	0,40	0,60	17,04	45,02	208,03
Menos otimista	0,00	0,45	0,00	0,12	3,38	8,93	41,24

Segundo os resultados obtidos por Silva et al. (2022), a tonelada de digestato pode valer cerca de R\$ 20. Esse resultado está cerca de apenas 12% menor do que os obtidos para o cenário intermediário dessa externalidade, considerando a razão entre a produção de biogás e a de digestato. Os resultados desses autores podem ser menores do que os do caso intermediário deste estudo, pois existem variações de composição e concentração dos nutrientes. Por último, o resultado de Silva et al. (2022) se refere a preços de comercialização do digestato, o que também é coerente, uma vez que o valor de mercado tende a ser inferior aos obtidos pela metodologia de custos evitados adotada neste artigo.

Emprego e renda

A externalidade emprego e renda foi estimada do ponto de vista da sociedade. Os resultados da estimativa econômica dessa externalidade são apresentados na Tabela 2.5.

Para os cenários avaliados, a externalidade é positiva para a sociedade e pode valer de 5,65% a 89,66% do valor econômico do biogás produzido. Com a metodologia proposta para avaliação desta externalidade, foi considerada apenas a geração direta de empregos, cabendo destacar que são gerados também empregos indiretos, o que aumenta os benefícios sociais. Os resultados apontam que programas

de incentivo ao biogás podem ser financiados com parte dos recursos e benefícios econômicos que as externalidades possibilitam para a sociedade.

Tabela 2.5 – Valor econômico da externalidade emprego e renda para diferentes cenários

Cenários de avaliação da externalidade	Valor econômico da externalidade, em R\$/m ³ de biogás	Valor econômico da externalidade em relação aos três cenários de precificação do biogás, em % do valor do biogás			
		Mais biogás a 3,54 R\$/m ³	Intermediário biogás a 1,34 R\$/m ³	Menos otimista biogás a 0,29 R\$/m ³	otimista
Mais otimista	0,26	7,34	19,40	89,66	
Intermediário	0,22	6,21	16,41	75,86	
Menos otimista	0,20	5,65	14,92	68,96	

Armazenamento de energia

Para a externalidade armazenamento de energia, considerou-se apenas o cenário intermediário de avaliação do valor econômico do biogás para estimar o valor da externalidade em função do biogás. Tal premissa foi adotada, pois essa externalidade se associa à geração de energia elétrica, e os demais cenários de avaliação do biogás consideram a geração de energia térmica. A consideração apenas do valor econômico intermediário do biogás foi feita para todas as externalidades que levam em conta apenas os impactos da geração de energia elétrica. O valor dessa externalidade foi calculado para quatro modalidades tarifárias, conforme apresentado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Valor econômico da externalidade armazenamento de energia

Modalidade tarifária	Valor econômico da externalidade armazenamento de energia, em R\$/m ³ de biogás (% do valor econômico do biogás)	
	Mínimo	Máximo
B2 Rural	0,01 (0,75)	0,05 (3,73)
Branca	4,41 (329,1)	15,04 (1.122,39)
Azul	0,92 (68,66)	3,15 (235,07)
Verde	8,38 (625,37)	28,52 (2.128,36)

A tarifa B2 rural é usualmente aplicada a pequenos produtores brasileiros, pois essa modalidade prevê o fornecimento de energia elétrica em baixa tensão. Essa condição se deve ao fato de a demanda energética ser menor. A modalidade tarifária branca também se aplica a pequenos produtores, pois é uma tarifa de baixa tensão. Cabe destacar que os valores para a modalidade tarifária branca são superiores aos da B2 rural, porque nessa tarifa se prevê a tarifação horo-sazonal.

A modalidade tarifária azul se aplica a grandes e médios produtores rurais por ser de alta tensão, ou seja, mais apropriada para demandas maiores do que as atendidas pelos dois modelos tarifários anteriores. Também é do tipo horo-sazonal, assim como a branca, no entanto as diferenças do valor da tarifa de consumo entre o horário de ponta e o fora de ponta são menores do que as observadas na tarifa branca. A tarifa verde, assim como a azul, é aplicável a grandes e médios produtores, porém a diferença entre os valores de ponta e fora de ponta é maior do que para a tarifa azul, o que significa que para essa modalidade tarifária se têm os maiores valores para a externalidade. Os resultados indicam que para a modalidade verde o valor da externalidade é maior, e essa tamanha expressividade reforça a importância dessa externalidade, inclusive, na escolha de modelos tarifários a serem adotados pelos produtores rurais.

Redução das despesas com saúde pública e impactos ambientais

Esta externalidade foi calculada a partir do custo estimado com as despesas de saúde pública e impactos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica no Brasil. Assim, obteve-se o valor econômico de despesas de saúde pública e impactos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica no Brasil de 0,039 R\$/kWh e 0,011 R\$/kWh. É interessante observar que existe uma discrepância de valores que pode ser atribuída à diferença de metodologias de Rafaj e Kypreos (2007) e Karkour et al. (2020).

Por exemplo, em usinas geradoras de energia elétrica que utilizam combustíveis fósseis e se encontram instaladas próximas de grandes centros urbanos ou de áreas densamente povoadas, podem ocorrer maiores impactos em despesas com saúde pública, em comparação com situações de instalação dessas usinas em locais remotos. Além do mais, até mesmo a localização dentro de determinada cidade pode afetar os custos com saúde pública e impactos ambientais. Por fim, para estudos

pontuais de avaliação desta externalidade, deve-se estabelecer uma região e determinar possíveis impactos locais, a fim de particularizar os resultados.

Para valor econômico de despesas de saúde pública e impactos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica no Brasil igual a 0,039 R\$/kWh, verificou-se que o valor econômico da externalidade variou de 0,065 a 0,119 R\$/m³ de biogás. Os respectivos valores representam de 4,85% a 8,88% do valor econômico do biogás para um cenário intermediário, em que se calculou o valor econômico do biogás destinado à geração de energia elétrica. Para o valor econômico de despesas de saúde pública e impactos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica no Brasil igual a 0,011 R\$/kWh o valor da externalidade variou de 0,018 a 0,033 R\$/m³ de biogás, valores esses que representam 1,34% e 2,46%, respectivamente, do valor econômico do biogás para o cenário intermediário.

Para a externalidade em questão, conclui-se que ela pode representar de 1,34% a 8,88% do valor econômico do biogás, no Brasil. Esses valores poderiam ser muito superiores se calculados para outros países. Como a matriz elétrica brasileira conta com grande participação de fontes renováveis, cerca de 77%, o custo estimado com as despesas de saúde pública e impactos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica no país é significativamente inferior aos obtidos para países desenvolvidos que não possuem matriz elétrica predominantemente renovável (MME, 2022).

Qualidade de energia

A avaliação da externalidade qualidade de energia foi subdividida em duas subexternalidades, denominadas redução de perdas nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica e perfil de tensão. Cabe destacar que os resultados desta externalidade podem ser obtidos pela adição das duas subexternalidades. Assim, pela adição dos resultados apresentados, a externalidade pode valer cerca de 17,5% a 58,6% do valor do biogás. Essa faixa de valores denota a importância desta externalidade para a sociedade, pois a melhoria da qualidade de energia se traduz em benefícios diretos para o setor elétrico.

O valor econômico da externalidade redução de perdas nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica variou de 17,00% a 57,00% do valor econômico do biogás. A metodologia de quantificação dessa externalidade permitiu a

obtenção de resultados diretos, em porcentagem, do valor econômico desse biocombustível. Essa situação foi possível graças à particularidade da metodologia proposta para a externalidade em foco. Assim, seu resultado dispensou a construção de uma segunda etapa de cálculos considerando os cenários-base de determinação do valor econômico do biogás, como realizado também para as demais externalidades.

Cabe destacar que apenas as reduções das perdas de energia elétrica possibilitadas pela geração distribuída por meio do biogás podem alcançar até mais da metade de seu valor econômico em benefícios para a sociedade. Tais resultados evidenciam e reforçam ainda mais a necessidade de incentivo ao biogás, que pode ser financiado pela internalização das externalidades. A redução das perdas pode ser considerada um benefício social, haja vista que os custos relativos a essas perdas são incluídos nas faturas de energia e repassados para a sociedade de forma geral.

O valor econômico da externalidade perfil de tensão variou de cerca de 0,006 a 0,020 R\$/m³ de biogás. Os respectivos valores representam de 0,47% a 1,58% do valor econômico do biogás para o cenário intermediário, em que se calculou o valor econômico do biogás destinado à geração de energia elétrica. Apesar de os valores serem uma média para o Brasil, em análises pontuais se podem obter resultados superiores para a subexternalidade, se for em locais onde o sistema elétrico apresenta condições deficitárias.

Avaliação das externalidades

A Tabela 2.7 resume os resultados econômicos das externalidades, em percentual do valor econômico do biogás. Cabe destacar que as faixas de valores apresentadas na Tabela 2.7 foram amplas, haja vista as considerações feitas no estudo visando desenvolver uma metodologia de aplicação para o Brasil, especificamente para o estado de Minas Gerais. A tendência é de que, com a particularização, sejam obtidos resultados com uma faixa mais estreita para cada externalidade. Por exemplo, as externalidades foram calculadas considerando três cenários, em que para uma situação específica a particularização dos resultados permite estimativa mais precisa.

Tabela 2.7 – Valor econômico estimado para as externalidades estudadas

Externalidade	Perspectiva	Valor econômico da externalidade (percentual do valor econômico do biogás)
Créditos de carbono	Produtor rural	59,55 a 1.087,80
Subprodutos da biodigestão	Produtor rural	3,38 a 601,60
Emprego e renda	Sociedade	5,65 a 89,66
Armazenamento de energia	Produtor rural	0,75 a 2.128,36
Redução das despesas com saúde pública e impactos ambientais	Sociedade	1,34 a 8,88
Qualidade de energia	Sociedade	17,47 a 58,58

Os resultados apresentados na Tabela 2.7 reforçam a importância das externalidades, ao passo que o valor econômico de três delas pode superar o valor do próprio biogás. Os maiores valores foram obtidos para a perspectiva de avaliação do produtor rural. Uma pesquisa realizada na Alemanha demonstrou que a implantação de biodigestores não alterou a valorização de propriedades rurais (MYRNA et al., 2019). Isso pode ser explicado pelo fato de esse sistema ser essencial para o tratamento dos efluentes das atividades, ou seja, por ser necessário não agrega valor adicional, no entanto, nesta pesquisa, ficaram demonstradas as oportunidades das externalidades. Para essas externalidades, pode-se até mesmo pensá-las enquanto atividade principal, haja vista que o valor dessas externalidades por si pode superar o valor econômico do biogás. Assim como para a perspectiva do produtor rural, os resultados para a sociedade indicam que os benefícios podem ser extensos, a ponto de o conjunto delas superar o valor do biogás.

Além de vantagens claras para os produtores rurais, a sociedade também se beneficia diretamente das externalidades emprego e renda, redução das despesas com saúde pública e impactos ambientais e qualidade de energia. Tais externalidades podem valer cerca de 24% a 157% do valor econômico do biogás. Essa é uma valiosa estimativa, pois pode fundamentar programas de incentivo para a produção de biogás de resíduos da suinocultura e, conseqüentemente, ampliar o tratamento de efluentes e a disponibilidade energética. Os benefícios sociais se estendem além das externalidades quantificadas nesta pesquisa e devem também ser considerados nos

projetos de desenvolvimento do biogás, que são fundamentais para o planejamento energético.

As políticas públicas de incentivos a fontes renováveis podem ser fundamentadas nos resultados demonstrados neste estudo. Por exemplo, políticas de incentivo à produção de biogás podem permitir a autossuficiência energética de forma eficiente em suinoculturas. Por sua vez, a autossuficiência pode permitir o funcionamento de granjas em locais remotos, sem acesso à rede elétrica, ou em situações em que o acesso é difícil em razão da grande distância.

A independência energética no setor rural pode resultar em vantagens estratégicas, em função da importância desse recurso na cadeia produtiva e geração de renda, garantindo a prosperidade econômica e a estabilidade nacional (DANISH et al., 2017). As políticas de incentivo ao biogás podem ser ainda mais relevantes e urgentes em cenários de escassez energética, como em situações causadas por desequilíbrios em nível local. Por exemplo, eventos climáticos ou regionais que aumentam a demanda ou condições de menor cooperação internacional.

2.6. Conclusões e implicações em políticas energéticas

A avaliação das externalidades é fundamental para maior entendimento da produção de biogás da suinocultura por meio da digestão anaeróbia de resíduos no Brasil. Como demonstrado neste estudo, as externalidades tiveram valores positivos extremamente significativos, superando o valor econômico do biogás. Além do mais, a avaliação das externalidades pode permitir a comparação justa entre energéticos e, assim, viabilizar políticas públicas de incentivo adequadas para as fontes que apresentam maiores benefícios para a sociedade. O maior entendimento dessas externalidades pode ser fundamental no planejamento energético, pois o Brasil possui o maior potencial mundial de produção de biogás em razão da grande produção agropecuária. A geração de resíduos da produção de suínos é um desafio do ponto de vista ambiental, haja vista o grande impacto ambiental caso não haja tratamento desses rejeitos.

Como demonstrado, sob a perspectiva do produtor rural, as externalidades créditos de carbono, subprodutos da biodigestão e armazenamento de energia podem valer, se somadas, de 60% a 3.800% do valor econômico do biogás nos cenários

estudados. Fica patente, então, a importância de se contabilizarem economicamente as externalidades tanto na análise de viabilidade quanto na análise de priorização de investimentos. Juntas, deve-se considerar que essas externalidades são oportunidades, mas que podem depender de especificidades locais ou regionais, por isso os resultados foram encontrados em uma ampla faixa de valores.

Os resultados desta pesquisa podem fomentar a proposição de políticas de desenvolvimento de produção de biogás e embasamento para o plano nacional do biogás. A contrapartida para a sociedade por financiar um plano nacional de incentivo com políticas que estimulem o aumento da produção de biogás pode estar fortemente justificada pela consideração de externalidades e pela destinação de parte do seu valor econômico para a proposição de novas políticas energéticas. Dessa forma, contribui fortemente com a sociedade, haja vista que os benefícios, como demonstrados nesta pesquisa, estarão além do valor do próprio biogás tão logo subsídios à produção desse energético possam ser propostos em trabalhos futuros.

Ressalta-se que a avaliação das externalidades ainda é um campo aberto para pesquisas e um estudo mais minucioso caso a caso é indispensável. Outras perspectivas de avaliação também são válidas em estudos futuros de quantificação das externalidades, cujas particularidades podem depender do porte das granjas e de outras questões relativas às atividades desenvolvidas nas propriedades rurais. O estudo de novas externalidades também se faz necessário. Isso porque as externalidades do biogás oriundo de outras fontes, como resíduos agropecuários, resíduos urbanos, resíduos agroindustriais e produção vegetal, também devem ser quantificadas, a fim de permitir melhor compreensão de todo o potencial brasileiro, o que auxiliará na realização do planejamento desta fonte renovável de energia em nível nacional.

2.7. Referências

ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual–2022**. ABPA:2022,144p. Disponível em: <https://abpa-br.org/quem-somos/abpa-relatorio-anual/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Ranking das distribuidoras**. 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-divulga-desempenho-e-ranking-das-distribuidoras-sobre-fornecimento-de-energia-em-2021>. Acesso em: 02 mar. 2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Bandeiras tarifárias**. 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 02 mar. 2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Modalidades tarifárias**. 2023b <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/modalidades-tarifarias>. Acesso em: 02 mar. 2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Painel de desempenho**. 2022a. Disponível em: <http://rap.aneel.gov.br/relatoriosRAP/?folder=ANEEL/SFE/PubSFE&report=PainelDesempenhoBinew>. Acesso em: 02 mar. 2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Perdas de energia elétrica**. 2021. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia+Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2021.pdf/143904c4-3e1d-a4d6-c6f0-94af77bac02a>. Acesso em: 02 mar. 2023.

ARDOLINO, F.; COLALEO, G.; ARENA, U. The cleaner option for energy production from a municipal solid biowaste. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, p. 121908, set. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121908>.

AVACI, A. B.; SOUZA, S. N. M. de; WERNCKE, I.; CHAVES, L. I. Financial economic scenario for the microgeneration of electric energy from swine culture-originated biogas. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 272-276, set. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.005>.

B3. **Crédito de descarbonização cbio**. 2022. Disponível em: <https://www.b3.com.br/pt-br/produtos-e-servicos/outros-servicos/servicos-de-natureza-informacional/credito-de-descarbonizacao-cbio/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

BARTCZAK, A.; CHILTON, S.; CZAJKOWSKI, M.; MEYERHOFF, J. Gain and loss of money in a choice experiment. The impact of financial loss aversion and risk preferences on willingness to pay to avoid renewable energy externalities. **Energy Economics**, v. 65, p. 326-334, jun. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2017.04.020>.

BEHMEL, S.; DAMOUR, M.; LUDWIG, R.; RODRIGUEZ, M. J. Participative approach to elicit water quality monitoring needs from stakeholder groups – An application of integrated watershed management. **Journal Of Environmental Management**, v. 218, p. 540-554, jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.076>.

BUDZIANOWSKI, W. M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1148-1171, fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.054>.

BURG, V.; BOWMAN, G.; HAUBENSAK, M.; BAIER, U.; THEES, O. Valorization of an untapped resource: energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. **Resources, Conservation and**

Recycling, v. 136, p. 53-62, set. 2018.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.004>.

CÂNDIDO, D.; BOLSAN, A. C.; HOLLAS, C. E.; VENTURIN, B.; TÁPPARO, D. C.; BONASSA, G.; ANTES, F. G.; STEINMETZ, R. L. R.; BORTOLI, M.; KUNZ, A. Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113825, jan. 2022.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113825>.

CASTRO, P. H. G. R. P.; OLIVEIRA FILHO, D.; TOLEDO, O. M.; CARLO, J. C.; DINIZ, A. S. A. C. Integrated analysis of photovoltaic system externalities in Brazil: public health expenditures, energy quality, architectural aspects and real estate value. **Renewable Energy and Environmental Sustainability**, v. 7, p. 13, 2022.
<http://dx.doi.org/10.1051/rees/2022002>.

CEMIGD. Cemig Distribuição. Valores de tarifas e serviços. 2022. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

CHOWDHURY, T.; CHOWDHURY, H.; HOSSAIN, N.; AHMED, A.; HOSSEN, M. S.; CHOWDHURY, P.; THIRUGNANASAMBANDAM, M.; SAIDUR, R. Latest advancements on livestock waste management and biogas production: bangladeshs perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122-818, 2020.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122818>.

CLARKE. **Entenda o histórico do sistema de bandeiras tarifárias no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://clarke.com.br/entenda-o-historico-do-sistema-de-bandeiras-tarifarias-no-brasil/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

DANISH, M. S. S.; SENJYU, T.; SABORY, N. R.; DANISH, S. M. S.; LUDIN, G. A.; NOORZAD, A. S.; YONA, A. Afghanistan's aspirations for energy independence: water resources and hydropower energy. **Renewable Energy**, v. 113, p. 1276-1287, dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.090>.

DATAGRO. **CBIO - Crédito de descarbonização**. 2022. Disponível em: <https://cbio.datagro.com/cbio/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

DIEL, P. B.; CASARIN, V. A.; STRACKE, M. P.; SILVA, D. J. C. da; SANTOS, A. V. dos; PRZYCYNSKI, R. Economic management model of electricity generated from biomass in a pig farm. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 132-138, abr. 2020.
<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p132-138/2020>.

ESALQ. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. **Gasto médio com fertilizantes para produção de grãos dobra em um ano**. 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opinio-ao-cepea/gasto-medio-com-fertilizantes-para-producao-de-graos-dobra-em-um-ano.aspx#:~:text=A%20cota%C3%A7%C3%A3o%20m%C3%A9dia%20do%20MAP,de%20mar%C3%A7o%20do%20ano%20passado>. Acesso em: 02 mar. 2023.

EUROSTAT. **Electricity prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards)**. 2019b. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205/default/table?lang=en. Acesso em: 02 mar. 2023.

EUROSTAT. **Electricity prices for non-household consumers**. 2019a. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics. Acesso em: 02 mar. 2023.

FRØSETH, R. B.; BAKKEN, A. K.; BLEKEN, M. A.; RILEY, H.; POMMERESCH, R.; THORUP-KRISTENSEN, K.; HANSEN, S. Effects of green manure herbage management and its digestate from biogas production on barley yield, N recovery, soil structure and earthworm populations. **European Journal of Agronomy**, v. 52, p. 90-102, jan. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.006>.

HOLLAS, C. E.; RODRIGUES, H. C.; BOLSAN, A. C.; VENTURIN, B.; BORTOLI, M.; ANTES, F. G.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. Swine manure treatment technologies as drivers for circular economy in agribusiness: a techno-economic and life cycle assessment approach. **Science of the Total Environment**, v. 857, p. 159494, jan. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159494>.

INDRAWAN, N.; THAPA, S.; WIJAYA, M. E.; RIDWAN, M.; PARK, D. The biogas development in the Indonesian power generation sector. **Environmental Development**, v. 25, p. 85-99, mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2017.10.003>.

INVESTING, **The economic and social impacts of a carbono tax in Brazil**. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>. Acesso em: 02 mar. 2023.

IPCC (2013) Climate Change 2013: **The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report - Changes to the underlying Scientific/Technical Assessment**. Disponível em: https://www.klimamanifest-von-heiligenroth.de/wp/wp-content/uploads/2016/06/IPCC_2013_WG1AR5_S916_S917_Extremwetter_Zitate_mitTitelCover.pdf. Acesso em: 02 mar. 2023.

JENSEN, I. G.; SKOVSGAARD, L. The impact of CO₂-costs on biogas usage. **Energy**, v. 134, p. 289-300, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.019>.

KARKOUR, S.; ICHISUGI, Y.; ABEYNAYAKA, A.; ITSUBO, N. External-Cost Estimation of Electricity Generation in G20 Countries: case study using a global life-cycle impact-assessment method. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 2002, 5 mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/su12052002>.

KREKEL, C. R.; RECHLITZ, J.; RODE, J.; ZERRAHN, A. Quantifying the Externalities of Renewable Energy Plants Using Wellbeing Data: The Case of Biogas. **IZA Discussion Paper** No. 13959 2020. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3751852>.

LEI, L.; GU, J.; WANG, X.; SONG, Z.; YU, J.; GUO, H.; XIE, J.; WANG, J.; SUN, W. Effects and microbial mechanisms of phosphogypsum and medical stone on organic

matter degradation and methane emissions during swine manure composting. **Journal Of Environmental Management**, v. 315, p. 115139, ago. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115139>.

LUKEHURST, Clare T.; FROST, Peter; AL SEADI, Teodorita. **Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser**. **IEA bioenergy**, v. 2010, p. 1-36, 2010. Disponível em: [https://www.energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/4/46/IEA Bioenergy. Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser. 2010.pdf](https://www.energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/4/46/IEA_Bioenergy_Ut%20lisation%20of%20digestate%20from%20biogas%20plants%20as%20biofertiliser.%202010.pdf). Acesso em: 02 mar. 2023.

MANESH, M. H. K.; REZAZADEH, A.; KABIRI, S. A feasibility study on the potential, economic, and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran. **Renewable Energy**, v. 159, p. 87-106, out. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.173>.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Especificações dos fertilizantes minerais simples**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/guia-de-servicos/arquivos/arquivos-bebidas-vinhos-e-derivados/anexo-i-especificacoes-dos-fertilizantes-minerais-simples.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MARTINEZ-SANCHEZ, V.; KROMANN, M. A.; ASTRUP, T. F. Life cycle costing of waste management systems: overview, calculation principles and case studies. **Waste Management**, v. 36, p. 343-355, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.033>.

MFRURAL. 2022. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MICHAELOWA, A.; SHISHLOV, I.; BRESCIA, D. Evolution of international carbon markets: lessons for the paris agreement. **Wires Climate Change**, v. 10, n. 6, p. 600-613, 16 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.613>.

MITO, J. Y. de L.; et al. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094167>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MME Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MME Ministério de Minas e Energia. **Preços de combustíveis**. 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Balanco mineral brasileiro**. 2001. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnmp/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-potassio>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MUCHE, T.; HÖGE, C.; RENNER, O.; POHL, R. Profitability of participation in control reserve market for biomass-fueled combined heat and power plants. **Renewable Energy**, v. 90, p. 62-76, maio 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.051>.

MYRNA, O.; ODENING, M.; RITTER, M. The Influence of Wind Energy and Biogas on Farmland Prices. **Land**, v. 8, n. 1, p. 19, 15 jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/land8010019>.

NAGARAJAN, D.; KUSMAYADI, A.; YEN, H.; DONG, C.; LEE, D.; CHANG, J. Current advances in biological swine wastewater treatment using microalgae-based processes. *Bioresource Technology*, v. 289, p. 121718, out. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121718>.

NISHIMURA, R.; KOLTERMANN, P.I.; SOUZA, K.C.G.; ORTEGA, J.M. **Balanco energético em suinocultura com geração de Energia elétrica a partir do biogás**. In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, 2008.

NOGUEIRA, C. E. C.; SOUZA, S. N. M. de; MICUANSKI, V. C.; AZEVEDO, R. L. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 300-305, ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.023>.

NONG, H. T. T.; UNPAPROM, Y.; WHANGCHAI, K.; BUOCHAREON, S.; RAMARAJ, R. Assessment of the effects of anaerobic co-digestion of water primrose and cow dung with swine manure on biogas yield and biodegradability. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 3, p. 857-867, 28 out. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-020-01115-z>.

NORDAHL, S. L. et al. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Human Health Trade-Offs of Organic Waste Management Strategies. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 15, p. 9200-9209, 6 jul. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c00364>.

CONNOR, S.; EHIMEN, E.; PILLAI, S.C.; BLACK, A.; TORMEY, D.; BARTLETT, J. Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110580, abr. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110580>.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. 1993. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/434003/1/publicacaodoc27.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

OLIVEIRA, P. A. V. Produção e manejo de dejetos de suínos. **A Produção Animal na Visão dos Brasileiros**. Piracicaba: FEALQ, p. 164-177, 2001. Disponível em: http://www.cnpsa.embrapa.br/pnma/pdf_doc/8-PauloArmando_Producao.pdf. Acesso em: 02 mar. 2023.

PÖSCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. **Applied Energy**, v. 87, n. 11, p. 3305-3321, nov. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.011>.

RAFAJ, P.; KYPREOS, S. Internalisation of external cost in the power generation sector: analysis with global multi-regional markal model. **Energy Policy**, v. 35, n. 2, p. 828-843, fev. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.003>.

REICHL, J.; SCHMIDTHALER, M.; SCHNEIDER, F. The value of supply security: the costs of power outages to austrian households, firms and the public sector. **Energy Economics**, v. 36, p. 256-261, mar. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2012.08.044>.

SARDÁ, L. G.; HIGARASHI, M. M.; NICOLOSO, R. S.; FALKOSKI, C.; RIBEIRO, S. M. S.; SILVEIRA, C. A. P.; SOARES, H. M. Effects of dicyandiamide and Mg/P on the global warming potential of swine slurry and sawdust cocomposting. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 24, p. 30405-30418, 27 maio 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-09244-8>.

SILVA, H. L. de C.; CÓRDOVA, M. E. H.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; LORA, E. E. S.; SANTOS, A. H. M.; SANTOS, I. F. S. dos; BOTAN, M. C. C. de O.; PEDREIRA, J. R.; FLAUZINO, B. K. Lab-scale and economic analysis of biogas production from swine manure. **Renewable Energy**, v. 186, p. 350-365, mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.114>.

SINIGAGLIA, T.; FREITAG, T. E.; MACHADO, A.; PEDROZO, V. B.; ROVAI, F. F.; GUILHERME, R. T. G.; LANZANOVA, T. D. M.; NORA, M. D.; MARTINS, M. E. S. Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 24, p. 12074-12095, mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.234>.

SOUSA, I. P.; ROSA, A. P.; BORGES, A. C.; RENATO, N. dos S. Energy potential of biogas from pig farms in the state of minas gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 3, p. 396-404, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n3p396-404/2020>.

SOUSA, I. P.; ROSA, A. P.; LOPES, J. O.; MAGOS, B. R.; CECON, P. R.; PEREZ, R.; BORGES, A. C. Study of internal and external temperatures and their influence on covered lagoon digester performance. **Biomass And Bioenergy**, v. 159, p. 106380, abr. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106380>.

SOVACOOOL, B. K.; KIM, J.; YANG, M. The hidden costs of energy and mobility: a global meta-analysis and research synthesis of electricity and transport externalities. **Energy Research & Social Science**, v. 72, p. 101885, fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2020.101885>.

VERNER, V.; MAZANCOVÁ, J.; JELÍNEK, M.; PHUNG, L.; VAN DUNG, D.; BANOUT, J.; ROUBÍK, H. Economics and perception of small-scale biogas plant benefits installed among peri-urban and rural areas in central Vietnam. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-14, 2 dez. 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-021-02122-4>.

WANG, C.; ZHANG, Y.; ZHANG, L.; PANG, M. Alternative policies to subsidize rural household biogas digesters. **Energy Policy**, v. 93, p. 187-195, jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.007>.

ZACHARIADIS, T.; POULLIKKAS, A. The costs of power outages: a case study from cyprus. **Energy Policy**, v. 51, p. 630-641, dez. 2012.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.015>.

3. COMPARAÇÃO DE EXTERNALIDADES DO BIOGÁS E ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

3.1. Resumo

A matriz elétrica brasileira é cerca de 80% renovável e registra crescimento contínuo na expansão de sistemas a biogás e fotovoltaicos (FV). Nos últimos anos, sistemas FV tiveram crescimento cerca de 10 vezes superior ao do biogás e apresentam hoje potência instalada em torno de 20 vezes maior. O atual programa brasileiro de incentivo à geração distribuída de energia de fontes renováveis, por meio de uma única tarifa *net metering*, ou seja, um sistema de compensação da geração em créditos ao consumidor proprietário da unidade geradora, não parece ser eficaz. Assim, objetivou-se avaliar quantitativamente e qualitativamente um conjunto de externalidades significativas das duas fontes para contribuir com o planejamento energético. As externalidades avaliadas quantitativamente dessas fontes renováveis foram: emissões evitadas, emprego e renda, biofertilizantes para o biogás e uso como elemento construtivo para sistemas FV. Um resultado significativo foi que o valor econômico das externalidades avaliadas do biogás pode superar ao dos sistemas FV para o produtor rural em mais de 11 vezes e para a sociedade em 1,7 vez. Conclui-se que, devido ao fato de o valor das externalidades do biogás ser muito superior economicamente ao dos sistemas FV, as políticas públicas brasileiras de incentivo às fontes renováveis precisam ser revistas, priorizando incentivos àquelas que geram mais externalidades positivas para a sociedade.

Palavras-chave: Energia renovável. Políticas públicas. Impactos indiretos. Emissões evitadas. Qualidade de vida.

3.2. Introdução

As emissões de gases de efeito estufa devido à utilização de combustíveis fósseis está entre as principais causas das alterações climáticas globais. Combinado com preocupações ambientais, o declínio nas reservas de combustíveis fósseis levou

ao crescente desenvolvimento de fontes de energia renováveis (Liu; Guo; Xiao, 2019). Muitos estudos, no passado, buscavam avaliar indicadores de desenvolvimento apenas relativos a crescimento econômico e consumo de energia. No entanto, a tendência é buscar por indicadores multivariados que integram, primordialmente, a emissão de poluentes (HDOM, 2019). O uso de fontes de energia é essencial no debate sobre mudanças climáticas e no planejamento energético, em que a “eletricidade verde” se tornou uma abordagem promissora para a mitigação das mudanças climáticas (KAISER et al., 2020).

O Brasil possui matriz elétrica predominantemente renovável, e cerca de 80% da energia consumida no ano 2022 foi proveniente de fontes verdes (MME, 2023). Mesmo já sendo exemplo para o mundo de participação de fontes renováveis na matriz elétrica, o Brasil também precisa continuar evoluindo, haja vista as metas globais de redução contínua da dependência de fontes fósseis. Especialmente, a geração de energia solar fotovoltaica (FV) se destaca como alternativa de geração que vem sendo implementada maciçamente no país, em especial nos últimos 10 anos. A consolidação da tecnologia FV no Brasil se deu, principalmente, após a regulamentação da micro e minigeração de energia no país, o que só ocorreu, tardiamente, em 2012 (ANEEL, 2012). Desde a década de 1990, o Japão e a Alemanha tornaram-se líderes no desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica, alcançando os EUA, que iniciaram a consolidação da tecnologia, principalmente, com programas de incentivo governamentais (WEN et al., 2020).

Outra fonte renovável de destaque na matriz energética brasileira é o biogás, especialmente quando oriundo de resíduos. O Brasil possui grande potencial de produção de biogás, dada a sua extensa produção agropecuária, da agroindústria e de resíduos sólidos urbanos e do consequente volume de resíduos orgânicos gerados (CRUZ et al., 2021). O biogás passou a ser explorado no Brasil no início dos anos de 1980, e, apesar da expansão, o potencial de produção do biogás ainda é pouco explorado no país. Cabe destacar que atualmente o consumo de gás natural representa 26 vezes a atual produção de biogás (SINIGAGLIA et al., 2022). Por ser um substituto do gás natural quando purificado na forma de biometano, o biogás demanda grande atenção no planejamento energético brasileiro, haja vista que o potencial de produção do país está entre os maiores do mundo (ABIOGAS, 2023; SINIGAGLIA et al., 2022).

As políticas públicas brasileiras que regem sistemas de geração distribuída de energia elétrica renovável são pautadas em tarifas que permitem apenas a compensação de consumo, i.e., *net metering*, para usinas geradoras de até 10 MW de potência instalada. Esse atual sistema de compensação é válido tanto para fontes a biogás quanto para sistemas FV (BRASIL, 2022). Outra possibilidade para os produtores de biogás é a venda direta desse combustível, com certificação por parte do programa RenovaBio. O programa permite ao produtor receber créditos de carbono, denominados C_{Bio} (BRASIL, 2017). Cabe destacar que o RenovaBio foi proposto em 2016, porém apenas em 2020 foi implementado.

A geração de energia elétrica por meio do biogás no Brasil ainda é pouco explorada, atingindo em 2021 228 MW de potência instalada e acumulando um crescimento médio de cerca de 11% ao ano desde 2012. A tecnologia de geração de energia FV teve grande crescimento, ao contrário do biogás, que atingiu no mesmo período a capacidade instalada de 4.632 MW, com um crescimento médio anual de cerca de 117% no mesmo período (MME, 2023). Melhor explicando, as plantas de geração de energia via biogás no Brasil têm potência instalada cerca de 20 vezes menor que a FV e um crescimento médio anual aproximado de 10 vezes menor. Isso demonstra a necessidade de aperfeiçoar as políticas públicas brasileiras nessa área.

Em contraponto, é notável que a instalação de sistemas FV apresenta mais facilitadores, pois para gerar biogás é necessária a disponibilidade de materiais orgânicos para serem biodigeridos. O menor crescimento do biogás pode ser atribuído a experiências negativas que os produtores rurais tiveram na década de 1980 e à baixa atratividade econômica. As dificuldades, que ainda persistem por mais de 40 anos, estão associadas, primordialmente, à dificuldade de operação dos biodigestores e à falta de conhecimento técnico (SINIGAGLIA et al., 2022; SOUSA et al., 2020). Caso ocorram mudanças significativas na regulamentação brasileira, isso poderá aumentar a atratividade para novos projetos de produção de biogás.

A produção de biogás pela digestão anaeróbia de resíduos é amplamente reconhecida como a tecnologia oportuna de agregar a redução da degradação ambiental e produzir subprodutos orgânicos de interesse econômico. Essa alternativa de tratamento de resíduos orgânicos tem sido reconhecida como poderosa forma de produção de biogás e, simultaneamente, de reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa (ACHINAS; EUVERINK, 2020; NESHAT et al., 2017). A compostagem

possui como vantagem a possibilidade de produzir biofertilizantes sólidos de alta qualidade; em comparação, a digestão anaeróbia permite a produção de biogás, não demanda oxigênio e mitiga a emissão de poluentes e de vapor de água à atmosfera durante o processo (DADRASNIA et al., 2021). Melhor explicando, a produção de biogás via digestão anaeróbia apresenta diversas vantagens ou externalidades positivas, que devem ser avaliadas.

As externalidades, em geral, são definidas como impactos externos advindos de determinada atividade, que podem ser quantificados física e economicamente (MARTINEZ-SANCHEZ et al., 2015). De acordo com Jensen e Skovsgaard (2017), essa definição se refere aos impactos positivos ou negativos causados ao ambiente externo. A produção de biogás por meio da digestão anaeróbia para geração de energia elétrica e a geração de energia elétrica solar FV são atividades que impactam significativamente o ambiente e ocasionam externalidades, denominadas, neste estudo, externalidades do biogás e de sistemas FV.

As externalidades do biogás e de sistemas FV tendem a ser positivas, na maioria dos casos, e são amplamente reconhecidas como vantagens dessas fontes renováveis (BARTCZAK et al., 2017). Muitas das vezes, as externalidades positivas de fontes renováveis de energia, apesar de reconhecidas, em maior parte, não são quantificadas ou internalizadas em análises econômicas (WANG et al., 2016). Apenas o reconhecimento tácito, sem a internalização econômica explícita, das externalidades de sistemas FV já pode ser suficiente como provável explicação para o grande desenvolvimento que essa tecnologia apresentou nos últimos 10 anos no Brasil.

O biogás possui muitas externalidades positivas, assim como os sistemas FV. Entre as externalidades do biogás, podem-se citar a melhoria do saneamento, a redução de impactos ambientais e a possibilidade de produção de biofertilizantes, entre outras (MANESH et al., 2020). Apesar de serem reconhecidas por vários pesquisadores, as externalidades do biogás são pouco exploradas (NORDAHL et al., 2020). A internalização das externalidades em avaliações econômicas pode ser fundamental na priorização do planejamento energético da geração de energia elétrica por meio do biogás.

O que se espera é que as externalidades sejam integradas nas análises para que os investidores e planejadores de energias renováveis tenham a correta dimensão econômica dos impactos externos envolvidos. Além do mais, a compreensão das

externalidades pode ser avaliada por outras perspectivas além daquela dos consumidores, como a da sociedade (SOVACOOOL et al., 2021). Compreender os benefícios das energias renováveis de forma ampla e particular para cada fonte possibilita o direcionamento específico, por meio do planejamento energético e de incentivos a cada fonte renovável, maximizando para aquelas mais estratégicas.

A importância das políticas de incentivo para o biogás foi avaliada em vários estudos, que comprovaram a necessidade delas para o desenvolvimento da produção do biogás (LUO et al., 2021). As políticas governamentais de incentivo devem visar não somente à implementação de novas unidades geradoras de energia por meio do biogás, mas também à manutenção daquelas que já existem. Essa necessidade é evidente pela alta taxa de projetos abandonados, inclusive na Europa, que chegam a cerca de 30% (BOURDIN; NADOU et al., 2020). Na China, também houve um programa de incentivo à implementação de energia que atingiu grande adesão, no entanto falhou em manter as usinas em funcionamento (WANG et al., 2016). Já para sistemas FV o que se percebe é que a atual política brasileira está permitindo crescimento significativo, porém, por ser recente, poderá carecer de reavaliações no futuro para permitir a manutenção do crescimento dessa tecnologia.

As externalidades podem contribuir como fator de tomada de decisão a incentivos direcionados a determinadas fontes renováveis de energia. O que se espera é que a maior compreensão das externalidades possa auxiliar no direcionamento de políticas públicas, viabilizando incentivos àquelas que sejam prioritárias. A prioridade pode estar relacionada justamente à fonte renovável de geração de energia elétrica que fornece externalidades mais valiosas à sociedade, justificando, assim, o custeio de incentivos governamentais. Dessa forma, conclui-se que uma melhor compreensão das externalidades do biogás e de sistemas FV pode auxiliar no planejamento energético e, conseqüentemente, no desenvolvimento pleno de ambas as fontes no Brasil. Melhor dizendo, comparar as externalidades de fontes renováveis de geração de energia elétrica pode permitir planejamento energético mais preciso, proporcionando desenvolvimento de cada fonte, maximizando questões prioritárias e estabelecendo as prioridades de forma justa.

3.3. Objetivo

3.3.1. Objetivo geral

Avaliar comparativamente as externalidades de duas fontes renováveis de geração de energia elétrica pela queima do biogás e por sistemas FV em propriedades rurais como forma de contribuir com o planejamento energético.

3.3.2. Objetivos específicos

- Comparar o valor econômico do conjunto de externalidades das fontes biogás de resíduos agrícolas e sistemas FV.
- Avaliar externalidades peculiares das fontes renováveis de energia biogás e sistemas FV em políticas públicas de planejamento energético.

3.4. Metodologia

Foram avaliadas quanti e qualitativamente as externalidades da geração distribuída de energia elétrica, por meio da produção e queima do biogás de resíduos orgânicos da suinocultura e por sistemas solar FV. As externalidades envolvendo a geração de energia para essas duas fontes foram denominadas externalidades do biogás e externalidades de sistemas FV, respectivamente. Consideraram-se as perspectivas do produtor rural que faz a opção pela geração distribuída e, ao mesmo tempo, é consumidor de energia, denominado neste trabalho de “prossumidor” rural, da sociedade e da concessionária de energia. Assim, prossumidores rurais são consumidores rurais que são ao mesmo tempo geradores de energia elétrica (HUA et al., 2022).

Considerou-se a produção de biogás oriunda de resíduos da suinocultura, em propriedades rurais com atividade suinícola de médio e de grande porte, i.e., com capacidade de geração de energia elétrica superior a 100 kW (OCONNOR et al., 2021). Utilizaram-se dados representativos para o Brasil, especificamente de Minas Gerais, estado selecionado por ser o quarto maior produtor de carne suína e o terceiro maior do ponto de vista econômico. Destaca-se também que a radiação solar anual atinge valores superiores a 2,0 MWh/m² na maior parte do estado (MARTINS et al., 2012). Considerou-se, no caso do biogás, que a eficiência de sistemas de geração de

energia elétrica e a concentração de metano possibilitam, em média, a geração de 2,2 kWh/m³ de biogás (INDRAWAN et al., 2018; BUDZIANOWSKI, 2016).

A Tabela 3.1 apresenta o resumo das externalidades estudadas, tanto da geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos agrícolas quanto da geração solar fotovoltaica, que foram avaliadas nas perspectivas da sociedade, dos prosumidores rurais e da concessionária de energia elétrica.

Tabela 3.1 – Externalidades e perspectivas avaliadas para as fontes de geração renováveis biogás e sistemas FV

Externalidade	Perspectiva principal
Avaliação quantitativa	
Emissões evitadas	Sociedade e prosumidor rural
Emprego e renda	Sociedade
Biofertilizantes*	Prosumidor rural
Uso como material construtivo**	Prosumidor rural
Avaliação qualitativa	
Qualidade de energia	Concessionária de energia
Perdas evitadas na distribuição	Concessionária de energia
Perfil de tensão	Concessionária de energia
Confiabilidade do sistema elétrico de potência	Concessionária de energia
Adiamento do investimento em transmissão e distribuição	Concessionária de energia
Armazenamento de energia*	Concessionária de energia e prosumidor rural
Modularidade**	Prosumidor rural
Cogeração*	Prosumidor rural
Melhoria da qualidade de vida	Sociedade

* Externalidade avaliada exclusivamente para o biogás.

** Externalidade avaliada exclusivamente para sistemas FV.

3.4.1. Emissões evitadas

A externalidade emissões evitadas foi estimada por meio da quantificação das emissões evitadas no processo para geração de energia elétrica pela queima do biogás e para sistemas FV, sendo ambas as fontes de geração conectadas à rede sob

a forma de geração distribuída de energia elétrica. Para a geração de energia elétrica a biogás, considerou-se a produção deste por meio da digestão anaeróbia de resíduos da suinocultura. Para sistemas FV, assumiu-se a instalação na propriedade rural.

A externalidade em questão foi avaliada sob duas perspectivas, devido à oportunidade financeira das emissões evitadas para os prossumidores e aos impactos das emissões de poluentes para a sociedade em geral. Sob a perspectiva do prossumidor, foi possível estimar o valor econômico dessa externalidade em função da cotação de créditos de carbono do mercado brasileiro, C_{bio} e do sistema de comércio de emissões da União Europeia, em inglês “European Union Emissions Trading System (EUETS)” (B3, 2023; ICAP, 2023). Já para a perspectiva da sociedade, pode-se calculá-la em função do custo social do carbono, em inglês “Social Cost of Carbon” (SCC), que é definido como o valor do dano dos impactos das mudanças climáticas associado a uma tCO_{2eq} emitida para a atmosfera (ISACS et al., 2016).

Para a geração de energia elétrica por meio do biogás, consideraram-se três fatores: (i) As emissões evitadas em contraponto com a compostagem; (ii) As emissões pela queima do biogás para a geração de energia elétrica foram desprezadas – considerou-se a produção de biogás de resíduos, o que implica que as emissões já foram previamente compensadas pelo sequestro de carbono que ocorreu na produção vegetal e deu origem ao material biodigerido; e (iii) As emissões evitadas, considerando a atual matriz elétrica brasileira (SARDÁ et al., 2020; DUTOIT et al., 2014; SARDÁ et al., 2018; OLIVEIRA, 2001; BURG et al., 2018).

As emissões evitadas para a geração de energia elétrica pela produção e queima do biogás foram quantificadas em termos de tCO_{2eq} devido à mitigação do potencial de aquecimento global do CH_4 e do N_2O (IPCC, 2013). Para as emissões da queima do biogás, considerou-se a combustão completa, com o CH_4 convertido em CO_2 e H_2O ; e N_2O em N_2 e O_2 . Para as emissões atuais da matriz elétrica brasileira, consideraram-se dados do balanço energético nacional de 2022 (MME, 2023).

No caso de propriedade rural com sistemas FV, as emissões evitadas de CO_{2eq} para gerar energia elétrica foram estimadas considerando as atuais emissões da matriz brasileira, como foi feito no caso do biogás (MME, 2023).

3.4.2. Emprego e renda

Para estimar o valor econômico da externalidade emprego e renda, foi considerada a oportunidade de criação de emprego e renda oriundos da geração de energia elétrica por meio do biogás e de sistemas FV. Foram determinados, por meio de revisão de literatura, os custos de mão de obra para instalação e manutenção de plantas de geração de energia elétrica por meio dessas duas tecnologias. Esses custos foram normalizados e rateados pela vida útil dos sistemas de geração, obtendo-se os custos nivelados da eletricidade, em inglês “Levelized Cost of Electricity” (LCOE), em R\$/kWh, como ilustrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Custos nivelados de eletricidade para geração de energia elétrica de biogás e de sistemas FV no Brasil

Fonte	LCOE, R\$/kWh	Referência
Biogás	0,609	Silva et al. 2022*
	0,448	Pinto et al. 2023
	0,510	Silva et al., 2021*
	0,429	Nogueira et al., 2015*
Valor médio	0,499	
FV	0,409	Aquila et al., 2021*
	0,370	Aquila et al., 2021*
	0,321	Aquila et al., 2021*
	0,345	Silva et al., 2020*
	0,426	Iglesias e Vilaça (2022)
Valor médio	0,374	

*Os dados são referentes a estudos no estado de Minas Gerais.

Os valores foram corrigidos para o ano de 2023 considerando a inflação brasileira nos períodos em questão (BCB, 2023).

O custo com mão de obra para a instalação dos sistemas de geração de energia por meio do biogás e de sistemas FV foi considerado igual a 20% do total do LCOE para a primeira fonte e 35% para a segunda fonte (OLIVEIRA et al., 2021; NOGUEIRA et al., 2015; IGLESIAS; VILAÇA, 2022). A estimativa de valor da externalidade emprego e renda para cada uma dessas fontes de geração foi realizada pelo percentual dos valores médios do LCOE correspondentes ao custo com mão de

obra para a instalação dos sistemas de geração de energia, conforme mostrado na Tabela 3.2.

3.4.3. Externalidades peculiar de cada fonte renovável de geração

Foram avaliadas uma externalidade peculiar ao biogás, qual seja o aproveitamento de biofertilizantes do efluente e outra peculiar à geração FV, qual seja o uso dos painéis FV como material construtivo. Isso se deveu à necessidade de claramente diferenciar as duas fontes renováveis de energia. Foi desenvolvida uma metodologia particular para avaliação de cada uma dessas externalidades.

A externalidade aproveitamento de biofertilizantes foi estimada para o biogás, considerando-se que a geração de energia elétrica nessa situação gera como subproduto um efluente com capacidade biofertilizante. A concentração de NPK (Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K)) pode ser variável, razão por que foram consideradas as composições do digestato de suinocultura, segundo Lukehurst et al. (2010) e Cândido et al. (2022). Levando-se em conta os custos dos fertilizantes que compõem o NPK comercial no Brasil e utilizando as conversões desses compostos, foi possível avaliar o valor econômico da externalidade pela quantidade de macronutrientes produzidos em função da quantidade de biogás produzido (MAPA, 2022; MME, 2001).

A externalidade uso dos painéis FV como material construtivo foi estimada para os sistemas FV, considerando-se que esses painéis podem ser instalados como elemento de cobertura em construções rurais, o que diminui custos com telhas e estruturas de suporte. Assim, utilizando a metodologia proposta por Castro et al. (2022), pode-se calcular o valor dessa externalidade. Considerou-se a possibilidade de substituição de telhas de fibrocimento e galvanizadas que são comumente utilizadas em suinoculturas (MÓs et al., 2020). A metodologia permite estimar a externalidade, considerando custo médio das telhas e de estruturas de suporte e de módulos FV, rendimentos e eficiências de sistemas FV, radiação solar e período de funcionamento dos sistemas (EKICI; KOPRU, 2017; CANADIANSOLAR, 2023).

3.4.4. Avaliação qualitativa de externalidades

Avaliou-se qualitativamente a externalidade qualidade de energia sob a perspectiva da concessionária de energia elétrica, considerando as

subexternalidades: (i) Perdas evitadas na distribuição, (ii) Perfil de tensão e (iii) Confiabilidades dos sistemas. Avaliaram-se também as externalidades: adiamento do investimento em transmissão e distribuição e armazenamento de energia.

Outras externalidades foram avaliadas qualitativamente sob a perspectiva do prosumidor rural: (i) Armazenamento de energia, considerando os prejuízos do não fornecimento de energia e a maior confiabilidade decorrente do armazenamento de energia; (ii) Modularidade, flexibilidade que o prosumidor tem com sistemas que podem ser implementados em diferentes capacidades de geração e de fácil ampliação da capacidade instalada; e (iii) Cogeração, permitindo o aproveitamento de energias térmica e elétrica.

Sob a perspectiva da sociedade, avaliou-se a melhoria da qualidade de vida proporcionada pelas condições do meio ambiente, devido à redução de emissões de poluentes. Essa avaliação foi baseada em indicadores citados em artigos científicos que permitem estimar a relação entre a qualidade de vida e fatores ambientais.

3.5. Resultados e discussão

Os resultados foram referentes a dados que melhor representam a realidade que se observa no Brasil, que foram a base de avaliação para estimar o valor econômico das externalidades. O valor econômico das quatro externalidades avaliadas quantitativamente variou de 0,002 a 0,790 R\$/kWh, a depender da externalidade e perspectiva de avaliação. Foram também avaliadas qualitativamente seis externalidades. Aspectos técnicos e econômicos das externalidades reforçam a importância da internalização desses resultados em análises econômicas e no planejamento energético.

Vale ressaltar que algumas das avaliações apresentadas foram feitas a partir do parâmetro potência instalada das duas fontes de energia renovável, de sistemas conectados à rede, estudadas, qual sejam: biogás e sistemas FV. No entanto, sabe-se que sistemas FV só geram energia, em geral, cerca de 12 horas por dia e os a biogás, em tese, podem gerar até 24 horas por dia; assim, essas comparações devem ser colocadas em perspectiva.

3.5.1. Emissões evitadas

A estimativa de emissões evitadas para a geração de energia elétrica por meio do biogás e de sistemas FV foi de 338 e 119 g de CO_{2eq}/kWh, respectivamente. A discrepância entre os valores, na ordem de três vezes, pode ser atribuída a dois fatores: (i) As emissões evitadas para o biogás são superiores, pois o biogás oriundo de resíduos agrícolas, por si só, já promove a mitigação significativa de poluentes que seriam emitidos livremente à atmosfera em caso de destinação dos resíduos da suinocultura para compostagem aberta ou negligenciamento do tratamento, ou seja, a produção de biogás de resíduos agrícolas já é o fruto da mitigação dos impactos ambientais; e (ii) As emissões evitadas em substituição à matriz elétrica brasileira são pequenas, pois a geração de energia elétrica no país, atualmente, já é cerca de 80% renovável (MME, 2023).

Cabe destacar que o resultado da avaliação da externalidade emissões evitadas para o biogás foi quantificado por dois fatores: as emissões evitadas, em comparação com a compostagem e as emissões evitadas considerando a inserção da geração na atual matriz elétrica brasileira. Estimaram-se os seguintes valores: 219,73 e 118,50 g de CO_{2eq}/kWh, respectivamente. O primeiro corresponde a cerca de 65% do valor total obtido e o segundo 35% em relação às emissões evitadas totais, pelo uso de biogás na matriz de energia elétrica brasileira. Já para sistemas FV foram obtidas emissões evitadas de 118,50 g de CO_{2eq}/kWh que correspondem a 100% do valor total obtido, pois se consideraram exclusivamente as emissões evitadas devido à inserção da geração na atual matriz elétrica brasileira.

O valor econômico estimado da externalidade para o prosumidor foi de cerca de 0,044 e 0,015 R\$/kWh, respectivamente para o biogás e sistemas FV, considerando-se a cotação de C_{bio} no Brasil. A cotação de C_{bio} é significativamente inferior aos valores similares praticados na Europa. Considerando a cotação estrangeira, os valores foram de 0,146 e 0,051 R\$/kWh, respectivamente para as duas fontes. Para o valor médio de S_{cc} de acordo com Wang et al. (2019), que é de 976 reais por tCO_{2eq}, os valores da externalidade em questão para a sociedade foram, em média, de 0,330 e 0,116 R\$/kWh para a geração de energia elétrica por meio do biogás e de sistemas FV.

Os valores econômicos obtidos para a externalidade emissões evitadas considerando as duas fontes renováveis evidenciaram que a geração de energia

elétrica por meio do biogás de resíduos de suinocultura possui grande vantagem em relação a sistemas FV. Esse maior valor da externalidade, da ordem de três vezes, demonstra que, sob a perspectiva ambiental, se deve priorizar a geração por meio do biogás. O maior valor da externalidade para o biogás não quer dizer que os efeitos do FV sejam pouco atrativos; pelo contrário, os valores, apesar de inferiores, devem também ser considerados, pois podem alterar significativamente a viabilidade e o LCOE.

Considerando que a tarifa de consumo de energia elétrica aplicável para os consumidores rurais de Minas Gerais, na modalidade destinada à situação de estudo, é de 0,3495 R\$/kWh, tem-se que o valor da externalidade obtido pela perspectiva da sociedade para o biogás atinge cerca de 94% desse valor (CEMIGD, 2023). Isso reforça a importância de que sejam feitas avaliações minuciosas de externalidades, tanto nos aspectos de balanço de energia quanto nos aspectos econômicos diante do valor da energia elétrica. Esses resultados são expressivos para a sociedade e indicam que subsídios à geração de energia por meio do biogás possuem maior retorno do que para sistemas FV e devem ser priorizados.

3.5.2. Emprego e renda

A estimativa da externalidade emprego e renda para a sociedade resultou em valores de cerca de 0,100 e 0,131 R\$/kWh, respectivamente para o biogás e sistemas FV. O maior valor foi obtido para sistemas FV, o que significa que, para a sociedade, esses sistemas podem ser mais atrativos sob a perspectiva de geração de emprego e renda. Apesar disso, cabe destacar que o resultado é referente à comparação entre sistemas de médio e grande portes, ou seja, superiores a 100 kW de potência instalada.

O resultado dessa externalidade, nas condições definidas em estudo, foi cerca de 30% maior para sistemas FV, em comparação com o biogás, mas em sistemas de menor porte, ou seja, menores do que 100 kW de potência instalada, a situação de vantagem pode ser oposta (OCONNOR et al., 2021). Melhor dizendo, eventuais incentivos ou direcionamento de recursos visando, especificamente, ao retorno referente à geração de emprego e renda devem ser propostos de acordo com a potência instalada das usinas e do tipo de fonte geradora. Essa consideração é

essencial para maximizar os efeitos intencionados das políticas públicas de incentivo a essa externalidade.

O maior valor obtido foi para sistemas FV, pois o valor do L_{COE} para esses sistemas é menos dependente do tamanho da planta de geração do que para o biogás. Neste estudo, consideraram-se sistemas de geração de médio e grande portes. Para sistemas de geração a biogás de pequeno porte, o valor da externalidade tende a ser muito superior ao obtido neste estudo, da ordem de grandeza de 50 vezes (PINTO et al., 2023; SILVA et al., 2022a). Isso ocorre porque sistemas de geração de energia elétrica a biogás de pequeno porte têm baixa viabilidade e, consequentemente, maior valor do L_{COE} , o que implica maiores valores para a externalidade.

Apesar da relação inversamente proporcional entre valor da externalidade e tamanho dos sistemas de geração de energia a biogás, sistemas de pequeno porte podem não ser viáveis economicamente, na maioria dos casos. Subsídios para viabilizar pequenos sistemas de geração podem ser muito dispendiosos, devido ao elevado L_{COE} . Assim, a alternativa é que incentivos governamentais sejam direcionados para promover a cooperação entre produtores rurais, permitindo a construção de sistemas de geração a biogás de maior porte, aumentando a viabilidade desses projetos. O maior aprofundamento na avaliação desta externalidade tende a permitir estimar o porte ideal dos sistemas de geração de energia elétrica renováveis, de forma a maximizar a geração de emprego e renda e a viabilidade de investimento em novos projetos de geração renovável, permitindo minimizar eventuais incentivos econômicos custeados pela sociedade.

3.5.3. Externalidades particulares de cada fonte de geração

A externalidade aproveitamento de biofertilizantes foi calculada para o biogás, considerando-se a aplicação do efluente biodigerido em substituição a fertilizantes comerciais em culturas. Por meio da metodologia de custos evitados, obteve-se que essa externalidade pode valer de 0,27 a 0,79 R\$/kWh gerado de energia elétrica, em função da concentração de biofertilizantes contidos nos efluentes. O valor médio obtido para essa externalidade foi superior ao preço da energia elétrica em mais de 50%, considerando a tarifa de consumo aplicável (CEMIGD, 2023), ou seja, tem-se

uma externalidade que pode valer mais do que o próprio valor da energia elétrica gerada.

Cabe destacar que a avaliação desta externalidade está considerando os custos evitados com fertilizantes que, de outra sorte, seriam adquiridos. Em situações em que não haja demanda para os biofertilizantes na propriedade rural e se opta por comercializar esse material, os resultados da externalidade podem ser inferiores. Considerando a comercialização do biofertilizante, o valor da externalidade pode ser reduzido em cerca de 12% (SILVA et al., 2022b). Mesmo com a possibilidade de redução de valor da externalidade, a atratividade para a opção pelo biogás em relação a sistemas FV, como forma de geração de energia, se torna evidente.

A estimativa de valor econômico para a externalidade uso como material construtivo foi efetuada considerando que os painéis fotovoltaicos possam ser utilizados como elemento construtivo. Essa possibilidade se deve ao fato de os módulos FV serem impermeáveis e poderem ser instalados diretamente como elemento de cobertura. O valor econômico para essa externalidade, considerando a perspectiva do prosumidor rural, variou de cerca de 0,002 a 0,005 R\$/kWh. A faixa de valores foi obtida considerando custos evitados com telhas e estruturas mais leves de telhado, no entanto pode haver particularidades envolvendo o processo de instalação que não foram consideradas como elementos adicionais de fixação e mão de obra.

Cabe destacar que, mesmo considerando os extremos das faixas, o valor da externalidade obtido para o biogás foi significativamente superior ao obtido para sistemas FV, ou seja, cerca de 150 vezes maior, em média. Essa grande diferença se deve aos custos evitados com sistemas construtivos, possibilitados pelos sistemas FV, que são viabilizados somente na instalação dos sistemas de geração, enquanto os biofertilizantes para o biogás são produzidos continuamente. Essa grande diferença, representada quantitativamente na comparação de externalidades, denota a importância de se avaliarem as externalidades de cada fonte geradora renovável. Além do mais, pelo elevado valor econômico, a avaliação das externalidades pode ser um critério decisivo na definição da tecnologia de geração a ser implementada sob a perspectiva do prosumidor rural.

3.5.4. Avaliação qualitativa de externalidades

Qualidade de energia

A externalidade qualidade de energia foi discutida, principalmente, sob a perspectiva da concessionária de energia elétrica. Pode ser fortemente dependente da tecnologia de geração adotada, seja por meio do biogás, seja por meio de sistemas FV. Em geral, a qualidade da energia está relacionada à redução das perdas, à melhoria do perfil de tensão e à avaliação da confiabilidade do sistema elétrico de potência. O aumento da qualidade de energia pode ser alcançado pela inserção da geração distribuída, ou seja, subexternalidade, comum ao biogás e a sistemas FV (KAMARUDIN; HASHIM; MUSA, 2019).

A alocação dos sistemas de geração distribuída, de acordo com locais ou regiões prioritários definidos pela concessionária de energia elétrica, pode permitir maximizar os benefícios. O aumento da qualidade de energia pode, segundo Duong et al. (2019), implicar redução das perdas, melhoria do perfil de tensão e de distorções harmônicas. Nessa linha, a avaliação minuciosa por parte das concessionárias de energia pode permitir, inclusive, que sejam fornecidos incentivos para a implementação estratégica de fontes de geração distribuída.

Adiamento do investimento em transmissão e distribuição

A externalidade adiamento do investimento em transmissão e distribuição pode ser alcançada com a inserção da geração distribuída por meio do biogás ou de sistemas FV, devido à diminuição do fluxo de corrente na rede. A externalidade depende, essencialmente, do tipo e tamanho da geração distribuída instalada e da taxa de crescimento da carga. Os sistemas de geração distribuída, quando alocados em pontos estratégicos, podem permitir o adiamento do investimento em obras de reforço do sistema (MINNAAR, 2016).

Apesar de a geração distribuída permitir, em certas situações, significativo adiamento em obras de reforço de rede ou até mesmo evitar as obras de reforço, essa externalidade ainda não é amplamente reconhecida. Essa externalidade deve ser internalizada como uma oportunidade para as concessionárias de energia elétrica, principalmente para que possam propor formas de incentivo e, ou, oportunidades para locais estratégicos, i.e., com maior oportunidade econômica viabilizada pela

externalidade (COSSENT; GÓMEZ; FRÍAS, 2009). Cabe ressaltar que essa externalidade pode estar associada também ao armazenamento de energia, pois o armazenamento pode permitir o adiamento de obras de reforço, por viabilizar a regulação do fluxo de potência.

Armazenamento de energia

A externalidade armazenamento de energia é um recurso estratégico quando se considera a geração de energia por meio do biogás e pode ser uma vantagem em relação aos sistemas FV. A externalidade pode proporcionar adiamento de expansão de rede, melhoria no perfil de tensão e reserva estratégica. Cabe ressaltar também que o armazenamento convencional gera custos elevados para a concessionária de energia, ou seja, uma alternativa como o biogás parece altamente relevante para as concessionárias de energia elétrica (MEHRJERDI, 2019).

Os sistemas FV também podem contar com armazenamento de energia por meio de banco de baterias e supercapacitores, no entanto são sistemas adicionais e de alto custo, por isso não foram considerados neste estudo. Além do mais, cabe destacar que a intermitência de sistemas FV pode gerar custos adicionais ao sistema elétrico com o armazenamento de energia e, ou, a construção de usinas reversíveis para permitir viabilizar maior inserção de sistemas FV (LI et al., 2021). A maior constância da geração de energia elétrica por meio do biogás pode ser uma grande vantagem estratégica para as concessionárias, especialmente se o controle de injeção dessas unidades for acordado entre prossumidores e concessionárias.

O armazenamento do biogás no interior dos biodigestores pode beneficiar não somente as concessionárias de energia, mas também os prossumidores. A externalidade em questão pode ser relevante ao prossumidor que faça opção pelo biogás, pois o custo do prejuízo do não fornecimento, em inglês “value of lost load”, pode atingir cerca de 75 vezes o valor da energia elétrica (GORMAN, 2022). A externalidade armazenamento de energia, considerada para o biogás, possui vantagens diante de outras fontes de suprimento de energia de *backup*, como menor emissão de poluentes e custo de geração significativamente menor para o prossumidor rural (SANNI et al., 2021). Essa externalidade pode ser ainda mais relevante para prossumidores que possuam cargas sensíveis e, ou, dependência da energia elétrica para armazenamento de produtos perecíveis.

Modularidade de sistemas FV

A externalidade modularidade de sistemas FV é uma vantagem estratégica e exclusiva desses sistemas em relação à geração de energia por meio do biogás. Sistemas FV são modulares, ou seja, permitem a instalação praticamente da potência demandada ou de uma fração desta, caso seja necessário. Esses sistemas são compostos por módulos de geração independentes e podem ser rearranjados de forma a compor projetos de diferentes escalas (KUMAR et al., 2019). A modularidade tem evoluído em conjunto com a evolução dos conversores, com benefícios como melhoria da qualidade de energia e escalabilidade dos projetos (ELSANABARY et al., 2020).

A modularidade permite que sistemas FV tendam a apresentar viabilidade para uma maior faixa de potência instalada. Sistemas a biogás são dimensionados de acordo com o projeto inicial e são limitados de acordo com as potências de equipamentos disponíveis comercialmente. Outro ponto relevante é que os sistemas FV podem ser ampliados de acordo com a demanda, enquanto para sistemas a biogás a eventual ampliação é mais limitada e pode envolver a necessidade de grandes alterações nas instalações.

Como exposto, observa-se que a viabilidade econômica de sistemas de geração de energia por meio do biogás pode depender fortemente da escala do projeto. Para suinoculturas com pequeno número de animais, pode-se ter viabilidade de geração de energia elétrica por sistemas FV, enquanto para o biogás se tem viabilidade, geralmente, para instalações maiores (OLIVEIRA et al., 2022). Melhor explicando, a externalidade modularidade parece ser uma vantagem superior para instalações de pequeno porte, assim como a externalidade emprego e renda é mais vantajosa para o biogás nesse tipo de instalação.

Cogeração

Já a externalidade cogeração é exclusiva do biogás. Para sistemas FV não existe a possibilidade de aproveitamento de calor, exceto se forem utilizados sistemas solares termofotovoltaicos (LAMNATOU; CHEMISANA, 2017). O aproveitamento de calor para sistemas FV depende do fato de que, na fase de projeto, sejam adotados equipamentos específicos, mas que geram custos adicionais significativos à instalação. Por isso, não foi considerado o aproveitamento de calor em sistemas FV.

Cabe ressaltar que o aproveitamento da energia térmica da cogeração a biogás pode ter uso múltiplo e, ou, para situações específicas. O calor pode ser aproveitado em processos da própria suinocultura, para aquecimento das instalações (WU; CHENG; CHANG, 2020). Outra possibilidade é utilizar o calor para otimizar a geração de energia elétrica. Essa última pode permitir maior produção de biogás pelo aquecimento do biodigestor ou maximizar a eficiência de geração elétrica pelo aproveitamento de energia térmica (FREITAS et al., 2022).

Qualidade de vida

Para a sociedade, a externalidade qualidade de vida pode ser positiva para as duas fontes de geração de energia elétrica, biogás e FV. Para sistemas de geração de energia elétrica por meio do biogás, oriundo do tratamento de resíduos orgânicos, espera-se que essa externalidade seja maior do que para sistemas FV. Isso porque a geração por meio do biogás possibilita o tratamento ambiental, ou seja, reduz as emissões de poluentes e a poluição das fontes hídricas, como rios, lagos e fontes subterrâneas, ao passo que sistemas FV apenas não emitem poluentes durante a geração de energia.

A externalidade melhoria da qualidade de vida é extremamente abrangente e de difícil quantificação econômica, pois essa melhoria está relacionada à qualidade ambiental e a diversos outros fatores. As ações para mitigar a poluição e a degradação ambiental são fundamentais para moldar a qualidade de vida das pessoas, e, assim, as influências da preservação ambiental estão diretamente relacionadas à melhoria do bem-estar (WU et al., 2020). As emissões de poluentes podem causar sérios impactos na saúde da população, em especial para os grupos mais vulneráveis. Os maiores impactos ainda podem estar associados às regiões com maior desigualdade social (HILL et al., 2019).

Sabe-se que as emissões de poluentes afetam diretamente o nível de felicidade da população, e isso foi avaliado em estudos que consideram dados de mídias sociais (ZHENG et al., 2019). Quando exposta a altos níveis de poluição do ar, a população em geral tem maior risco de mortalidade, piora do estado emocional e diminui a produtividade de trabalhadores que desempenham suas atividades ao ar livre e em ambientes fechados (KAHN; LI, 2020). Os impactos à saúde são extensos, incluindo a saúde psicológica (SIVARETHINAMOHAN et al., 2021). Assim, técnicas

aprimoradas para avaliar a suscetibilidade humana aos poluentes atmosféricos devem ser implementadas.

O custo-benefício para controle da poluição já foi avaliado e é economicamente viável por várias métricas, por exemplo: o custo de um plano para controle da poluição em regiões da China demonstrou que o valor investido é inferior ao impacto econômico de mortes prematuras e ao da redução com despesas de saúde pública. Isso indica que o custo-benefício desses planos é atrativo, podendo os benefícios superar o custo em mais de cinco vezes (ZHANG et al., 2019). Direcionar recursos da saúde para controle da poluição do ar pode ser a alternativa (THAIR et al., 2021). Fatores como poluição podem influenciar a emigração de pessoas. As políticas migratórias e ambientais devem estar relacionadas e consideradas (GERMANI et al., 2021).

Ainda sobre a qualidade de vida, de forma geral, a geração de energia elétrica FV não causa impactos diretos sobre os recursos hídricos, no entanto a geração dessa energia por meio do biogás pode permitir melhoria de saneamento. O processo de biodigestão permite melhorar significativamente a qualidade da água, por meio da redução da carga orgânica. Isso pode permitir mitigar a poluição do meio hídrico e, conseqüentemente, viabilizar atividades de esporte e lazer. A melhoria da qualidade da água, portanto, está relacionada diretamente à qualidade de vida (HSU; LIN; JHANG, 2020).

3.6. Avaliação de políticas públicas

Políticas públicas devem ser voltadas para melhorar a qualidade de vida das pessoas, seja, por exemplo, para mitigar os efeitos nocivos da poluição ambiental, seja para promover a recomposição da paisagem verde. Nesta pesquisa, o valor das externalidades estimadas reforça a importância delas na proposição de políticas públicas de incentivo às fontes de energias renováveis. O que se espera é que a consideração das externalidades possa contribuir para a viabilização da promoção do desenvolvimento sustentável.

3.6.1. Contexto mundial

As políticas públicas de promoção e regulação do biogás ainda não são mundialmente consolidadas, mesmo tendo o biogás de resíduos agrícolas apresentado significativos benefícios ambientais. Reconhecer vantagens do biogás por meio de uma visão mais holística sobre as oportunidades pode ser a solução para um planejamento assertivo, proporcionando mais segurança para investimentos e incentivos nessa energia renovável (GUSTAFSSON; ANDERBERG, 2021). A desconfiança por parte de investidores, a proximidade de usinas produtoras de biogás a áreas residenciais e a falta de subsídios são os maiores entraves observados para a promoção e implementação de novos projetos de produção de biogás na França (BOURDIN; RAULIN; JOSSET et al., 2020).

Na Suécia, um programa de incentivo governamental fortemente voltado à promoção de energias renováveis subsidia em até 30% o investimento em plantas de produção de biogás. Tarifas do tipo *feed in* também incentivam maciçamente projetos de energias renováveis na Espanha e na Alemanha. Na Dinamarca, os subsídios para a geração de energia renovável também são significativos desde a década de 1970 (FERREIRA et al., 2012). O que se conclui é que países que investem em tarifas tipo *feed in* atrativas economicamente, regulamentação simplificada e ágil permitem aproveitamento significativo do potencial de produção de biogás e agilizam a realização do planejamento.

A atratividade de plantas de geração de energia elétrica por meio do biogás tem crescido em nível mundial, no entanto apenas as usinas de grande porte tendem a ter maior viabilidade econômica. Por isso, políticas públicas, principalmente com subsídios, são fundamentais para a viabilidade dos projetos de pequeno e médio portes (PIÑAS et al., 2019). Políticas públicas podem ser uma solução para promover o desenvolvimento da produção de biogás, ou seja, considerando especificidades regionais (BOURDIN; RAULIN; JOSSET et al., 2020). Um equilíbrio entre diferentes tipos de instrumentos de política e mecanismos de regulação deve ser fortalecido para apoiar constantemente a produção de biogás no país (CHUNG et al., 2022).

3.6.2. Políticas públicas no contexto brasileiro

Pela discrepância de valor econômico entre as externalidades observadas para o biogás e sistemas FV, observa-se a necessidade de revisão da política

brasileira, já que esta promove os mesmos incentivos às diferentes fontes renováveis. A disparidade de valores entre as externalidades sob a perspectiva da sociedade denota que incentivos iguais para as fontes renováveis não são adequados, pois os incentivos devem ser proporcionais ao retorno econômico para a sociedade. Uma política única pode promover disparidade de desenvolvimento das energias renováveis, talvez priorizando aquelas menos vantajosas. A atratividade de investimentos em sistemas FV no Brasil é superior à do biogás em muitas situações, o que pode ser comprovado pela desuniformidade de crescimento entre essas duas fontes de geração de energia elétrica no país (MME, 2023). Uma consideração mais detalhada de externalidades das diferentes fontes renováveis de energia pode ser um dos caminhos para diminuir essas disparidades.

O que se espera é que a atual política brasileira de tarifas *net metering*, i. e., sistema de compensação, possa ser revista, proporcionando oportunidade de desenvolvimento das fontes de energias renováveis de acordo com os benéficos que elas apresentam. Espera-se do governo brasileiro políticas de crédito, assistência técnica subsidiada, estruturação de um ambiente institucional e legal que reduza as incertezas e possibilite a sustentabilidade e rentabilidade para todos os agentes e fontes renováveis. Ou seja, a avaliação comparativa de externalidades pode permitir a alocação de recursos e a elaboração de políticas públicas que possibilitem o desenvolvimento da matriz energética renovável, maximizando aquelas fontes renováveis mais benéficas à sociedade. As políticas governamentais são consideradas, então, como vitais para superar os obstáculos para o desenvolvimento da produção de biogás (CHUNG et al., 2022).

Considera-se, em um primeiro momento, que são necessários subsídios superiores a 30% do investimento inicial para viabilizar projetos de biogás no Brasil. A compra de energia pelo governo brasileiro com um valor mais elevado poderia permitir viabilizar projetos de geração de energia elétrica no país por meio do biogás (PIÑAS et al., 2019). Fica evidente que as políticas energéticas de planejamento específico a cada fonte de geração de energia elétrica podem contar com tarifas do tipo *feed in* exclusivas. Em princípio, o tamanho do subsídio deve acompanhar o custo social do carbono (KAISER et al., 2020).

3.6.3. Externalidades como fator estratégico

Um fator estratégico para o planejamento pode ser o incentivo governamental para a internalização das externalidades sob a perspectiva dos prossumidores. Melhor explicando, para o prossumidor que tenha possibilidade de optar por determinada fonte de geração e ter conhecimento das externalidades pode ser um fator decisivo na fase de projeto. Especialmente os produtores rurais brasileiros, por falta de suporte qualificado e por experiências negativas vivenciadas no passado, podem desconhecer o efeito econômico das externalidades e, por isso, fazer opção por fontes alternativas de geração menos atrativas.

A importância do investimento governamental para viabilizar a formação de profissionais capacitados e disponibilizar materiais técnicos pode ser preciosa alternativa para promover o desenvolvimento das fontes renováveis de energia. A difusão de conhecimento e informação pode permitir selecionar fontes mais adequadas e com maior viabilidade econômica aos prossumidores, ou seja, suporte técnico, especialmente para o biogás, pode permitir maximizar o desenvolvimento de novas usinas de geração de energia. Cabe destacar que muitos programas de incentivo às energias renováveis, sem embasamento e suporte técnico, já falharam (WANG et al., 2016).

As vantagens estratégicas das externalidades da geração distribuída de energia podem ser também uma oportunidade para as concessionárias de energia brasileiras; mesmo assim, o incentivo à implementação por parte da concessionária ainda não é realidade no Brasil. A regulamentação rígida, aliada à participação de um número relativamente pequeno de grandes empresas do setor, pode ser um entrave para a implementação de incentivos. Isso sugere a necessidade de uma nova regulamentação governamental para o setor elétrico.

Apesar de tantos benefícios, Sovacool, King e Yang (2021) concebem o estudo e determinação das externalidades como uma área ainda não muito bem definida e, em geral, dependente de pontos de vista, bem como de contextualização no tempo e no espaço. Eles relatam que vários estudos lidam com as externalidades, porém o fazem de forma superficial ou apenas qualitativa. Explicando melhor, o que se espera é que políticas públicas viabilizem maior acesso a mecanismos de internalização e aproveitamento das externalidades, proporcionando mais benefícios econômicos e melhorando tanto o conhecimento mais profundo quanto a visão de

diferentes pontos de vista, como os dos prossumidores, da concessionária de energia e da sociedade, o que permite, assim, avaliação econômica mais real de projetos.

3.7. Conclusões

Uma série de externalidades da geração distribuída de energia elétrica, por meio da produção e queima do biogás de resíduos orgânicos de suinoculturas e por sistemas solar FV, foi analisada nesta pesquisa. A externalidade com maior valor econômico sob a perspectiva do prossumidor foi a externalidade biofertilizantes para o biogás e emissões evitadas para sistemas FV. Para a sociedade, a externalidade com maior valor econômico foi emissões evitadas para o biogás e emprego e renda para sistemas FV. Para o conjunto de externalidades estudadas, as do biogás possuem maior valor econômico do que as de sistemas FV, tanto para a sociedade quanto para o prossumidor. Em média, as externalidades do biogás avaliadas quantitativamente podem valer cerca de 11,8 vezes mais do que as de sistemas FV para os prossumidores ou 1,7 vez para a sociedade.

Demonstrou-se, qualitativamente, que as concessionárias de energia elétrica têm muitas oportunidades com a geração distribuída e os agentes reguladores juntos com a sociedade como um todo precisam rever o atual modelo de negócio do fornecimento de energia. As empresas do setor devem se adequar à oportunidade de controle do fluxo de potência, distribuição e transmissão de energia, haja vista que os consumidores se tornam prossumidores em uma tendência crescente e sustentável. As externalidades avaliadas qualitativamente sob a perspectiva do prossumidor rural foram discutidas inicialmente nesta pesquisa. Vale destacar a importância da avaliação das externalidades como um primeiro passo para a internalização delas em análises econômicas e consequente melhoria da viabilidade econômica de projetos.

A discrepância de valores entre as externalidades avaliadas quantitativamente e a importância das externalidades avaliadas qualitativamente reforça a necessidade de promover a produção de biogás no Brasil. Os programas de incentivo regulamentados pelo governo devem ser revistos individualmente para cada fonte de geração renovável, destacando-se o elevado valor econômico e as particularidades das externalidades que reforçam a importância da consideração delas no planejamento energético. O governo brasileiro precisa intervir como forma de viabilizar a desregulamentação rígida e antiga do sistema, visando ampliar ainda mais a

inserção da geração distribuída. A inclusão da possibilidade de negociação entre concessionária e prosumidores pode permitir priorizar investimentos em fontes renováveis de energia mais vantajosas.

Sugere-se que em estudos futuros maior número de externalidades seja avaliado de forma quantitativa, aprofundando os resultados. Além do mais, outras fontes de geração de energia renovável devem ter suas externalidades avaliadas para possibilitar colaborar com o planejamento energético que inclua mais de uma fonte renovável de energia, como é o caso da maioria dos países. Estudos pontuais ou regionais podem ser realizados a partir da metodologia proposta, bem como permitir aprofundar a avaliação econômica para implementação do planejamento energético.

3.8. Referências

ABIOGAS, **Programa nacional do biogás e biometano**. 2023. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023.

ACHINAS, S.; EUVERINK, G. J. W. Rambling facets of manure-based biogas production in Europe: a briefing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109566, mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109566>.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 482, de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

AQUILA, G.; COELHO, E. O. P.; BONATTO, B. D.; PAMPLONA, E. O.; NAKAMURA, W. T. Perspective of uncertainty and risk from the CVaR-LCOE approach: an analysis of the case of pv microgeneration in Minas Gerais, Brazil. **Energy**, v. 226, p. 120327, jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.120327>.

B3. **Crédito de descarbonização cbio**. 2022. Disponível em: https://www.b3.com.br/pt_br/produtos-e-servicos/outros-servicos/servicos-de-natureza-informacional/credito-de-descarbonizacao-cbio/. Acesso em: 10 jul. 2023.

BARTCZAK, A.; CHILTON, S.; CZAJKOWSKI, M.; MEYERHOFF, J. Gain and loss of money in a choice experiment. The impact of financial loss aversion and risk preferences on willingness to pay to avoid renewable energy externalities. **Energy Economics**, v. 65, p. 326-334, jun. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2017.04.020>.

BCB. Banco central do Brasil. **Calculadora do cidadão**. 2023. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice#>. Acesso em: 10 jul. 2023.

BOURDIN, S.; NADOU, F. The role of a local authority as a stakeholder encouraging the development of biogas: a study on territorial intermediation. **Journal of Environmental Management**, v. 258, p. 110009, mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110009>.

BOURDIN, S.; RAULIN, F.; JOSSET, C. On the (un)successful deployment of renewable energies: territorial context matters. a conceptual framework and an empirical analysis of biogas projects. **Energy Studies Review**, v. 24, n. 1, p. 1-23, 29 dez. 2020. <http://dx.doi.org/10.15173/esr.v24i1.4088>.

BRASIL. LEI Nº 13.576, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 10 jul. 2023.

BRASIL. LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022. **Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída**. 2022. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html>. Acesso em: 10 jul. 2023.

BUDZIANOWSKI, W. M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1148-1171, fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.054>.

BURG, V.; BOWMAN, G.; HAUBENSAK, M.; BAIER, U.; THEES, O. Valorization of an untapped resource: energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 53-62, set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.004>.

CANADIANSOLAR. **Painel Solar 350W Half-Cell Canadian Solar – CS3U-350P**. Disponível em: <https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2023/03/15154744/Canadian-Solar-TOPCon-Module-Technical-White-Paper.v5.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023

CÂNDIDO, D.; BOLSAN, A. C.; HOLLAS, C. E.; VENTURIN, B.; TÁPPARO, D. C.; BONASSA, G.; ANTES, F. G.; STEINMETZ, R. L. R.; BORTOLI, M.; KUNZ, A. Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113825, jan. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113825>.

CASTRO, P. H. G. R. P.; OLIVEIRA FILHO, D.; TOLEDO, O. M.; CARLO, J. C.; DINIZ, A. S. A. C. Integrated analysis of photovoltaic system externalities in Brazil: public health expenditures, energy quality, architectural aspects and real estate value. **Renewable Energy and Environmental Sustainability**, v. 7, p. 13, 2022. <http://dx.doi.org/10.1051/rees/2022002>.

CEMIGD. Cemig Distribuição. **Valores de tarifas e serviços**. 2023. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

CHUNG, C.; LIU, L.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; WEI, Z. Evolution of biogas policies in China (2001–2019): dynamics of policy instruments towards energy transitions. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, p. 134642, dez. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134642>.

CIELO, I. D.; RIBEIRO, M. C. P.; ROCHA JÚNIOR, W. F.; FRAGOSO, R. M. S.; SCHMIDT, C. M. Generation of Renewable Energy (Biogas) in the Western Region of Paraná/Brazil—A Multicase Study from the Viewpoint of Contracts. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1458, 12 jan. 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/su15021458>.

COSSENT, R.; GÓMEZ, T.; FRÍAS, P. Towards a future with large penetration of distributed generation: is the current regulation of electricity distribution ready? regulatory recommendations under a European perspective. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 1145-1155, mar. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.011>.

CRUZ, I. A.; ANDRADE, L. R. S.; BHARAGAVA, R. N.; NADDA, A. K.; BILAL, M.; FIGUEIREDO, R. T.; FERREIRA, L. F. R. Valorization of cassava residues for biogas production in Brazil based on the circular economy: an updated and comprehensive review. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100196, out. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clet.2021.100196>.

DADRASNIA, A.; MUÑOZ, I. B.; YÁÑEZ, E. H.; LAMKADDAM, I. U.; MORA, M.; PONSÁ, S.; AHMED, M.; ARGELAGUET, L. L.; WILLIAMS, P. M.; OATLEY-RADCLIFFE, D. L. Sustainable nutrient recovery from animal manure: a review of current best practice technology and the potential for freeze concentration. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 128106, set. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128106>.

DUONG, M.; PHAM, T.; NGUYEN, T.; DOAN, A.; TRAN, H. Determination of optimal location and sizing of solar photovoltaic distribution generation units in radial distribution systems. **Energies**, v. 12, n. 1, p. 174, 6 jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/en12010174>.

DUTOIT, C.; VAN NIEKERK, W.; MEISSNER, H. Direct greenhouse gas emissions of the South African small stock sectors. **South African Journal of Animal Science**, v. 43, n. 3, p. 340, 8 jan. 2014. <http://dx.doi.org/10.4314/sajas.v43i3.8>.

EKICI, S.; KOPRU, M. A. Investigation of PV system cable losses. **International journal of renewable energy research**, v. 7, n. 2, p. 807-815, 2017. Disponível em: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/viewFile/5660/pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

ELSANABARY, A. I.; KONSTANTINOU, G.; MEKHILEF, S.; TOWNSEND, C. D.; SEYEDMAHMOUDIAN, M.; STOJCEVSKI, A. Medium voltage large-scale grid-connected photovoltaic systems using cascaded h-bridge and modular multilevel converters: a review. **IEEE Access**, v. 8, p. 223686-223699, 2020. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.3044882>.

FERREIRA, M.; MARQUES, I. P.; MALICO, I. Biogas in Portugal: status and public policies in a European context. **Energy Policy**, v. 43, p. 267-274, abr. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.003>.

FREITAS, F. F.; FURTADO, A. C.; PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; BARROS, R. M.; LORA, E. E. S. Holistic Life Cycle Assessment of a biogas-based electricity generation plant in a pig farm considering co-digestion and an additive. **Energy**, v. 261, p. 125340, dez. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2022.125340>.

GERMANI, A. R.; SCARAMOZZINO, P.; CASTALDO, A.; TALAMO, G. Does air pollution influence internal migration? An empirical investigation on Italian provinces. **Environmental Science & Policy**, v. 120, p. 11-20, jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2021.02.005>.

GORMAN, W. The quest to quantify the value of lost load: a critical review of the economics of power outages. **The Electricity Journal**, v. 35, n. 8, p. 107187, out. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tej.2022.107187>.

GUSTAFSSON, M.; ANDERBERG, S. Dimensions and characteristics of biogas policies – Modelling the European policy landscape. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110200, jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110200>.

HDOM, H. A. D. Examining carbon dioxide emissions, fossil & renewable electricity generation and economic growth: evidence from a panel of south American countries. **Renewable Energy**, v. 139, p. 186-197, ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.062>.

HILL, T. D.; JORGENSEN, A. K.; ORE, P.; BALISTRERI, K. S.; CLARK, B. Air quality and life expectancy in the United States: an analysis of the moderating effect of income inequality. **Ssm - Population Health**, v. 7, p. 100346, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssmph.2018.100346>.

HSU, C.; LIN, H.; JHANG, S. Sustainable Tourism Development in Protected Areas of Rivers and Water Sources: a case study of Jiuqu stream in China. **Sustainability**, v. 12, n. 13, p. 5262, 29 jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/su12135262>.

HUA, W.; CHEN, Y.; QADRDAN, M.; JIANG, J.; SUN, H.; WU, J. Applications of blockchain and artificial intelligence technologies for enabling prosumers in smart grids: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 161, p. 112308, jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112308>.

ICAP. **EU Emissions Trading System (EU ETS)**. 2023. Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/eu-emissions-trading-system-eu-ets>. Acesso em: 10 jul. 2023

IGLESIAS, C.; VILAÇA, P. On the regulation of solar distributed generation in Brazil: a look at both sides. **Energy Policy**, v. 167, p. 113091, ago. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113091>.

INDRAWAN, N.; THAPA, S.; WIJAYA, M. E.; RIDWAN, M.; PARK, D. The biogas development in the Indonesian power generation sector. **Environmental Development**, v. 25, p. 85-99, mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2017.10.003>.

IPCC (2013) Climate Change 2013: **The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report - Changes to the underlying Scientific/Technical Assessment**. Disponível em: https://www.klimamanifest-von-heiligenroth.de/wp/wp-content/uploads/2016/06/IPCC_2013_WG1AR5_S916_S917_Extremwetter_Zitate_mitTitelCover.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023

ISACS, L.; FINNVEDEN, G.; DAHLLÖF, L.; HÅKANSSON, C.; PETERSSON, L.; STEEN, B.; SWANSTRÖM, L.; WIKSTRÖM, A. Choosing a monetary value of greenhouse gases in assessment tools: a comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 37-48, jul. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.163>.

JENSEN, I. G.; SKOVGAARD, L. The impact of CO₂-costs on biogas usage. **Energy**, v. 134, p. 289-300, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.019>.

KAHN, M.; LI, P. Air pollution lowers high skill public sector worker productivity in China. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 8, p. 084003, 15 jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab8b8c>.

KAISER, M.; BERNAUER, M.; SUNSTEIN, C. R.; REISCH, L. A. The power of green defaults: the impact of regional variation of opt-out tariffs on green energy demand in germany. **Ecological Economics**, v. 174, p. 106685, ago. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106685>.

KAMARUDIN, M. N.; HASHIM, T. J. T.; MUSA, A. Optimal sizing and location of distributed generation for loss minimization using firefly algorithm. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 14, n. 1, p. 421, 1 abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.11591/ijeecs.v14.i1.pp421-427>.

KUMAR, N. M.; GUPTA, R. P.; MATHEW, M.; JAYAKUMAR, A.; SINGH, N. K. Performance, energy loss, and degradation prediction of roof-integrated crystalline solar PV system installed in Northern India. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 13, p. 100409, mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2019.100409>.

LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. Photovoltaic/thermal (PVT) systems: a review with emphasis on environmental issues. **Renewable Energy**, v. 105, p. 270-287, maio 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.009>.

LI, J.; CHEN, S.; WU, Y.; WANG, Q.; LIU, X.; QI, L.; LU, X.; GAO, L. How to make better use of intermittent and variable energy? A review of wind and photovoltaic power consumption in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 110626, mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110626>.

LIU, D.; GUO, X.; XIAO, B. What causes growth of global greenhouse gas emissions? Evidence from 40 countries. **Science of the Total Environment**, v. 661, p. 750-766, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.197>.

LUKEHURST, C. T.; FROST, P.; AL SEADI, T. **Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser**. **IEA bioenergy**, v. 2010, p. 1-36, 2010. Disponível em: [https://www.energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/4/46/IEA Bioenergy. Ut_lisation_of_digestate_from_biogas_plants_as_biofertiliser_2010.pdf](https://www.energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/4/46/IEA_Bioenergy_Ut_lisation_of_digestate_from_biogas_plants_as_biofertiliser_2010.pdf). Acesso em: 10 jul. 2023

LUO, B.; KHAN, A. A.; ALI, M. A. S.; YU, J. An evaluation of influencing factors and public attitudes for the adoption of biogas system in rural communities to overcome energy crisis: a case study of pakistan. **Science of the Total Environment**, v. 778, p. 146208, jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146208>.

MANESH, M. H. K.; REZAZADEH, A.; KABIRI, S. A feasibility study on the potential, economic, and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran. **Renewable Energy**, v. 159, p. 87-106, out. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.173>.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Especificações dos fertilizantes minerais simples**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/guia-de-servicos/arquivos/arquivos-bebidas-vinhos-e-derivados/anexo-i-especificacoes-dos-fertilizantes-minerais-simples.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023

MARTINEZ-SANCHEZ, V.; KROMANN, M. A.; ASTRUP, T. F. Life cycle costing of waste management systems: overview, calculation principles and case studies. **Waste Management**, v. 36, p. 343-355, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.033>.

MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; PEREIRA, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. **Energy Policy**, v. 48, p. 640-649, set. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.082>.

MEHRJERDI, H. Simultaneous load leveling and voltage profile improvement in distribution networks by optimal battery storage planning. **Energy**, v. 181, p. 916-926, ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.021>.

MINNAAR, U. J. Regulatory practices and Distribution System Cost impact studies for distributed generation: considerations for South African distribution utilities and regulators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 1139-1149, abr. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.015>.

MME Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Balanco mineral brasileiro**. 2001. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-potassio>. Acesso em: 10 jul. 2023.

MÓS, J. V. N.; NASCIMENTO, S. T.; MURATA, L. S.; SANTOS, V. M.; STEIDLE NETO, A. J.; OLIVEIRA, E. M.; LISBOA, Á. S.; SILVA, L. F. Thermal comfort of sows in free-range system in Brazilian Savanna. **Journal of Thermal Biology**, v. 88, p. 102489, fev. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102489>.

NESHAT, S. A.; MOHAMMADI, M.; NAJAFPOUR, G. D.; LAHIJANI, P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 308-322, nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>.

NOGUEIRA, C. E. C.; SOUZA, S. N. M. de; MICUANSKI, V. C.; AZEVEDO, R. L. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 300-305, ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.023>.

NORDAHL, S. L.; DEVOKOTA, J. A.; SMITH, S. J.; BREUNIG H. M.; PREBLE, C. V.; SATCHWELL, A. J.; JIN, L. BROWN, N. J.; KIRCHTETTER, T. W.; SCOWN, C. D. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Human Health Trade-Offs of Organic Waste Management Strategies. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 15, p. 9200-9209, 6 jul. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c00364>.

CONNOR, S.; EHIMEN, E.; PILLAI, S. C.; BLACK, A.; TORMEY, D.; BARTLETT, J. Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110580, abr. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110580>.

OLIVEIRA, A. C. L.; FERNANDES, O. R.; RENATO, N. S.; BORGES, A. C. Feasibility of using different renewable energy sources in Brazilian swine farmings. **Journal of Cleaner Production**, v. 333, p. 130040, jan. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130040>.

OLIVEIRA, A. C. L.; RESENDE, M. O.; SILVA, E. G. M.; RENATO, N. S.; MARTINS, M. A.; SEQUINEL, R.; MACHADO, J. C. Evaluation and optimization of electricity generation through manure obtained from animal production chains in two Brazilian mesoregions. **Journal of Cleaner Production**, v. 316, p. 128270, set. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128270>.

OLIVEIRA, P. A. V. Produção e manejo de dejetos de suínos. **A Produção Animal na Visão dos Brasileiros**. Piracicaba: FEALQ, p. 164-177, 2001. Disponível em: http://www.cnpsa.embrapa.br/pnma/pdf_doc/8-PauloArmando_Producao.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLMO, O. A.; ROALCABA, O. D. C. An economic holistic feasibility assessment of centralized and decentralized biogas plants with mono-digestion and co-digestion systems. **Renewable Energy**, v. 139, p. 40-51, ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.053>.

PINTO, J. A.; BARROS, R. M.; SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L.; BOTAN, M. C. O.; BÔAS, T. F. V.; CRISPIM, A. M. C. Study of the anaerobic co-digestion of bovine

and swine manure: technical and economic feasibility analysis. **Cleaner Waste Systems**, v. 5, p. 100097, ago. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097>.

SANNI, S. O.; ORICHA, J. Y.; OYEWOLE, T. O.; BAWONDA, F. I. Analysis of backup power supply for unreliable grid using hybrid solar PV/diesel/biogas system. **Energy**, v. 227, p. 120506, jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.120506>.

SARDÁ, L. G.; HIGARASHI, M. M.; NICOLOSO, R. S.; FALKOSKI, C.; RIBEIRO, S. M. S.; SILVEIRA, C. A. P.; SOARES, H. M. Effects of dicyandiamide and Mg/P on the global warming potential of swine slurry and sawdust cocomposting. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 24, p. 30405-30418, 27 maio 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-09244-8>.

SARDÁ, L. G.; HIGARASHI, M. M.; NICOLOSO, R. S.; OLIVEIRA, P. A. V.; FALKOSKI, C.; RIBEIRO, S. M. S.; COLDEBELLA, A. Methane emission factor of open deposits used to store swine slurry in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 6, p. 657-663, jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018000600001>.

SILVA, H. L. C.; CÓRDOVA, M. E. H.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; LORA, E. E. S.; SANTOS, A. H. M.; SANTOS, I. F. S.; BOTAN, M. C. C. O.; PEDREIRA, J. R.; FLAUZINO, B. K. Lab-scale and economic analysis of biogas production from swine manure. **Renewable Energy**, v. 186, p. 350-365, mar. 2022b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.114>.

SILVA, H. L. C.; SILVA, A. M. L.; BARROS, R. M.; SANTOS, I. F. S.; FREITAS, J. V. R. Addition of iron ore tailings to increase the efficiency of anaerobic digestion of pig manure: a technical and economic analysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, p. 106013, maio 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106013>.

SILVA, T. C.; PINTO, G. M.; SOUZA, T. A. Z.; VALERIO, V.; SILVÉRIO, N. M.; CORONADO, C. J. R.; GUARDIA, E. C. Technical and economical evaluation of the photovoltaic system in Brazilian public buildings: a case study for peak and off-peak hours. **Energy**, v. 190, p. 116282, jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.116282>.

SINIGAGLIA, T.; FREITAG, T. E.; MACHADO, A.; PEDROZO, V. B.; ROVAI, F. F.; GUILHERME, R. T. G.; LANZANOVA, T. D. M.; NORA, M. D.; MARTINS, M. E. S. Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 24, p. 12074-12095, mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.234>.

SIVARETHINAMOHAN, R.; SUJATHA, S.; PRIYA, S.; SANKARAN; GAFOOR, A.; RAHMAN, Z. Impact of air pollution in health and socio-economic aspects: review on future approach. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, p. 2725-2729, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.540>.

SOUSA, I. P.; ROSA, A. P.; BORGES, A. C.; RENATO, N. S. Energy potential of biogas from pig farms in the state of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 3, p. 396-404, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n3p396-404/2020>.

SOVACOOOL, B. K.; KIM, J.; YANG, M. The hidden costs of energy and mobility: a global meta-analysis and research synthesis of electricity and transport externalities. **Energy Research & Social Science**, v. 72, p. 101885, fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2020.101885>.

TAHIR, S. H.; KOUSAR, S.; AHMED, F.; ULLAH, M. R. Impact of economic freedom on air pollution: configuration analysis of Asia-Pacific region. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 35, p. 47932-47941, 25 abr. 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-13681-4>.

WANG, C.; ZHANG, Y.; ZHANG, L.; PANG, M. Alternative policies to subsidize rural household biogas digesters. **Energy Policy**, v. 93, p. 187-195, jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.007>.

WANG, P.; DENG, X.; ZHOU, H.; YU, S. Estimates of the social cost of carbon: a review based on meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 1494-1507, fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.058>.

WEN, D.; GAO, W.; QIAN, F.; GU, Q.; REN, J. Development of solar photovoltaic industry and market in China, Germany, Japan and the United States of America using incentive policies. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 39, n. 5, p. 1429-1456, 13 dez. 2020. <http://dx.doi.org/10.1177/0144598720979256>.

WU, W.; CHENG, L.; CHANG, J. Environmental life cycle comparisons of pig farming integrated with anaerobic digestion and algae-based wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 264, p. 110512, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110512>.

WU, W.; YUN, Y.; HU, B.; SUN, Y.; XIAO, Y. Greenness, Perceived Pollution Hazards and Subjective Wellbeing: evidence from China. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 56, p. 126796, dez. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126796>.

ZHANG, J.; JIANG, H.; ZHANG, W.; MA, G.; WANG, Y.; LU, Y.; HU, XI; ZHOU, J.; PENG, F.; BI, J. Cost-benefit analysis of China's Action Plan for Air Pollution Prevention and Control. **Frontiers of Engineering Management**, v. 6, n. 4, p. 524-537, 22 nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s42524-019-0074-8>.

ZHENG, S.; WANG, J.; SUN, C.; ZHANG, X.; KAHN, M. E. Air pollution lowers Chinese urbanites' expressed happiness on social media. **Nature Human Behaviour**, v. 3, n. 3, p. 237-243, 21 jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.1038/s41562-018-0521-2>.

4. EFEITO DA AUTOMAÇÃO E DO CONTROLE NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

4.1. Resumo

A produção suinícola brasileira gera grande volume de resíduos e, entre as opções de tratamento, a digestão anaeróbia é a mais consolidada no Brasil com biodigestores do tipo “lagoa coberta” que permitem o aproveitamento do biogás. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a produção de biogás e aspectos econômicos de biodigestores tipo lagoa coberta acrescidos de sistemas de aquecimento com revolvimento. Por meio de simulações, determinou-se o balanço energético em diferentes temperaturas de operação do biodigestor e espessuras de isolamento térmico, implementando sistemas de aquecimento com revolvimento. Considerou-se o aquecimento do biodigestor e do afluente com o calor da cogeração de energia elétrica por meio da queima do biogás e o revolvimento com dispositivos elétricos. O biodigestor modelado foi uma unidade de 1.250 m³ de volume útil situado na Zona da Mata mineira, na latitude de 20° 34' 07,2" S. Observou-se que a produção de biogás pode ser aumentada em até cerca de 12% no melhor cenário. Para a maximização da produção de energias térmica e elétrica, percebeu-se que a temperatura ideal de operação seria em torno de 36 °C. Entre os materiais simulados, a espessura de isolamento mais viável economicamente foi de 2,5 cm de EPS 100. Conclui-se que em climas mais frios a viabilidade econômica do sistema de aquecimento com revolvimento tende a ser significativamente maior, podendo ser aumentada em cerca de 10 vezes em situações em que a temperatura média anual do biodigestor seja 9 °C inferior à da situação simulada.

Palavras-Chave: Automação. Aquecimento. Perdas térmicas. Energia renovável. Cogeração.

4.2. Introdução

Todos os setores da sociedade estão propícios a produzir resíduos, entre eles a produção agroindustrial. Apesar de estarem localizadas no meio rural e proporcionarem grande contribuição para o crescimento econômico do país, devem-se sempre considerar os impactos ambientais das atividades agroindustriais. Além da possível degradação de biomas originais para serem utilizados na produção animal, a má gestão dos efluentes gerados pode causar uma série de danos ao meio ambiente, causando, assim, prejuízos também para o próprio produtor rural (ZHOU et al., 2020).

O aumento da demanda global por alimentos tem impactado a geração crescente de subprodutos agroindustriais e resíduos (KEE et al., 2021). Especialmente, nesse caso, os efluentes, que possuem grande potencial de degradação ambiental devido à sua alta carga orgânica, razão por que se devem buscar soluções que visem promover o tratamento desses rejeitos. A alternativa que permite empregar conceitos de biorrefinaria ou economia circular pode ser vantajosa pela produção de energia e de uma série de produtos. O tratamento de efluentes é um processo desafiador, dado o grande volume gerado; em 2019, esse total superou 4,5 bilhões de metros cúbicos no mundo (MARTINEZ-BURGOS et al., 2021).

A atividade suinícola brasileira é de alta relevância no cenário mundial, sendo a quarta maior exportadora mundial de carne. Em 2021, atingiu a produção de 4,701 milhões de toneladas, um crescimento acumulado superior a 40% nos últimos 10 anos (ABPA, 2022). Em razão da elevada escala de produção e confinamento dos animais, o grande volume de efluentes pode impactar o meio ambiente caso não sejam adotadas medidas de tratamento, em que as mais comuns são: separação sólido-líquido, lagoas aeróbias e anaeróbias, compostagem e digestão anaeróbia. Entre as técnicas apresentadas, a digestão anaeróbia é uma das mais consolidadas em função do menor custo de implementação e da oportunidade de produção de biogás (SANTONJA et al., 2017; DOMINGUES et al., 2021; ZAHEDI et al., 2022).

A digestão anaeróbia é um processo no qual a matéria orgânica passa pelo processo de fermentação, em condições controladas e com a presença de microrganismos, sendo possível transformar a matéria orgânica em biogás e biofertilizante (LI; CHEN; WU, 2019). Esse processo é atualmente a opção de tratamento de efluentes preferida na pecuária, pois combina a remoção eficiente de

compostos orgânicos biodegradáveis com a produção simultânea de bioenergia (principalmente o metano) e de biofertilizante (HARRIS; MCCABE, 2020). O processo de digestão anaeróbia possui alta eficiência no binômio custo de tratamento e recuperação de energia (DOMINGUES et al., 2021).

As vantagens da biodigestão anaeróbia são extensas e, em grande parte, relativas à diminuição do impacto ambiental. Esse processo viabiliza a produção de biogás a partir de efluentes e tem sido considerado uma das soluções mais apropriadas e empregadas para o gerenciamento de dejetos (CHOWDHURY et al., 2020). Destaca-se que o biogás como fonte de energia renovável é, em geral, fruto da diminuição de impactos ambientais e, portanto, pode ser considerado uma etapa de melhoria da qualidade ambiental, sem a liberação descontrolada de gases poluentes perigosos ou de alto impacto para o efeito estufa (PFLUGER et al., 2019). Assim, esse processo tem se tornado uma tendência em reduzir o impacto ambiental e permitir a produção de biogás. A biodigestão pode também permitir outras oportunidades, a exemplo do reúso da água e da utilização do digestato como biofertilizante (HOLLAS et al., 2023).

A digestão anaeróbia é um processo de alta aplicabilidade para a redução de poluentes orgânicos biodegradáveis e permite, assim, o tratamento de resíduos orgânicos. Por essa possibilidade, a técnica tem sido empregada em larga escala para tratamento do efluente de suinocultura (CHOWDHURY et al., 2020). Além do mais, a produção e utilização da bioenergia é uma oportunidade que pode permitir viabilizar os investimentos requeridos na implementação das estruturas necessárias, ou seja, biodigestores e conjuntos de moto geradores (LOURINHO; RODRIGUES; BRITO, 2020).

A tecnologia mais aplicada ao tratamento de efluentes, especificamente dos dejetos de suinocultura, são os Biodigestores do Tipo Lagoa Coberta (B_{LC}), também chamados de digestores canadenses, ou do tipo *plug-flow* (CALZA et al., 2015). O tipo em questão é empregado em larga escala pelos produtores rurais por conta da baixa complexidade de instalação, se comparado a outras tipologias, e por permitir o aproveitamento do biogás e biofertilizante oriundos do digestato (CHENG et al., 2018). Cabe destacar também que os modelos de baixo custo, em especial o B_{LC}, são adotados maciçamente pelos produtores rurais pela necessidade de menor investimento na instalação (CHENG et al., 2014).

Apesar das vantagens, a simplicidade do modelo B_{LC} pode apresentar desvantagens, a exemplo do baixo rendimento dessa tecnologia, que é uma grande limitação, o que pode ser atribuído à inexistência de mecanismos de controle que promovam a adequação dos parâmetros do biodigestor (VAZ et al., 2020). O processo de digestão anaeróbia é fortemente dependente de vários parâmetros, dada a sua natureza biológica e a dependência de vários processos e interações microbiológicas. A temperatura é um fator de alta relevância no processo de digestão e pode influenciar significativamente a produção de metano (NIE et al., 2021). A homogeneização e controle de temperatura em geral promovem maior produção de biogás. Apesar da complexidade e dependência de vários fatores externos, a produção de biogás tende a ser maior em temperaturas mais elevadas, dentro de certos limites entre 35 e 40 °C (COWLEY; BRORSEN, 2018).

O Brasil é o país que possui maior potencial mundial de produção de biogás, no entanto a produção de biogás no Brasil ainda é pequena e representa apenas 0,08% da matriz energética do Brasil (ABIOGAS, 2023; MME, 2023). São necessários mecanismos de fomento e aumento da atratividade para que o potencial possa ser explorado em ordem de grandeza compatível com o seu potencial. Soluções que permitam a maior produção de biogás podem ser de extrema valia para contribuir com esse cenário.

Alguns autores como Arromdee, Nawalerskasama e Saewong (2017) concluíram que biodigestores automatizados podem permitir dobrar a produção de biogás. Apesar dessa possibilidade, Önen, Nsair e Kuchta (2018) propuseram o controle de temperatura e o revolvimento de um biodigestor, o que permitiu obter aumento de 11,7% na geração de energia elétrica. Cinar et al. (2021) afirmaram que a implementação de sistemas de controle em biodigestores ainda não é explorada, ou seja, avaliar o efeito de sistemas de controle e automação, especialmente de temperatura, pode ser uma oportunidade para maximizar a produção de biogás.

Os projetos de biogás, como o tipo de atividade produtiva, geralmente carecem de viabilidade econômica, mas apresentam externalidades positivas. É muito significativo projetar e propor o mecanismo adequado (NIU et al., 2021). Assim, uma possível forma de permitir maior produtividade de biogás são os modelos com maior automação e controle das variáveis que impactam diretamente a produção de biogás.

Nessa linha, os sistemas de controle e automação podem permitir maximizar a produção de energia.

4.3. Objetivo

4.3.1. Objetivo Geral

Avaliar a produção de biogás, o balanço energético e a viabilidade econômica de biodigestores tipo lagoa coberta convencionais, com e sem sistemas de automação e controle que permitam o aquecimento com revolvimento.

4.3.2. Objetivos específicos

- Modelar e simular a produção de energia de um biodigestor do tipo lagoa coberta em função da temperatura, com sistema de aquecimento com revolvimento.
- Validar as simulações realizadas com dados medidos.
- Avaliar a viabilidade econômica de utilizar sistemas de aquecimento com revolvimento em biodigestores.

4.4. Metodologia

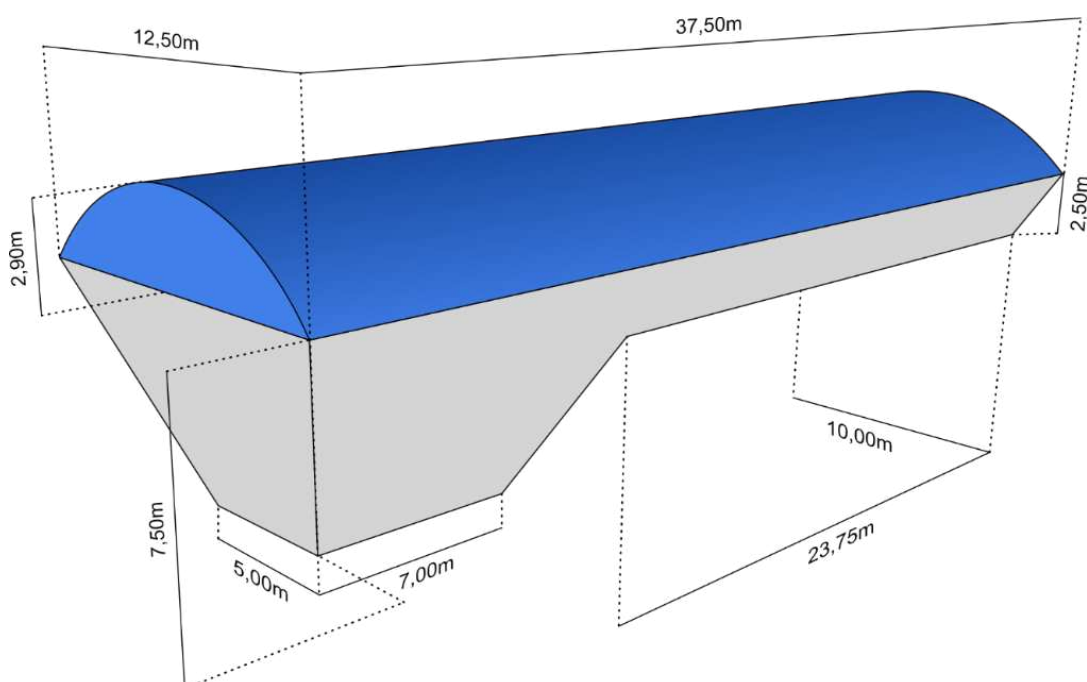
Consideraram-se, neste estudo, dados coletados em uma granja de suínos situada no estado de Minas Gerais, Brasil, com o objetivo de permitir efetuar a modelagem da produção de biogás de um biodigestor do tipo lagoa coberta (BLC). As simulações foram realizadas para períodos anuais, permitindo avaliar, especialmente, a influência da temperatura da biomassa no interior do BLC. O modelo desenvolvido foi validado e simulado considerando a implementação de sistemas de aquecimento com revolvimento no biodigestor para diferentes temperaturas. Foi avaliado também a influência do isolamento térmico dos biodigestores. Estimaram-se a produção de energia e os aspectos econômicos para os cenários simulados, bem como em função do porte do biodigestor.

4.4.1. Modelagem e simulações do biodigestor lagoa coberta

O modelo simulado foi de um biodigestor utilizado para tratamento de efluente da suinocultura, situado em Teixeira, Minas Gerais, Brasil, na latitude $20^{\circ} 34' 07,2''$ S, longitude $42^{\circ} 52' 01,6''$ O e 678 m de altitude. A granja em questão possui dois biodigestores, não isolados termicamente, em paralelo com as seguintes características construtivas: formato de tronco de pirâmide invertido escavado no solo e com revestimento geocomposto de PEAD (polietileno de alta densidade) flexível, com 1,25 mm de espessura e cobertos com outra manta do mesmo material, formando a cúpula (reservatório do biogás), com 1,0 mm de espessura. A capacidade volumétrica de cada biodigestor é de cerca de 1.250 m³, e nenhum possui sistema de aquecimento ou de revolvimento da biomassa.

Por meio do *software Energy Plus* versão 8.7 foi realizada a simulação envolvendo trocas térmicas do B_{LC}. O passo de simulação utilizado foi de 10 minutos e permitiu obter resultados referentes às trocas térmicas e temperaturas da biomassa para o período de dois anos. Utilizaram-se dados climáticos obtidos da estação meteorológica da cidade de Viçosa, MG, situada a cerca de 20 km de distância do biodigestor simulado, que é a estação meteorológica mais próxima (LATECAE, 2023).

Figura 4.1 – Modelagem do biodigestor tipo lagoa coberta



Fonte: SOUSA et al., 2022.

O modelo simulado do B_{LC} é apresentado na Figura 4.1 e foi obtido por meio do programa *SketchUp* versão 17.2 com dados de estudo acadêmico realizado no local. A concentração de sólidos voláteis totais (S_{VT}), o tempo de retenção hidráulica (T_{RH}) e a vazão do afluente (q) foram adotados de acordo com dados experimentais de Sousa et al. (2019), obtidos no local de estudo. Esses autores obtiveram como média de um período amostral de um ano: S_{VT} de 15,4 kg/m³, 24 dias de T_{RH} e q de 51,15 m³/dia. Cabe ressaltar que o biodigestor em estudo trata o efluente oriundo da suinocultura correspondente a cerca de 5.347 animais, desde a maternidade até a terminação.

Os materiais construtivos do biodigestor foram modelados de acordo com a Tabela 4.1, na qual se descrevem as propriedades térmicas dos materiais que compõem o B_{LC}. A biomassa com volume de 1.250 m³ foi considerada homogênea no interior do biodigestor.

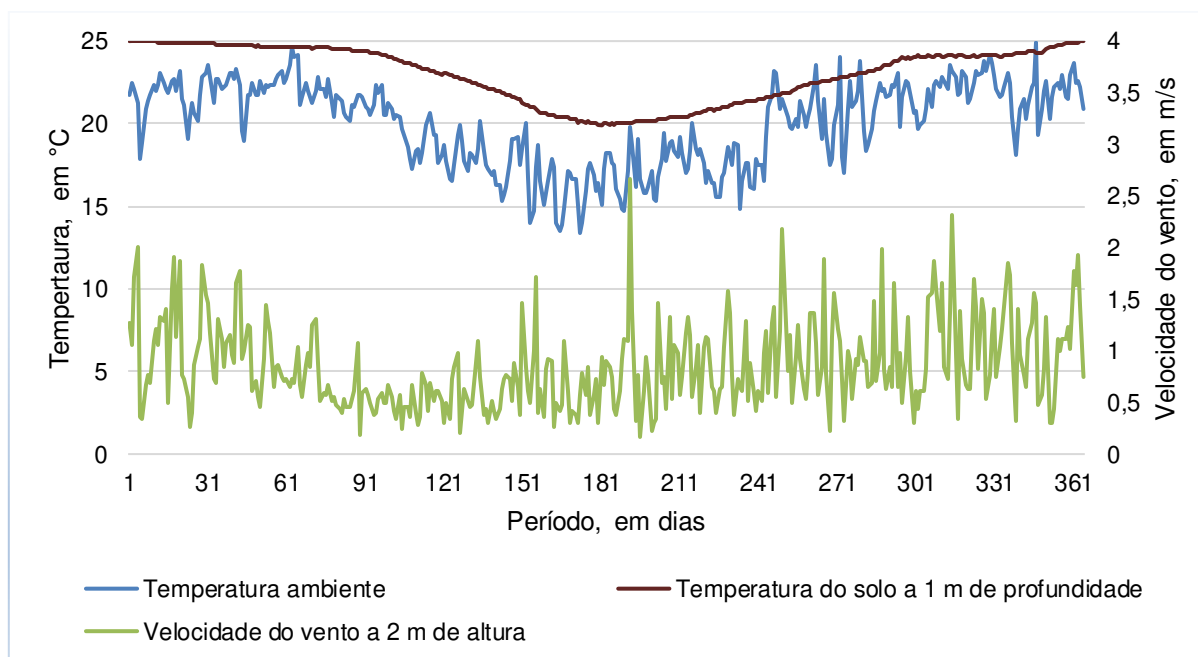
Tabela 4.1 – Propriedades térmicas dos materiais simulados

Material	Calor específico, em J kg ⁻¹ K ⁻¹	Condutividade térmica, em W m ⁻¹ K ⁻¹	Massa específica, em kg m ⁻³
PEAD	¹ 1700	² 0,35	³ 950
biomassa	⁴ 4186,8	⁵ 0,58	⁶ 1046

Fonte: ¹INCOPLAST, 2023; ²DIN 52612 – 2; ³ASTM D792 – 13; ⁴WANG; MA; XING, 2020; ⁵LIU et al., 2017; ⁶HREIZ et al., 2017).

Esse modelo foi denominado, na etapa de simulação, caso-base, e as condições de contorno foram: (i) B_{LC} sem sistemas de aquecimento ou revolvimento da biomassa; (ii) Volume útil de operação de 1.250 m³; (iii) Vazão e carga orgânica constantes; (iv) Dados climáticos anuais de temperatura, vento e radiação solar fornecidos pelo arquivo climático utilizado (LATECAE, 2023); e (v) Temperatura diária do solo medida na granja estudada a um metro de profundidade, por um ano. Na Figura 4.2 foram plotados os dados correspondentes à temperatura ambiente e ao solo além da velocidade do vento, utilizados no período de simulação de um ano.

Figura 4.2 – Temperaturas do ambiente, do solo e a velocidade do vento utilizados como dados de entrada para as simulações para o período de um ano

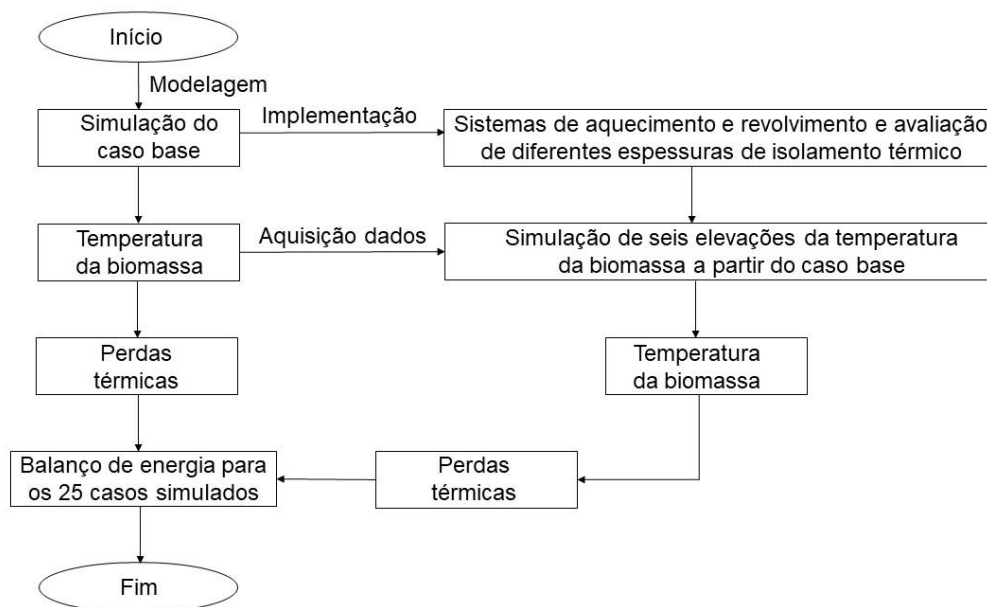


Fonte: LATECAE, 2023.

A partir do caso-base, implementaram-se nas demais simulações um sistema de aquecimento com revolvimento e, por último, o isolamento térmico nas paredes enterradas e no fundo do biodigestor.

Foram realizadas ao todo 25 simulações: (i) A primeira simulação para o caso-base, sem aquecimento com revolvimento, em que se obtiveram a temperatura média anual da biomassa e as perdas térmicas; (ii) As outras 24 simulações referem-se ao biodigestor com aquecimento com revolvimento e quatro diferentes espessuras de isolamento térmico, isto é, 0; 2,5; 5; e 10 cm. Foram simuladas seis diferentes temperaturas da biomassa, elevando-se a temperatura média anual obtida no caso-base, de 3 °C em 3 °C, até atingir 18 °C acima da temperatura anual da biomassa do caso-base. As 25 simulações, então, referem-se a quatro espessuras de isolamento *versus* seis temperaturas da biomassa, gerando 24 simulações mais as condições do caso-base, o que acarretou 25 simulações. Assim, realizaram-se as simulações conduzidas de acordo com o fluxograma da Figura 4.3.

Figura 4.3 – Fluxograma do processo de modelagem e simulação dos sistemas de aquecimento e do revolvimento do biodigestor tipo lagoa coberta



A possibilidade de aquecimento foi simulada considerando o aproveitamento da energia térmica do gerador de energia elétrica para aquecimento do biodigestor e do afluente, ou seja, cogeração. Avaliou-se também a possibilidade de uma fonte auxiliar de calor para viabilizar as simulações em que a demanda térmica superasse a disponibilizada pela cogeração. As fontes auxiliares de calor foram: aquecedor solar ou o uso de parte da produção de biogás. Foi simulado também o aproveitamento de parte do calor do efluente, por meio do uso de trocador de calor entre o efluente e o afluente, com eficiência estimada de cerca de 90% (MASALA et al., 2022).

Nas simulações em que se avaliou o aquecimento foi considerado também o sistema de revolvimento dimensionado de forma a homogeneizar a biomassa no interior do biodigestor. Para essas situações, considerou-se a potência dos sistemas de revolvimento de 10 kW, considerando também o revolvimento intermitente como forma de permitir a homogeneização da biomassa no interior do biodigestor e no período de funcionamento de duas horas por dia, no total (BOLZONELLA; INNOCENTI; CECCHI, 2002; HAN et al., 2016).

O isolamento térmico foi simulado pela implementação de uma manta do material Poliestireno Expandido EPS 100 entre o biodigestor e o solo, com as seguintes propriedades térmicas apresentadas: massa específica de 19 kg/m³, condutividade térmica de 0,035 W/m K e calor específico de 1.200 J/K kg. Esse

material foi selecionado por apresentar resistência à compressão de até 100 kPa, com deformação máxima inferior a 10%. O EPS 100 foi adicionado nas simulações formando uma camada ao redor de todas as partes do biodigestor em contato com o solo.

A estimativa teórica da produção de metano foi realizada a partir do modelo teórico de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983). Este modelo permite estimar, com precisão, a produção de metano em função da temperatura para o B_{LC} (LOPES et al., 2021). Assim, consequentemente, em função do poder calorífico inferior do metano de 35.900 kJ m^{-3} , obteve-se a energia produzida pelo biodigestor (ROSA et al., 2016).

Os cálculos para estimativa de produção de metano foram realizados de acordo com as Equações de 1 a 4, que são para determinação da constante cinética, taxa de crescimento específico máximo dos microrganismos, produção relativa de metano e produção diária de energia do biodigestor, respectivamente, adaptadas de Chen (1983):

$$k = 0,6 + 0,0006e^{0,1185 S_{VT}} \quad (1)$$

$$\mu_m = 0,013T - 0,129 \quad (2)$$

$$B = B_0 \left(1 - \frac{k}{\mu_m T_{RH} - 1 + k} \right) \quad (3)$$

$$P_{dCH_4} = q S_{VT} P_{ci} \quad (4)$$

em que k é a constante cinética, adimensional; S_{VT} são os sólidos voláteis totais, em kg m^{-3} ; μ_m é o crescimento específico máximo dos microrganismos, em dia^{-1} ; T é a temperatura da biomassa, em $^{\circ}\text{C}$; B é a produção relativa de metano, em $\text{m}^3_{CH_4} \text{ kg}^{-1}_{S_{VT}}$; B_0 é a produção final do metano, em $\text{m}^3_{CH_4} \text{ kg}^{-1}_{S_{VT}}$; T_{RH} é o tempo de retenção hidráulica, em dias; P_{dCH_4} é a produção diária de energia do biodigestor, em kJ d^{-1} ; q é a vazão de afluente no biodigestor, em m^3/dia ; e P_{ci} é o poder calorífico inferior do metano, em kJ Nm^{-3} .

4.4.2. Validação da simulação

O modelo simulado foi validado para o cenário-base, i.e., sem aquecimento, revolvimento e isolamento térmico do biodigestor. Essa consideração permitiu avaliar, comparativamente, os dados de temperatura da biomassa no interior do B_{LC} obtidos na simulação em contraponto com a temperatura da biomassa medida a 1 m de profundidade, no biodigestor estudado. O aparato de medição foi instalado no interior do biodigestor, por meio de um acesso lateral situado próximo à metade do comprimento do biodigestor, de acordo com Sousa et al. (2022). Os dados utilizados foram obtidos diariamente para o período de um ano.

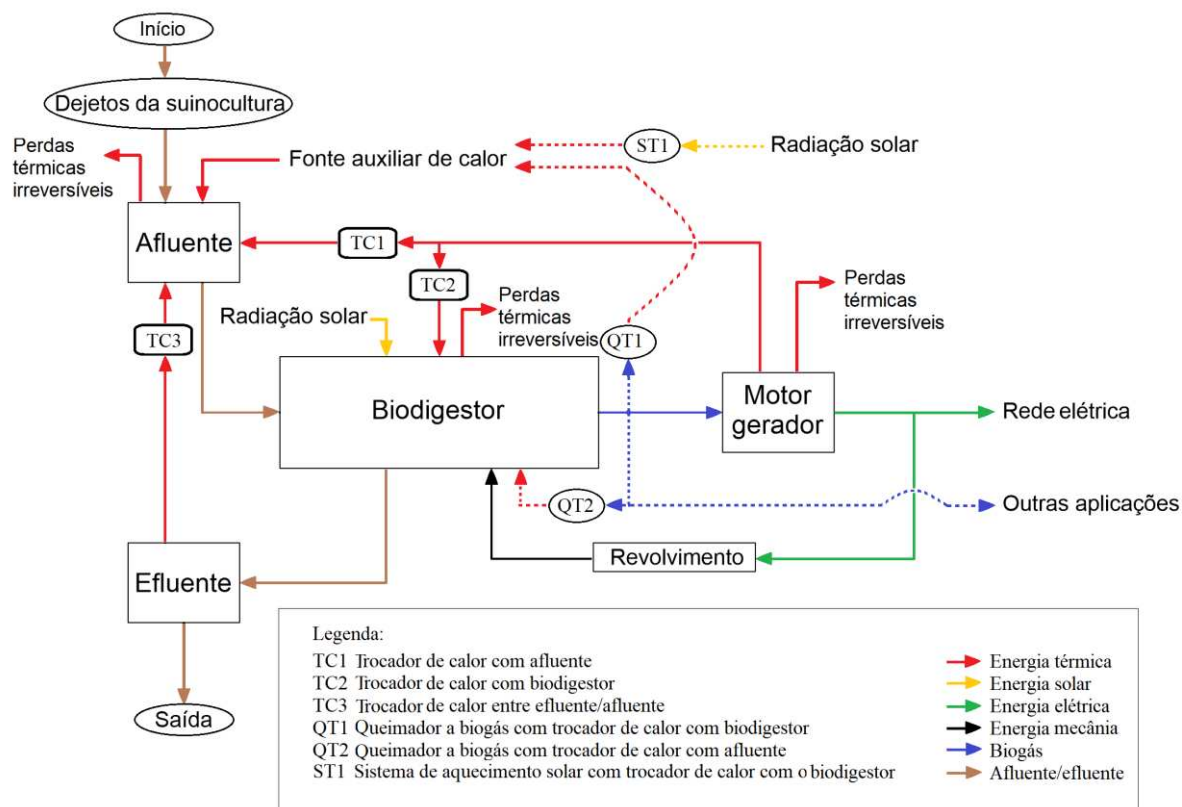
A metodologia de validação da simulação foi calculada de acordo com Maradini et al. (2023), por meio do cálculo da raiz do erro quadrático médio e da raiz do erro quadrático médio relativo, calculados considerando os dados de temperatura simulados e os dados medidos no local, pelo período de um ano.

4.4.3. Balanço energético e avaliação econômica

O balanço energético foi obtido a partir do período de funcionamento simulado de dois anos. Os resultados do primeiro ano foram considerados como regime transitório, devido ao tempo necessário para a estabilização do biodigestor. Os resultados do segundo ano foram replicados para um período de nove anos, permitindo, então, analisar economicamente o efeito do aquecimento com revolvimento para um período de 10 anos de operação, que foi adotado como o período de vida útil do biodigestor do modelo estudado (MILECH et al., 2015).

Para determinação do balanço energético e avaliação de aspectos econômicos, considerou-se o conjunto motor-gerador adaptado para cogeração, fornecendo calor para o biodigestor e para o afluente, com as seguintes eficiências: 33% para a geração de energia elétrica e 43% para a geração de energia térmica (PÖSCHL; WARD; OWENDE, 2010; BUDZIANOWSKI, 2016). Estimou-se que as eficiências dos trocadores de calor para o processo de aquecimento do biodigestor e do afluente foram de 90% (MASALA et al., 2022). O esquema apresentado na Figura 4.4 representa o fluxo de energia e de massa e, consequentemente, do balanço de energia entre os diferentes componentes da planta de geração de energia elétrica pelo biogás.

Figura 4.4 – Fluxo de energia e matéria na planta de geração de energia elétrica alimentada por efluente da suinocultura



Considerou-se também a utilização de uma fonte auxiliar para complementar a demanda térmica, nos casos em que a energia térmica da cogeração não for suficiente para suprir a demanda de calor. A fonte auxiliar pode ser suprida tanto por aquecedor solar como pela queima de parte do biogás. As setas tracejadas na Figura 4.4 apresentam possibilidades extras de operação da planta que foram discutidas de forma qualitativa no final dos resultados obtidos em simulação. As possibilidades em questão são: (i) Utilizar parte do biogás diretamente para promover o aquecimento do biodigestor; e (ii) Usar o biogás para outras finalidades, como para purificação em biometano.

Para as simulações do cenário-base e das demais 24 simulações envolvendo o aquecimento do biodigestor e o revolvimento, foi estimado para 10 anos de operação o que se segue: (i) A geração de energia elétrica anual injetada na rede; e (ii) A demanda de calor necessário para aquecimento do biodigestor e do afluente. Considerando a diferença entre a geração de energia elétrica para o cenário-base e a

dos biodigestores com aquecimento, avaliou-se o efeito econômico do aquecimento para o período de 10 anos, bem como foram discutidas as oportunidades das situações simuladas, considerando também os custos do material de isolamento térmico e das energias elétrica e térmica.

Tabela 4.2 – Valor econômico do material isolante EPS, energia elétrica e energia térmica

Material/Energético	Custo considerado
¹ Material isolante, EPS 2,5 cm	10,92 R\$/m ²
¹ Material isolante, EPS 5,0 cm	21,84 R\$/m ²
¹ Material isolante, EPS 10,0 cm	43,68 R\$/m ²
² Energia elétrica, tarifa de consumo	0,3495 R\$/kWh
³ Lenha	3,53 R\$/GJ

¹REINODOISOPOR, 2023; ²CEMIGD, 2023; ³ECOVERDEN, 2022; ³NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2023; ³ALVES et al., 2017.

O valor econômico da energia térmica foi estimado considerando 75% de eficiência térmica do processo de queima do combustível, totalizando, assim, 4,70 R\$/GJ (CRUZ et al., 2022). A lenha foi adotada como parâmetro de estudo por ser um dos combustíveis tipicamente com menor custo no meio rural (MFRURAL, 2023).

A fonte auxiliar de calor foi considerada nas simulações para os casos em que a disponibilidade de energia térmica do conjunto motor/gerador não foi suficiente para permitir o aquecimento. Calculou-se, assim, a demanda térmica para os casos em que houvesse necessidade de utilização de uma fonte complementar de aquecimento.

Para permitir identificar quão significativo é o potencial da energia química do biogás, utilizou-se como métrica a distância que pode ser percorrida por um veículo de transporte com capacidade de carga de até 58 toneladas, movido a biometano. A estimativa considerou o custo energético da conversão do biogás em biometano acrescido do consumo de biometano de veículo, i. e., cerca de 0,46 MJ tonelada⁻¹ km⁻¹, que é o consumo médio estimado do transporte rodoviário (KHAN et al., 2022; MADHUSUDHANAN et al., 2020). Considerou-se a independência de energia elétrica da granja a partir da energia do biogás. Como os dados de entrada e a simulação foram apenas de um dos dois biodigestores, supôs-se que o biodigestor não simulado

que opera em paralelo produziria a mesma quantidade da unidade monitorada e simulada. Assim, cada um dos dois biodigestores geraria cerca de 274 MWh/ano (MARADINI et al., 2021).

4.4.4. Avaliações complementares

A fim de permitir avaliar os resultados de forma mais ampla, extrapolando, assim, as limitações das particularidades do modelo simulado, discutiu-se qualitativamente a aplicação dos sistemas de aquecimento com revolvimento em outras regiões, em especial nas de clima frio. Para isso, utilizou-se o modelo de estimativa de produção de energia química do biogás obtido por meio das Equações de 1 a 4.

Considerando a produção de energia química do biogás em função da temperatura da biomassa, discutiram-se os resultados obtidos por meio das simulações também para outros possíveis cenários. Por meio da revisão bibliográfica, pode-se estabelecer um paralelo com os resultados das simulações, bem como das avaliações qualitativas.

Outro ponto avaliado qualitativamente foi relacionado às dimensões do biodigestor, haja vista que as dimensões, em especial a relação área/volume, afetam tanto as perdas térmicas quanto a produção de biogás e, conseqüentemente, a eficiência dos sistemas estudados.

4.5. Resultados e discussão

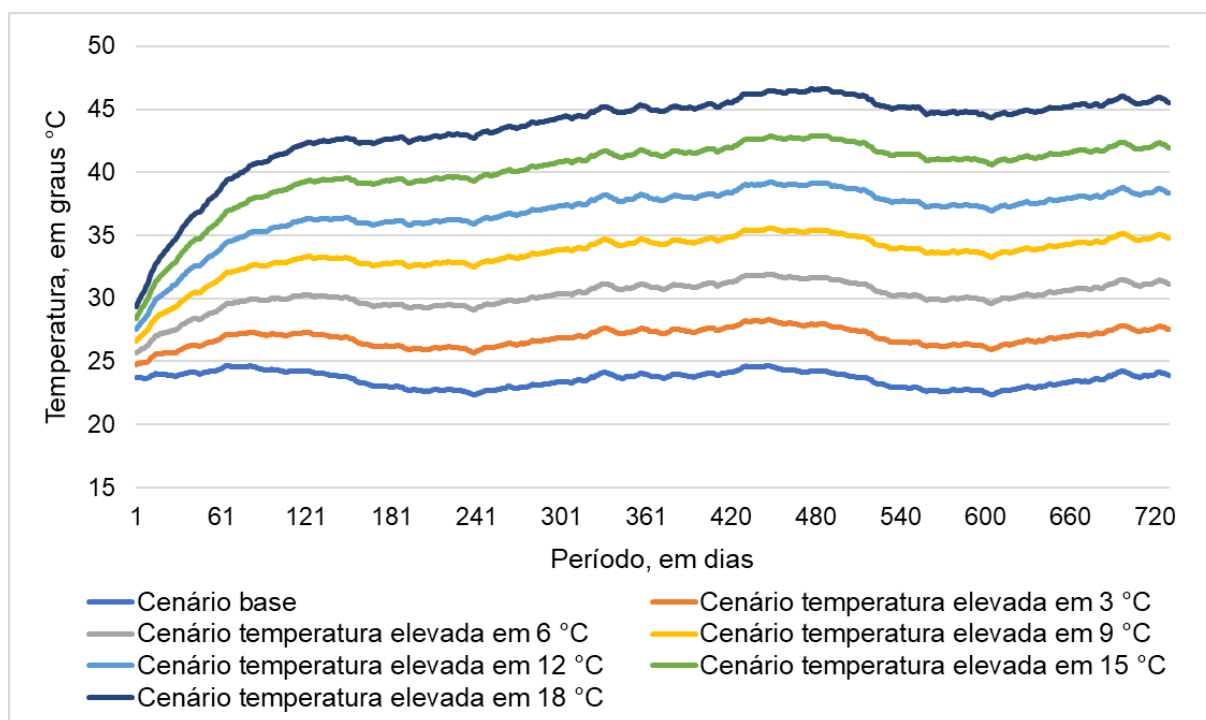
4.5.1. Modelo simulado

O *software energy plus* foi utilizado tendo em vista o fato de ser mundialmente aplicado em trabalhos acadêmicos e no desenvolvimento de projetos que necessitam simular trocas térmicas, aquecimento, refrigeração e iluminação, entre outros que envolvem transferência de energia. A precisão do *software* já foi avaliada e é amplamente reconhecida em vários estudos, inclusive comparativamente a outros, como *TRNSYS* e *IDA ICE*, demonstrando um desempenho aceito por pesquisadores (MAZZEO et al., 2020). Por essas razões, esse *software* foi adotado neste estudo.

A Figura 4.5 ilustra os resultados das simulações do cenário-base e das seis demais, em que se implementou o aquecimento com revolvimento para as quatro

diferentes espessuras de isolamento térmico do biodigestor. Os resultados indicaram que são necessários cerca de três meses para que a temperatura da biomassa, no interior do biodigestor, tenda à estabilização. A metodologia adotada consistiu em simular elevações da temperatura média anual em 3 °C, da biomassa, de forma consecutiva até a elevação de 18 °C para a última simulação. Essa metodologia foi adotada por permitir observar os efeitos do aquecimento com o revolvimento do biodigestor em diferentes temperaturas, a partir do cenário-base.

Figura 4.5 – Temperatura da biomassa para o cenário-base e para as simulações de aquecimento com revolvimento no biodigestor



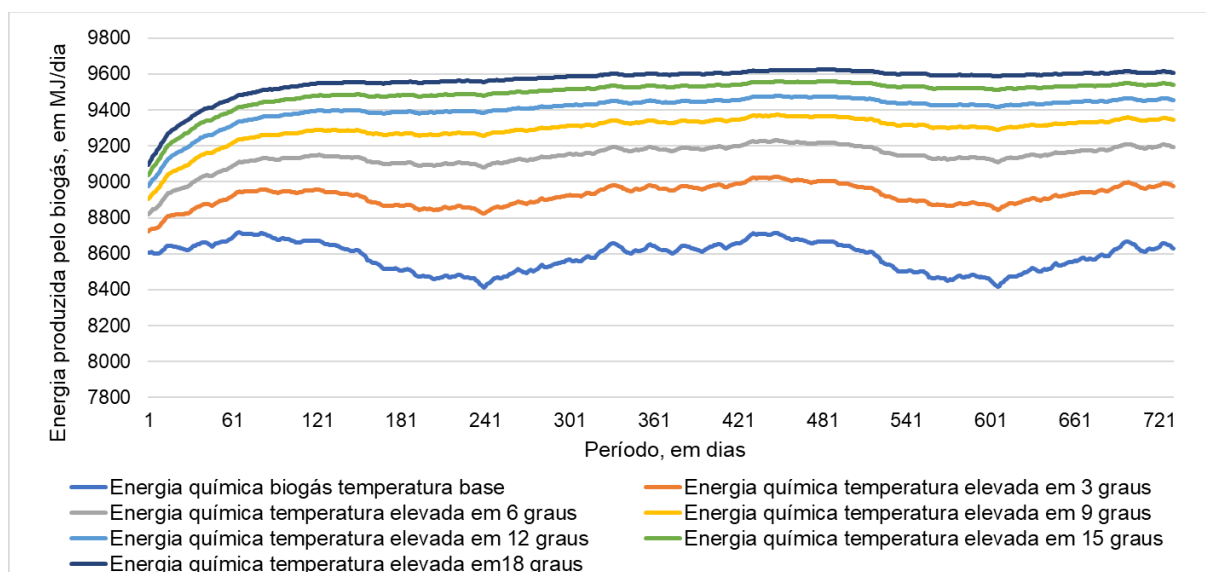
Existem estudos que apontam que o revolvimento pode permitir maximizar a produção de biogás, no entanto se pode atribuir o efeito positivo do revolvimento à maximização da produção de biogás em reatores providos de aquecimento (LEITE et al., 2023). Assim, a justificativa para que as simulações de aquecimento fossem providas de revolvimento foi para permitir homogeneizar a temperatura interna do biodigestor, mas cabe ressaltar que os efeitos apenas do revolvimento não foram considerados na simulação de produção de biogás.

Com a maior temperatura de operação do biodigestor, o processo de biodigestão pode ser mais efetivo, permitindo maximizar a redução de matéria

orgânica no efluente. Aspectos ambientais da eficiência do tratamento não foram avaliados nesta pesquisa, haja vista que visou maximizar a produção de biogás. Apesar disso, cabe destacar que a melhoria do tratamento da água residuária pode influenciar positivamente, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, justificando, assim, a implementação dos sistemas de revolvimento com aquecimento.

Na Figura 4.6, pode-se observar a produção diária de energia química proveniente do biogás para o cenário-base e as demais seis simulações que envolvem o aquecimento do biodigestor com revolvimento e isolamento térmico. É interessante destacar que a produção de energia do biodigestor não é linearmente dependente da temperatura.

Figura 4.6 – Produção de energia diária para o cenário-base simulado e para as simulações de aquecimento com revolvimento no biodigestor



Na Figura 4.6, observa-se que o aquecimento com revolvimento do biodigestor implica maior produção volumétrica de biogás. No entanto, devido à natureza do processo biológico, a relação entre a temperatura da biomassa e a produção de biogás não é linear. Assim, devido à complexidade do processo biológico para a produção do biogás, otimizar a produção em biodigestores do tipo BLC não é um processo trivial. Esta pesquisa avaliou diferentes temperaturas da biomassa, pois estudos recentes apontam que altas temperaturas subtermofílicas de cerca de 45 °C são ideais a esse processo (CHETAWAN et al., 2021).

As quatro diferentes espessuras do isolamento simuladas não influenciaram as curvas de produção de energia diária para os casos estudados, pois a energia fornecida para aquecimento da biomassa foi reduzida de forma a manter a temperatura da biomassa, independentemente da espessura do isolamento. Com isso, tendo a mesma temperatura de operação do biodigestor, pôde-se avaliar o efeito das diferentes espessuras de isolamento em relação à demanda de energia térmica para aquecimento do biodigestor.

Na Tabela 4.3, apresentam-se os resultados das simulações para o caso-base e os demais que envolveram o aquecimento com revolvimento do biodigestor com diferentes espessuras de isolamento térmico. Os resultados foram referentes à utilização principal do biogás como combustível para a cogeração de energias elétrica e térmica. Discutiu-se também a utilização de uma fonte auxiliar para complementar a demanda térmica, nos casos em que a energia térmica da cogeração não foi suficiente para suprir a demanda de calor. Nesses casos, duas fontes de energia térmica foram consideradas, provenientes de: coletores solares ou queima de parte do biogás produzido, aproveitadas com o uso de trocadores de calor, conforme Figura 4.4.

Tabela 4.3 – Energia produzida pelo biogás, consumo do sistema de aquecimento do afluente e energia elétrica injetada na rede para o caso de aproveitamento de calor de cogeração no primeiro ano de operação

Cenários*	Energia produzida (GJ/ano)	química pelo biogás	Energia térmica consumida para aquecimento do afluente (GJ/ano)	Energia elétrica injetada na rede (MWh/ano)
Base	3133,67		0,00	287,25
+3 C°	3247,78		142,10	290,41
+6 C°	3323,36		283,98	297,34
+9 C°	3377,34		425,78	302,29
+12 C°	3417,93		567,49	306,01
+15 C°	3449,68		709,33	308,92
+18 C°	3475,23		851,42	311,26

* No cenário-base, a temperatura média anual da biomassa foi de 23,58 °C. Os demais de + 3 a + 18 °C se referem aos cenários em que se simulou a elevação da temperatura média anual da biomassa.

O balanço de energia térmica da cogeração é diferente para os casos simulados com diversas espessuras de isolamento; isso ocorre devido às várias

demandas de energia térmica para aquecimento do biodigestor, as quais podem ser vistas na Tabela 4.4. Cabe destacar que os valores negativos, apresentados na coluna referente ao balanço de energia térmica da cogeração, indicam que houve necessidade de complementar a energia térmica proveniente da cogeração por meio da fonte auxiliar.

Tabela 4.4 – Balanço de energia térmica da cogeração e energia térmica e consumida para aquecimento do biodigestor para o caso de aproveitamento de calor de cogeração no primeiro ano de operação

Cenários*	Balanço de energia térmica da cogeração (GJ/ano)				Energia térmica consumida para aquecimento do biodigestor a partir da cogeração (GJ/ano)			
	Sem isolante	Isolante 2,5 cm	Isolante 5,0 cm	Isolante 10,0 cm	Sem isolante	Isolante 2,5 cm	Isolante 5,0 cm	Isolante 10,0 cm
+3 °C	1.146,57	1.179,40	1.187,90	1.195,78	107,88	74,96	66,08	58,42
+6 °C	923,50	986,48	1.006,64	1.024,49	221,57	158,53	138,17	120,30
+9 °C	688,57	782,94	814,89	842,66	337,91	243,31	211,26	183,06
+12 °C	447,82	572,97	616,81	655,40	454,43	328,79	284,90	245,98
+15 °C	201,24	358,38	414,46	463,47	572,80	414,89	358,97	309,40
+18 °C	-49,27**	141,45	209,00	268,75	692,20	501,09	433,38	373,02

*No cenário-base, a temperatura média anual da biomassa foi de 23,58 °C. Os demais de + 3 a +18 °C se referem aos cenários em que se simulou a elevação da temperatura média anual da biomassa.

**Valores negativos referem-se à situação em que a energia térmica da cogeração foi insuficiente para aquecimento do biodigestor.

Em perspectiva, a energia produzida pelo biogás na condição do cenário-base, simulada no período de um ano, seria suficiente para permitir a movimentação de 58 toneladas em veículos de transporte de carga a biometano por uma distância de cerca de 117.453 km. Para a situação simulada com aquecimento em +18 °C da temperatura de operação do biodigestor, a energia química produzida pelo biogás aumenta, permitindo chegar a 130.256 km. Esses valores reforçam a importância do aproveitamento energético do biogás, que pode se tornar um recurso estratégico para granjas de produção de suínos.

Já a geração de energia elétrica simulada por meio da cogeração da queima do biogás corresponde a 1,02 a 1,14 da demanda de energia elétrica da granja. O

primeiro valor foi obtido para o cenário-base, já o segundo foi para a implementação dos sistemas de aquecimento com revolvimento, que promovem a elevação da temperatura de operação do biodigestor em $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cabe destacar que, mesmo para a simulação do cenário-base, a autossuficiência elétrica da granja pode ser alcançada, e isso pode ser atribuído, especialmente, à média de temperatura anual de operação do biodigestor, que foi de $23,58\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vale ressaltar que a temperatura média do solo, do efluente, e a energia solar no caso-base estudado são fatores importantes para essa avaliação

4.5.2. Validação da simulação

A validação da simulação foi efetuada para o cenário-base, que representa o BLc modelado neste estudo. A variável escolhida para validação é a temperatura da biomassa no interior do biodigestor, e sua escolha se deu por dois critérios: (i) Essa é a variável que será a entrada do modelo para a estimativa da produção de energia; (ii) A validação desse parâmetro permite inferir que a simulação representa o modelo, pois este é dependente de outras variáveis e cálculos realizados a partir de outros parâmetros e entradas do modelo, por exemplo: radiação solar, vento, temperatura do solo e ambiente. A validação da temperatura é uma forma amplamente utilizada em estudos que envolvem simulações (LAM et al., 2021).

O valor calculado da raiz do erro quadrático médio foi 1,79 e o da raiz do erro quadrático médio relativo, 7,46, sendo esses valores inferiores aos obtidos por Maradini et al. (2021). Os respectivos valores podem ser atribuídos a erros de simulação e a possíveis incertezas relacionadas à produção animal. Por exemplo: o fluxo de afluente nas simulações foi considerado uniforme ao longo do dia, sendo em geral desuniforme em função do manejo dos animais. Outra consideração foi que os dados climáticos podem também contribuir para o erro, haja vista que os dados utilizados foram provenientes de uma estação distante cerca de 20 km do local modelado, em que foram medidos os dados utilizados para validação.

4.5.3. Balanço energético e avaliação econômica

Para o período de operação de 10 anos, obtiveram-se o quantitativo de energia química produzida pelo biogás e de energia elétrica gerada injetada na rede e as demandas de energia térmica para aquecimento do biodigestor para cada uma das situações simuladas. Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados das simulações, cabendo destacar que a energia química produzida pelo biogás e pela energia elétrica injetada na rede são independentes da espessura do isolamento térmico, haja vista que nas condições simuladas a espessura interferiu diretamente apenas na demanda de energia térmica para aquecimento do biodigestor, ou seja, no balanço de energia térmica da cogeração, na maioria dos casos. Em outras palavras, somente no caso de aquecimento da biomassa para 18 °C acima da temperatura média houve demanda de fonte auxiliar de energia térmica.

Tabela 4.5 – Balanço de energia para simulação de 10 anos de operação do biodigestor com sistemas de aquecimento com revolvimento e diferentes espessuras de isolamento térmico

Cenários *	Energia química produzida pelo biogás, em GJ	Energia elétrica injetada na rede, MWh	Balanço de energia térmica da cogeração, em GJ			
			Sem isolante	Isolante 2,5 cm	Isolante 5,0 cm	Isolante 10,0 cm
Base	31.335,03	2.872,38	0,00	0,00	0,00	0,00
+3 °C	32.640,14	2.919,01	11.271,56	11.581,13	11.653,20	11.709,59
+6 °C	33.469,62	2.995,05	8.796,66	9.384,85	9.572,06	9.713,89
+9 °C	34.040,89	3.047,42	6.183,35	7.060,33	7.364,45	7.590,71
+12 °C	34.457,87	3.085,64	3.504,02	4.661,09	5.083,64	5.404,68
+15 °C	34.776,32	3.114,83	762,77	2.210,04	2.754,94	3.166,21
+18 °C	35.027,61	3.137,86	-2.019,50	-266,00	392,60	897,63

*No cenário-base, a temperatura média anual da biomassa foi de 23,58 °C. Os demais de + 3 a +18 °C se referem aos cenários em que se simulou a elevação da temperatura média anual da biomassa.

No período de 10 anos, observa-se, na Tabela 4.5, que para o melhor cenário, em termos quantitativos de produção de energia química pelo biogás, obteve-se um ganho de cerca de 11,8% em relação ao cenário-base. O resultado de 11,8% é superior ao obtido para a avaliação do primeiro ano de operação, que foi de 10,9%,

haja vista que no primeiro ano houve um período transitório necessário para o aquecimento do biodigestor até a nova temperatura de operação. Resultados similares aos obtidos nesta pesquisa são relatados na literatura, em que estudos experimentais em escala laboratorial envolvendo o aquecimento da biomassa de um cenário de 30 °C para 45 °C apresentaram uma produção de metano 10% maior (CHETAWAN et al., 2021).

Na Tabela 4.5, mostra-se que na maioria dos casos há excedente de energia térmica da cogeração, mesmo aquecendo o biodigestor. Como exemplo, cita-se o caso de aquecimento superior a 3 °C em relação ao cenário-base e com espessura de isolamento de 2,5 cm; nessa situação, há um excedente de 11.581,13 GJ no período de 10 anos. Para os casos de aquecimento superior a 18 °C, em relação ao cenário-base e com espessura de isolamento de 0,0 cm e 2,5 cm, não houve excedente de energia térmica da cogeração, sendo necessário complementar a demanda térmica com fonte auxiliar de calor a fornecer 2.019,50 e 266,00 GJ no período de 10 anos, respectivamente.

Outros resultados da literatura contrapõem-se aos obtidos nesta pesquisa. Por exemplo, Silva et al. (2017) compararam os resultados de plantas de produção de biogás convencionais brasileiras, i. e., sem sistemas de controle de aquecimento e revolvimento com plantas automatizadas da Dinamarca. Constataram que as plantas automatizadas produzem cerca de 133% a mais de biogás do que as convencionais. No entanto, os resultados podem ser questionados, pois o método de comparação não considerou, por exemplo, a carga orgânica do afluente e nem a temperatura de operação dos biodigestores. Com isso, o percentual pode ter sido sobrestimado, ou seja, o potencial de produção de energia em plantas a biogás automatizadas em relação às convencionais pode não ser de 133% maior.

Na Tabela 4.6, têm-se os valores econômicos resultantes da operação do biodigestor por 10 anos para cada uma das simulações efetuadas. Cabe considerar que o valor da energia elétrica foi calculado para o valor da tarifa de consumo, o da energia térmica foi obtido considerando custos evitados com lenha, porém se destaca que a utilização da energia térmica da lenha pode exigir acréscimo significativo nos custos de mão de obra, que não foram considerados nos cálculos realizados nesta pesquisa. Além do mais, o uso de lenha no mínimo dificulta e até inviabiliza a

automação e processo de controle de temperatura do biodigestor. Essa metodologia, então, permitiu atribuir valor econômico às energias elétrica e térmica.

Tabela 4.6 – Valoreconômico da energia elétrica injetada na rede e da energia térmica da cogeração produzida pela queima do biogás, para simulação de 10 anos de operação do biodigestor

Cenários*	Energia elétrica injetada na rede, em R\$	Valor da energia térmica do biogás excedente produzida pela cogeração (consumida para aquecimento do biodigestor), considerando custos evitados com lenha, em R\$			
		Sem isolante	Isolante 2,5 cm	Isolante 5,0 cm	Isolante 10,0 cm
Base	1.003.896,81	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
+3 °C	1.020.194,00	52.976,33 (12.989,39)	54.431,31 (11.561,96)	54.770,04 (11.248,22)	55.035,07 (11.014,49)
+6 °C	1.046.769,98	41.344,30 (26.297,82)	44.108,80 (23.571,39)	44.988,68 (22.705,72)	45.655,28 (22.072,26)
+9 °C	1.065.073,29	29.061,75 (39.734,88)	33.183,55 (35.655,56)	34.612,92 (34.235,18)	35.676,34 (33.204,90)
+12 °C	1.078.431,18	16.468,89 (53.170,44)	21.907,12 (47.776,63)	23.893,11 (45.796,60)	25.402,00 (44.316,40)
+15 °C	1.088.633,09	3.585,02 (66.697,92)	10.387,19 (59.940,37)	12.948,21 (57.382,74)	14.881,19 (55.476,27)
+18 °C	1.096.682,07	-9.491,65 (80.282,46)	-1.250,20 (72.082,54)	1.845,22 (68.990,74)	4.218,86 (66.641,06)

*No cenário-base, a temperatura média anual da biomassa foi de 23,58 °C. Os demais de + 3 °C a +18 °C se referem aos cenários em que se simulou a elevação da temperatura média anual da biomassa.

Os resultados da Tabela 4.6 evidenciam, no cenário simulado de aquecimento do biodigestor para uma temperatura 18 °C, em média, superior à do caso-base, a oportunidade de geração de energia elétrica supera a do caso-base em cerca de R\$92.785,26, o que representa em torno de 9,7% do custo da tarifa de consumo de energia elétrica da granja. Essa oportunidade, decorrente da maior produção de biogás, pôde ser observada nas situações do isolamento térmico com as espessuras de 5,0 cm e 10,0 cm. Nas situações sem isolamento e com isolamento com espessura de 2,5 cm, é necessária a complementação de calor através da fonte auxiliar de calor, suprida por energia solar térmica, por energia térmica da queima de parte do biogás

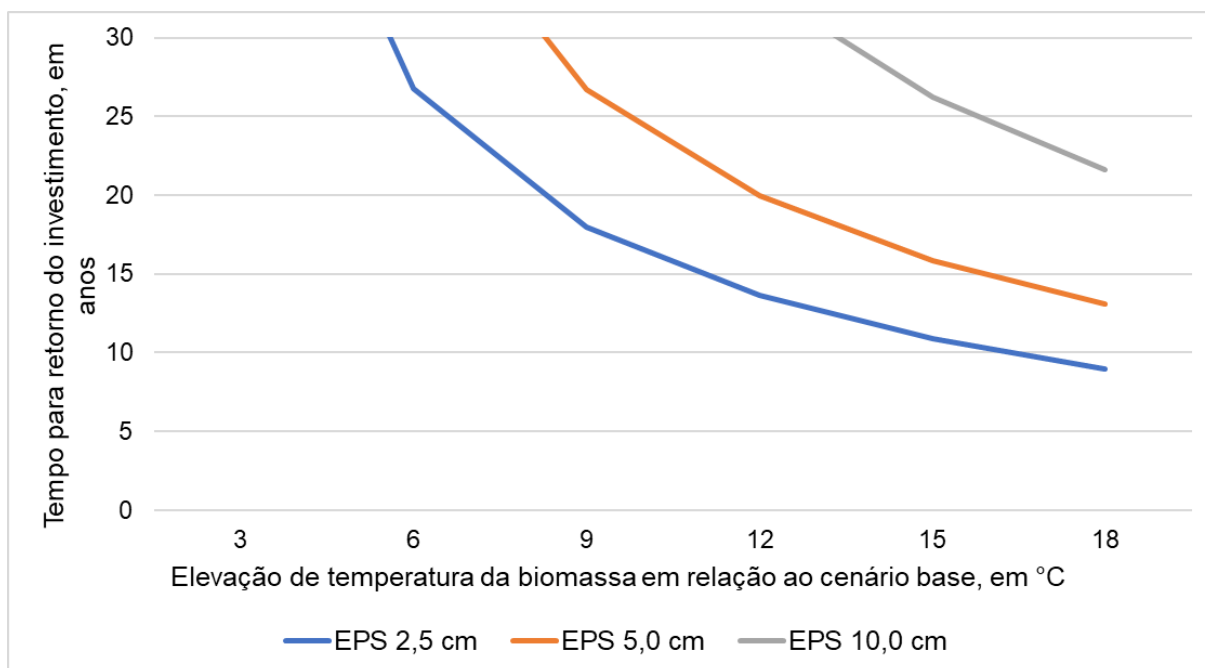
ou com biomassa de lenha. Os resultados permitem ponderar que, em regiões mais frias do que a do cenário-base, uma fonte auxiliar de calor pode ser necessária. Isso se justifica, pois, mesmo com o isolamento térmico do biodigestor na espessura de 5 cm, cerca de 97% do calor disponível da cogeração foi utilizado para aquecer o biodigestor a +18 °C.

Obteve-se a estimativa de valor econômico por unidade energética do biogás, considerando o aproveitamento máximo da cogeração de energias elétrica e térmica, nos cenários simulados, variando de 31,30 a 32,94 R\$/GJ de biogás produzido no biodigestor. Esses valores foram calculados considerando a precificação da energia elétrica de acordo com a tarifa de consumo aplicável e da energia térmica com base em custos evitados com a lenha. Cabe considerar que, caso a energia térmica excedente da cogeração não seja aproveitada, a faixa de valores se reduziu de 31,30 a 32,03 R\$/GJ nos cenários simulados. Cabe destacar que os valores do biogás apresentados são superiores ao da lenha em cerca de sete vezes.

Caso o biogás possa ser comercializado a um valor superior a 32,94 R\$/GJ, conclui-se que a opção pela cogeração não se justifica, pois esse é o máximo valor obtido nos cenários simulados. Caso haja disponibilidade de um energético de menor custo para geração de energia térmica, como a lenha, a queima de parte do biogás para aquecimento do biodigestor também não se justificaria nos cenários simulados. Cabe considerar que um sistema de aquecimento solar também pode ser avaliado como alternativa para aquecimento do biodigestor, porém apresenta desafios em razão da intermitência do fornecimento de energia e do custo de implementação.

A área revestida pelo isolamento térmico em EPS 100, no modelo simulado, foi de 678,125 m². Considerando o custo com o material para isolamento, tem-se que o investimento seria de R\$7.405,13 para a espessura de 2,5 cm, R\$14.810,25 para a espessura de 5,0 cm e R\$29.620,50 para a espessura de 10,0 cm. O tempo de retorno do investimento para aquisição do material para o isolamento térmico pode ser visto na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Tempo de retorno do investimento para aquisição do isolamento térmico de EPS 100 em função da temperatura do biodigestor



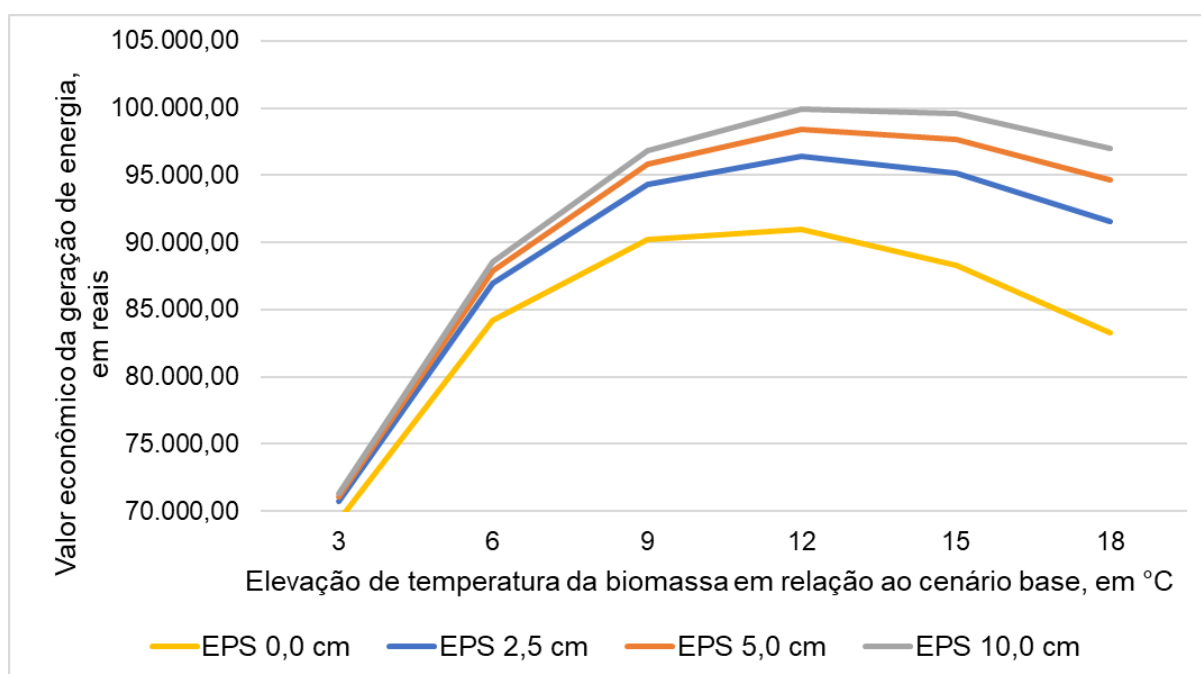
O revestimento térmico com espessura de 2,5 cm se mostrou mais viável economicamente pela maior relação entre redução das perdas de calor para o solo e custo do material. A viabilidade do isolamento também é função da temperatura do biodigestor. Assim, para elevação da temperatura do cenário-base a 18 °C, o tempo de retorno investimento, considerando apenas o custo do material isolante, é de cerca de nove anos para a espessura de 2,5 cm e pode chegar a mais ou menos 22 anos para o isolamento de 10,0 cm. Pode ser inferido na Figura 4.7 que a viabilidade econômica do isolamento térmico é proporcional à diferença de temperatura entre o biodigestor e o ambiente externo; logo, para regiões mais frias do que a do caso-base simulado, pode-se ter maior viabilidade econômica para o isolamento térmico.

Cabe ter em conta que, para a máxima geração de energia elétrica, i.e., quando se considera a elevação da temperatura do cenário-base em 18 °C e caso seja utilizado o isolamento de espessura de 2,5 cm, será necessário complementar o fornecimento de calor, enquanto para a situação com isolamento de 5,0 cm isso não é necessário. Assim, conclui-se que sem uma fonte de calor auxiliar, com isolamento de 5,0 cm, é possível operar o biodigestor com temperatura superior à do cenário de +18 °C, o que resultará, no período de 10 anos, em R\$8.048,98 a mais, em decorrência da geração de energia elétrica. Perfaz-se, assim, uma diferença

econômica superior à do preço para aquisição do isolamento de 5,0 cm em relação ao de 2,5 cm, que foi de R\$7.405,12.

A Figura 4.8 apresenta a oportunidade econômica da geração de energias elétrica e térmica obtidas com a implementação dos sistemas de cogeração, em função das diferentes elevações da temperatura em relação ao cenário-base. O que se observa é que a elevação da temperatura em 12 °C proporciona maior oportunidade econômica, independentemente da espessura de isolamento. A oportunidade é máxima para a espessura de isolamento de 10,0 cm e pode alcançar R\$99.936,37. Para a mesma temperatura, a oportunidade com a espessura de isolamento de 2,5 cm e 5,0 cm são de R\$96.441,49 e R\$98.427,48, respectivamente. A diferença econômica obtida entre os cenários com diferentes espessuras de isolamento foi relativamente pequena em relação à diferença de valor das espessuras do material de isolamento, i. e., pelo menos 3,7 vezes menor.

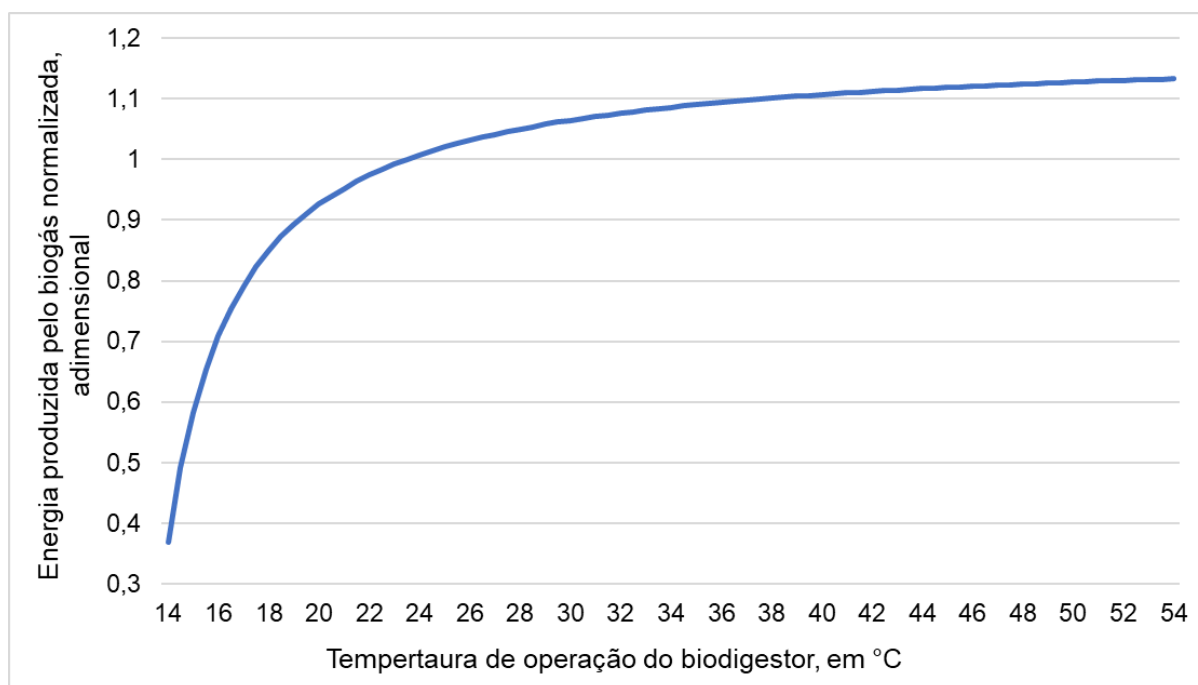
Figura 4.8 – Oportunidade econômica decorrente da geração de energias elétrica e térmica em função da temperatura de operação do biodigestor para diferentes espessuras de isolamento



4.5.4 Avaliações complementares

A utilização do modelo descrito nas Equações de 1 a 4 permitiu obter a curva apresentada na Figura 4.9, que exhibe a quantidade de energia química produzida pelo biogás no processo de biodigestão de resíduos orgânicos em função da temperatura de operação do biodigestor. Os resultados deste trabalho foram normalizados para a temperatura de 23,58 °C, que foi a média anual da temperatura da biomassa no cenário-base simulado neste estudo (CHEN, 1983).

Figura 4.9 – Energia produzida pelo biogás em função da temperatura da biomassa, normalizada para a temperatura do cenário-base, i.e., 23,58 °C



* A curva foi obtida a partir das equações propostas por Chen (1983).

Os resultados do estudo de caso indicaram que a viabilidade da cogeração, bem como os ganhos com aumento da geração de energias elétrica e térmica, está intimamente relacionada à temperatura da biomassa. O que se pode observar na Figura 4.9 é que, caso a avaliação fosse realizada em uma região de temperatura média anual inferior à verificada na região em estudo, os resultados seriam mais favoráveis à metodologia proposta. Em uma região onde a temperatura da biomassa do biodigestor fosse, em média, 5 °C menor do que a do local de estudo, i.e., 18,58 °C, o potencial de aumento de produção de energia com o aquecimento do biodigestor

em + 12 °C seria cerca de 22%. Já para uma diferença de temperatura superior a 9 °C abaixo da temperatura do caso-base, i.e., 14,38 °C, o potencial passaria de 100%.

Os resultados de Deng et al. (2014) apontam, por meio de balanço energético, que a temperatura de operação de um biodigestor que maximizou a produção de biogás foi de 20 °C, considerando-se as condições climáticas chinesas. No entanto, esses resultados foram obtidos na região de clima frio, com temperatura média anual de 15 °C, ou seja, o que se evidencia é que regiões de clima frio exigem estudos pontuais, para que a necessidade de calor para aquecimento da biomassa possa ser avaliada em profundidade. O ideal é que as perdas térmicas possam ser reduzidas com a implementação do isolamento térmico, permitindo adequar a temperatura de operação do biodigestor de forma a maximizar a produção de energia.

Outro fator que influencia drasticamente a viabilidade da implementação dos sistemas de aquecimento com revolvimento é o tamanho do biodigestor. Apesar de os resultados de simulação desta pesquisa indicarem que pode ser viável promover o aquecimento com revolvimento do biodigestor, em especial em regiões de clima mais frio, como o Sul do Brasil, biodigestores maiores tendem a ter maior viabilidade. Na Tabela 4.7 são apresentados dados hipotéticos e cálculos do volume, da área e da relação área/volume, de acordo com uma dimensão característica para o formato de cubo. Evidencia-se que, incrementando o volume oito vezes, a área superficial cresce apenas quatro vezes, ou seja, tende a perdas térmicas menores com o aumento da dimensão característica do biodigestor.

Tabela 4.7 – Dimensão característica, área, volume e relação área/volume aplicáveis para avaliação qualitativa de perdas térmicas em biodigestores

Dimensão característica	Volume interno	Área superfície	Relação área/Volume
1,00	1,00	6,00	6,00
1,26	2,00	9,52	4,76
1,44	3,00	12,48	4,16
1,59	4,00	15,12	3,78
1,71	5,00	17,54	3,51
1,82	6,00	19,81	3,30
1,91	7,00	21,96	3,14
2,00	8,00	24,00	3,00

Assim, as vantagens relacionadas a biodigestores de maior porte são: (i) Os equipamentos para aquecimento, cogeração e revolvimento tendem a ser mais eficientes conforme o tamanho; e (ii) As perdas térmicas são proporcionais à área de superfície do biodigestor; logo, quanto maior o volume dos biodigestores, menor é a área superficial, proporcionalmente.

4.6. Conclusão

Os resultados desta pesquisa evidenciaram que o aquecimento com revolvimento do biodigestor promove maior produção de biogás. Simulou-se o aquecimento do biodigestor e elevando a temperatura média em +12 °C, chegou-se à temperatura ótima de operação de 35,58 °C. Esse valor foi obtido, em termos de maior produção de energias térmica e elétrica, pela cogeração. A espessura ótima de isolamento foi de 2,5 cm do ponto de vista econômico e de 5,0 cm para maximizar a produção de energia elétrica.

O cenário-base simulado apresentou temperatura média anual da biomassa de 23,58 °C. Assim, incrementando essa temperatura em +18 °C, observou-se que a produção de biogás pode ser aumentada em cerca de 12%. Os resultados deste estudo de caso podem ser mais promissores para situações em que o biodigestor esteja em uma região de clima mais frio do que o do local do caso-base situado em Teixeira, Minas Gerais, Brasil, na latitude 20° 34' 07,2" S, longitude 42° 52' 01,6" O e 678 m de altitude. O aquecimento com revolvimento pode permitir dobrar, ou ainda mais, a produção de biogás em situações em que a temperatura média anual da biomassa seja mais do que 9 °C inferior à do estudo de caso simulado. Dessa forma, a viabilidade econômica do sistema de cogeração para aquecimento do biodigestor e do afluente pode ser significativamente aumentada.

Para os casos em que a temperatura média de operação do biodigestor for significativamente inferior à do caso-base simulado nesta pesquisa, estudos devem ser feitos para determinar o efeito do aquecimento na produção de biogás. Para climas mais frios, pode ser necessário, além das estratégias aqui simuladas envolvendo o aproveitamento de calor e o uso do calor da cogeração, o uso da energia térmica solar ou de outras fontes extras, como a biomassa de lenha ou parte do biogás.

Este estudo apresentou limitações relacionadas às simulações realizadas e à consideração de que a temperatura interna do biodigestor seja homogênea. Essa consideração pode resultar na imprecisão da estimativa do quantitativo de produção de energia química do biogás, especialmente, no cenário-base, em que não foi considerada a existência de sistemas de revolvimento. A validação das simulações foi efetuada apenas nesse cenário, haja vista que os sistemas de aquecimento com revolvimento do biodigestor foram apenas simulados, ou seja, não foram validados pela inexistência de um sistema em escala plena que permitisse a validação em diferentes situações das simulações.

Para estudos futuros, sugere-se que as simulações sejam replicadas para outros biodigestores situados em diferentes regiões, em especial de clima frio. Além do mais, a construção de protótipos em escala para verificação dos resultados simulados pode permitir, com maior precisão, avaliar esses resultados. Por último, a implementação dos sistemas propostos em um biodigestor pode permitir verificar os resultados e desenvolver sistemas comerciais que permitam aumentar a produção de biogás.

4.7. Referências

- ABIOGAS. Plano nacional do biogás. 2021. **ABiogás**. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf. Acesso em: 08 jul. 2023.
- ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual–2022**. ABPA:2022,144p. Disponível em: <https://abpa-br.org/quem-somos/abpa-relatorio-anual/>. Acesso em: 02 mar. 2023.
- ALVES, R. C.; OLIVEIRA, A. L. C.; CARRASCO, E. V. M. Propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.015312>.
- ASTM. ASTM D792-13. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. 2013. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/D792>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- BOLZONELLA, D.; INNOCENTI, L.; CECCHI, F. Biological nutrient removal wastewater treatments and sewage sludge anaerobic mesophilic digestion performances. **Water Science and Technology**, v. 46, n. 10, p. 199-208, 1 nov. 2002. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2002.0330>.

BUDZIANOWSKI, W. M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1148-1171, fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.054>.

CALZA, L. F.; LIMA, C. B. DE; NOGUEIRA, C. E. C.; SIQUEIRA, J. A. C.; SANTOS, R. F. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola** 35(6). 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p990-997/2015>.

CEMIGD. Cemig Distribuição. Valores de tarifas e serviços. 2023. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

CHEN, Y.R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural Wastes**, v. 8, n. 2, p. 65-81, jan. 1983. [http://dx.doi.org/10.1016/0141-4607\(83\)90105-1](http://dx.doi.org/10.1016/0141-4607(83)90105-1).

CHENG, D. L.; NGO, H. H.; GUO, W. S.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; KUMAR, S. MATHAVA; DU, B.; WEI, Q.; WEI, D. Problematic effects of antibiotics on anaerobic treatment of swine wastewater. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 642-653, set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.010>.

CHENG, S.; LI, Z.; MANG, H.; HUBA, E.; GAO, R.; WANG, X. Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 387-400, jun. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.035>.

CHETAWAN, W.; SARITPONGTEERAKA, K.; PALAMANIT, A.; CHAIPRAPAT, S.. Practical approaches for retrofitting plug flow digester and process control to maximize hydrolysis and methane yield from piggery waste. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105620, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2021.105620>.

CHOWDHURY, T.; CHOWDHURY, H.; HOSSAIN, N.; AHMED, A.; HOSSEN, M. S.; CHOWDHURY, P.; THIRUGNANASAMBANDAM, M.; SAIDUR, R. Latest advancements on livestock waste management and biogas production: bangladeshs perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122-818, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122818>.

COWLEY, C.; BRORSEN, B. W. Anaerobic Digester Production and Cost Functions. **Ecological Economics**, v. 152, p. 347-357, out. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.06.013>.

CRUZ, M. L.; SIQUEIRA, A. M. O.; CAMPOS, J. C. C.; SILVA, C. L. Estudo da eficiência energética de uma caldeira flamotubular em uma indústria de laticínios. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 8, n. 2, p. 1-14, 15 mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl8iss2pp14015-01e>.

DENG, L.; YANG, H.; LIU, G.; ZHENG, D.; CHEN, Z.; LIU, Y.; PU, X.; SONG, L.; WANG, Z.; LEI, Y. Kinetics of temperature effects and its significance to the heating

strategy for anaerobic digestion of swine wastewater. **Applied Energy**, v. 134, p. 349-355, dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.027>.

DIN 52612-2. Tesing of thermal insulating materials; determination of thermal conductivity by means of the guarded hot plate apparatus; conversion of the measured values for building applications. 1984. Disponível em: <https://standards.globalspec.com/std/171082/DIN%2052612-2>. Acesso em: 15 maio 2020.

DOMINGUES, E.; FERNANDES, E.; GOMES, J.; MARTINS, R. C. Advanced oxidation processes perspective regarding swine wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, v. 776, p. 145958, jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145958>.

ECOVERDEN. **Tabela - poder calorífico inferior**. 2022. Disponível em: <http://www.ecoverden.com.br/files/tabelaPoderCalorificoGrifado.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

HAN, R.; HAGOS, K.; JI, X.; ZHANG, S.; CHEN, J.; YANG, Z.; LU, X.; WANG, C. Review on heat-utilization processes and heat-exchange equipment in biogas engineering. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 8, n. 3, p. 032701, maio 2016. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4949497>.

HARRIS, P. W.; MCCABE, B. K. Process Optimisation of Anaerobic Digestion Treating High-Strength Wastewater in the Australian Red Meat Processing Industry. **Applied Sciences**, v. 10, n. 21, p. 7947, 9 nov. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/app10217947>.

HOLLAS, C.; RODRIGUES, H. C.; BOLSAN, A. C.; VENTURIN, B.; BORTOLI, M.; ANTES, F. G.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. Swine manure treatment technologies as drivers for circular economy in agribusiness: a techno-economic and life cycle assessment approach. **Science of the Total Environment**, v. 857, p. 159494, jan. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159494>.

HREIZ, R.; ADOUANI, N.; JANNOT, Y.; PONS, M. Modeling and simulation of heat transfer phenomena in a semi-buried anaerobic digester. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 119, p. 101-116, mar. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.007>.

Incomplast. **Polietileno PEAD**, 2023. Disponível em: <https://incomplast.com.br/pead/>. Acesso em: 15 julho 2023.

KEE, S.H.; CHIONGSON, J. B. V.; SALUDES, J. P.; VIGNESWARI, S.; RAMAKRISHNA, S.; BHUBALAN, K. Bioconversion of agro-industry sourced biowaste into biomaterials via microbial factories – A viable domain of circular economy. **Environmental Pollution**, v. 271, p. 116311, fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116311>.

KHAN, J.; SAIF-UL-ALLAH, M. W.; QYYUM, M. A.; AHMED, F.; YASIN, M.; HUSSAIN, A.; GILLANI, Z.; BAZMI, A. A. Reduction in Specific Energy Consumption of Overall Biogas Upgrading and Biomethane Liquefaction Process: energy and exergy

analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 271, p. 116269, nov. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116269>.

LAM, C. K. C.; LEE, H.; YANG, S.; PARK, S. A review on the significance and perspective of the numerical simulations of outdoor thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 71, p. 102971, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2021.102971>.

LATECAE. **Dados climáticos complementares de Viçosa para o EnergyPlus**. Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética. Disponível em: <http://www.latecae.ufv.br/en-US/downloads>. Acesso em: 15 jul. 2023.

LEITE, S. A. F.; LEITE, B. S.; FERREIRA, D. J. O.; BAÊTA, B. E. L.; DANGELO, J. V. H. The effects of agitation in anaerobic biodigesters operating with substrates from swine manure and rice husk. **Chemical Engineering Journal**, v. 451, p. 138533, jan. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2022.138533>.

LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: a review. **Applied Energy**, v. 240, p. 120-137, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>.

LIU, Y.; CHEN, Y.; LI, T.; WANG, D.; WANG, D. Investigation on the heat loss characteristic of underground household biogas digester using dynamic simulations and experiments. **Biosystems Engineering**, v. 163, p. 116-133, nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.002>.

LOPES, J. O.; ROSA, A. P.; SOUSA, I. P.; OLIVEIRA, N. S.; BORGES, A. C. Mathematical models for estimating methane production in covered lagoon biodigesters treating pig manure. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 4, p. 438-448, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n4p438-448/2021>.

LOURINHO, G.; RODRIGUES, L. F. T. G.; BRITO, P. S. D. Recent advances on anaerobic digestion of swine wastewater. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 17, n. 12, p. 4917-4938, 10 jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-020-02793-y>.

MADHUSUDHANAN, A. K.; NA, X.; BOIES, A.; CEBON, D. Modelling and evaluation of a biomethane truck for transport performance and cost. Transportation Research Part D: **Transport and Environment**, v. 87, p. 102530, out. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2020.102530>.

MARADINI, P. S.; ROSA, A. P.; LOPES, J. O.; CARLO, J. C.; BORGES, A. C. Thermal exchanges in a covered lagoon biodigester treating pig farm effluent heated by solar energy. **Engenharia Agrícola**, v. 43, n., p. 1-9, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v43nepe20220130/2023>.

MARTINEZ-BURGOS, W. J.; SYDNEY, E. B.; MEDEIROS, A. B. P.; MAGALHÃES, A. I.; CARVALHO, J. C.; KARP, S. G.; VANDENBERGHE, L. P. S.; LETTI, L. A. J.; SOCCOL, V. T.; PEREIRA, G. V. M. Agro-industrial wastewater in a circular economy: characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemicals.

Bioresource Technology, v. 341, p. 125795, dez. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125795>.

MASALA, F.; GROPP, D.; NASTASI, B.; PIRAS, G.; GARCIA, D. A. Techno-economic analysis of biogas production and use scenarios in a small island energy system. **Energy**, v. 258, p. 124831, nov. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2022.124831>.

MAZZEO, D.; MATERA, N.; CORNARO, C.; OLIVETTI, G.; ROMAGNONI, P.; S. LIVIO. EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module. **Energy and Buildings**, v. 212, p. 109812, abr. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109812>.

MFRURAL. **Custos combustíveis**. 2022. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br>. Acesso em: 02 jul. 2023.

MILECH, F. B.; CABREIRA, R. M.; LUZ, M. L. G. S.; LUZ, C. A. S.; GADOTTI, G. I.; GOMES, M. C. Electricity generation and biofertilizer on a dairy farm using anaerobic biodigesters. **Científica**, v. 43, n. 2, p. 101, 15 abr. 2015. <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2015v43n2p101-108>.

MME Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

NIE, E.; HE, P.; ZHANG, H.; HAO, L.; SHAO, L.; LÜ, F. How does temperature regulate anaerobic digestion? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111453, out. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111453>.

NIU, S.; DAI, R.; ZHONG, S.; WANG, Y.; QIANG, W.; DANG, L. Multiple benefit assessment and suitable operation mechanism of medium- and large-scale biogas projects for cooking fuel in rural Gansu, China. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 46, p. 101285, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2021.101285>.

NOTÍCIASAGRÍCOLAS. **Preço do eucalipto**. 2023. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/silvicultura/preco-eucalipto>. Acesso em: 02 jul. 2023.

PFLUGER, A.; COONTZ, J.; ZHITENEVA, V.; GULLIVER, T.; CHERRY, L.; CAVANAUGH, L.; FIGUEROA, L. Anaerobic digestion and biogas beneficial use at municipal wastewater treatment facilities in Colorado: a case study examining barriers to widespread implementation. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 97-107, jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.161>.

PÖSCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. **Applied Energy**, v. 87, n. 11, p. 3305-3321, nov. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.011>.

REINODOISOPOR. **Placas de Isopor**. 2023. Disponível em: <https://reinodoisopor.com.br/product-category/placas-de-isopor/>. Acesso em: 15 julho 2023.

ROSA, A. P.; LOBATO, Livia C. S.; BORGES, J. M.; MELO, G. C. B.; CHERNICHARO, C. A. L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso estação de tratamento de efluentes laboreaux (itabira). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. v. 21, n. 2, p. 315-328, 20 jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016123321>.

SANTONJA, G. G.; GEORGITZIKIS, K.; SCALET, B. M.; MONTORBIO, P.; ROUDIER, S.; SANCHO, L. D. **Best available techniques (BAT) reference document for the intensive rearing of poultry or pigs**. EUR 28674 EN, v. 11, p. 898, 2017. Disponível em: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC107189/jrc107189_01_ir_pp_bref_07_2017.pdf. Acesso em: 02 mar. 2023.

SILVA, S. C.; NICÁCIO, J. V.; ROSA, A. P. Programa nacional e potencial brasileiro de produção em sistemas automatizados de biogás. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/18473>. Acesso em: 10 set. 2023

SOUSA, I. P.; ROSA, A. P.; BORGES, A. C. CECON P. R. Estudo do potencial energético e das variáveis do processo em biodigestores anaeróbios modelo lagoa coberta. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/28358>. Acesso em: 02 jul. 2023.

SOUSA, I. P.; ROSA, A. P.; LOPES, J. O.; MAGOS, B. R.; CECON, P. R.; PEREZ, R.; BORGES, A. C. Study of internal and external temperatures and their influence on covered lagoon digester performance. **Biomass and Bioenergy**, v. 159, p. 106380, abr. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106380>.

VAZ, N. P.; OLIVEIRA, D.; MARTINS, A. M.; CARLO, C. J.; ROSA, P. A.; MENDES, M. A. M. E. Computational fluid dynamics simulation of thermodynamic behaviour of tubular digester. **Ifac-Papersonline**, v. 53, n. 2, p. 15829-15834, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.234>.

WANG, Z; MA, T; XING, L. Process performance and microbial interaction in two-stage continuously stirred tank reactors for sludge anaerobic digestion operated at different temperatures. **Biochemical Engineering Journal**, v. 161, p. 107682, set. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2020.107682>.

ZAHEDI, S.; GROS, M.; PETROVIĆ, M.; BALCAZAR, J.L.; PIJUAN, M. Anaerobic treatment of swine manure under mesophilic and thermophilic temperatures: fate of veterinary drugs and resistance genes. **Science of the Total Environment**, v. 818, p. 151697, abr. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151697>.

ZHOU, Z.; LIU, J.; ZENG, H.; ZHANG, T.; CHEN, X. How does soil pollution risk perception affect farmers' pro-environmental behavior? The role of income level.

Journal of Environmental Management, v. 270, p. 110806, set. 2020.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110806>.

5. HIDROGÊNIO VERDE E BIOMETANO COMO RECURSOS ENERGÉTICOS ESTRATÉGICOS PARA O SETOR DE TRANSPORTE DO BRASIL

5.1. Resumo

A renovabilidade da matriz energética brasileira é notável, especialmente, no setor elétrico, no entanto o segmento de transporte do país precisa continuar avançando na transição energética para fontes renováveis. Para isso, tendências do emprego do biometano e do hidrogênio verde devem ser prioridade no planejamento energético, sobretudo quanto aos aspectos ambientais. Avaliaram-se nesta pesquisa rotas e potencial de produção de biometano e hidrogênio verde a partir de resíduos orgânicos no Brasil, bem como a demanda desses energéticos para substituir o gás natural, o diesel e a gasolina no transporte rodoviário. A produção de biometano e hidrogênio verde de origem orgânica a partir dos resíduos da pecuária, da produção vegetal e do saneamento urbano seria suficiente para substituir cerca de 78% da demanda dos combustíveis não renováveis desse modal. Para a transição completa até 2050, avaliou-se, por meio do processo de eletrólise, a complementação necessária da produção do hidrogênio oriundo do aproveitamento dos resíduos orgânicos. O processo de eletrólise demandará cerca de 210 TWh/ano de eletricidade, o que representa cerca de 33% da geração nacional de energia elétrica em 2022.

Palavras-Chave: Planejamento energético. Biodigestão. Resíduos orgânicos. Biocombustíveis. Energia renovável.

5.2. Introdução

A necessidade de transição energética em nível mundial tem exigido a transformação acentuada da produção e utilização do suprimento para reduzir a dependência de fontes fósseis. O Brasil tinha matriz energética, ainda em 2022, predominantemente fóssil, com cerca de 40% de participação de fontes renováveis. Apesar disso, o setor elétrico já conta com quase 88% da energia proveniente de fontes renováveis. Nessa linha, cabe priorizar investimentos nessas fontes para

aqueles setores em que se tem maior demanda de energia primária e que são supridos essencialmente por fontes não renováveis (MME, 2023).

O setor de transporte brasileiro é o que demanda maior quantidade de energia no país, ficando à frente dos setores industrial e residencial. Em 2022, cerca de 33% da demanda interna de energia do Brasil foi para transporte, sendo 94% desse total para o setor rodoviário. Este modal foi responsável por aproximadamente 61,2% da demanda de derivados de petróleo em 2022, número que vem crescendo desde 1990. Cabe destacar a importância do setor de transportes para todos os demais, incluindo o agroindustrial, pois o Brasil é um país de dimensões continentais. O segmento de transporte gera um dos maiores custos para o setor agroindustrial, que depende da movimentação de insumos e matérias-primas em todas as etapas produtivas (HENTZ; HESPANHOL, 2023).

A utilização de combustíveis renováveis torna-se primordial para o desenvolvimento sustentável e a mitigação das mudanças climáticas. Nessa linha, o hidrogênio e o biometano têm grande potencial para aumentar a renovabilidade no setor de transportes do país. O hidrogênio possui diversas aplicações, a exemplo da utilização como insumo energético em processos industriais, armazenamento de energia, cogeração, trigerção e fonte de energia para veículos de transporte. Atualmente, o hidrogênio tem-se tornado um recurso energético estudado em profundidade, em especial as suas rotas de produção, armazenamento e consumo (YUE et al., 2021).

Uma significativa vantagem do hidrogênio em relação a outros combustíveis reside na sua elevada densidade de energia específica. O hidrogênio pode fornecer quase três vezes mais energia do que a combustão da gasolina por unidade de massa, pois contém 33,33 kWh/kg, em comparação com cerca de 12,00 kWh/kg da gasolina ou do diesel (HANDWERKER; WELLNITZ; MARZBANI, 2021). Cabe destacar que as rotas de conversão do hidrogênio em energia elétrica e, ou, mecânica podem ser mais eficientes do que as dos combustíveis fósseis citados, a exemplo da utilização dos carros elétricos, que possuem eficiência, pelo menos, duas vezes maior do que veículos movidos por motores de combustão interna (WILBERFORCE et al., 2017).

Cabe destacar a grande autonomia de carros de passeio a hidrogênio, que podem atingir 700 km com apenas 5 kg desse energético (ABDEREZZAK; BUSAWON; BINNS, 2017). As aplicações do hidrogênio também estão sendo

estudadas no transporte marítimo a respeito da oportunidade de redução de emissões, no entanto sua utilização ainda enfrenta desafios (ATILHAN et al., 2021). Apesar das grandes oportunidades proporcionadas pelo uso do hidrogênio, sua produção sustentável ainda permanece desafiadora, mesmo com o seu enorme potencial no setor de transporte.

Uma grande vantagem estratégica do hidrogênio é a possibilidade de armazenar excedentes da geração de energia elétrica pela eletrólise. Sistemas fotovoltaicos (FV) e eólicos são intermitentes e podem ter sua geração associada à produção de hidrogênio. Assim, constituem importante alternativa para atenuar a intermitência, seja por absorverem os excedentes e contribuírem com o sistema elétrico, seja por permitirem o desenvolvimento de novas tecnologias que dependem do hidrogênio como fonte de energia (KHAN, 2020).

O hidrogênio permite o desenvolvimento de técnicas de cogeração e trigeração, com a utilização de células de combustível, para a geração de energias elétrica e térmica, com eficiência de até cerca de 90%. O uso de células de combustível promete um grande potencial de descarbonização e tem altas eficiências, podendo atingir 60% na conversão de hidrogênio em energia elétrica (SUN et al., 2021). No entanto, essa tecnologia possui limitações, principalmente com relação a custos. As emissões das células de combustível são extremamente baixas, daí o aumento do interesse em pesquisas científicas, em nível mundial, para melhorar ainda mais sua eficiência e reduzir custos de produção. Isso pode viabilizar um maior índice de eletrificação do setor de transportes a partir do hidrogênio e de células de combustível (WILBERFORCE et al., 2017).

O hidrogênio pode ser obtido por diferentes processos, e atribuem-se-lhe diversas cores como forma de identificar a fonte de energia primária utilizada para produzir esse combustível. Assim, a cor marrom é atribuída ao hidrogênio obtido pela reforma do carvão mineral; cinza, a combustíveis fósseis que emitem CO₂ diretamente ao ambiente; azul, a combustíveis fósseis em processos em que o CO₂ não é emitido ao ambiente; turquesa, que provém da pirólise do metano com a formação de carbono sólido; amarelo, refere-se à eletrólise de H₂O, usando eletricidade produzida por um mix de combustíveis fósseis e renováveis; branco, quando é obtido como um produto secundário de reações químicas; violeta, vermelho ou rosa, referem-se ao obtido pela

eletrólise de H₂O assistida por energia nuclear; e verde, em que é produzido pelas diferentes fontes de energia renovável (LO FARO; CANTANE; NARO, 2023).

Devido às inúmeras aplicações e vantagens da utilização do hidrogênio, a produção a partir de fontes renováveis de energia desse energético se torna prioridade. O desenvolvimento de tecnologias para essa produção, i.e., de hidrogênio verde, tem se tornado tendência à medida que possui potencial para poder substituir combustíveis fósseis, seja por fatores políticos, econômicos e ambientais (GONDAL; MASOOD; KHAN, 2018). Para esse intento são necessários investimentos em fontes de energia primárias renováveis e com mínimo impacto ambiental, para que seja possível viabilizar a utilização do hidrogênio em escala mundial (NICITA et al., 2020).

Enquanto o hidrogênio se destaca como um novo energético, o biometano pode ser a alternativa mais viável para o aumento da renovabilidade energética. Essa vantagem se deve à possibilidade de substituição direta do gás natural pelo biometano, o que permite que toda a infraestrutura de transporte e utilização do gás natural possa ser mantida. No Brasil, esse gás participa com cerca de 10,5% na matriz energética nacional de energia primária, sendo em torno de 15% desse total importado. Em 2022, o total de energia de gás natural consumida foi de aproximadamente 31,71 Mtep por ano (MME, 2023).

O consumo anual de gás natural variou de 39.485 a 33.091 milhões de m³ de 2013 a 2022, respectivamente – chegou a atingir um pico de 43.230 em 2014. Em perspectiva, o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) corresponde energeticamente a cerca de 25% do total de gás natural consumido no Brasil (MME, 2023). Em 2022, a utilização do gás natural foi da seguinte forma: setor industrial, 31,4%; energia elétrica, 30,8%; produção de derivados, 11,1%; transporte, 6,8%; setor energético, 4,3%; e outros usos, 5,5%. Isso reforça a importância de que no planejamento energético nacional se englobem também o biometano e o hidrogênio de fontes renováveis de energia como alternativas ao gás natural.

O Brasil já se destaca como grande produtor de combustíveis renováveis, especialmente aplicados ao setor de transporte, sendo um dos maiores produtores de etanol em nível mundial, além de contar com o biodiesel, que compõe 10% do diesel comercializado no país (CÉSAR et al., 2019). O destaque na produção de etanol se deve ao Programa Nacional do Álcool, que há mais de 40 anos incentiva a produção desse biocombustível (STOLF; OLIVEIRA, 2020). Além do mais, o país possui um dos

maiores potenciais do mundo para produção de biogás de resíduos (ABIOGÁS, 2023; SINIGAGLIA et al., 2022). Mesmo em condições de destaque com relação à produção de biocombustíveis, novas fontes e alternativas, como hidrogênio verde, são promissoras.

Gondal, Masood e Khan (2018) concluíram que a biomassa é a matéria-prima mais viável para o desenvolvimento de uma cadeia de abastecimento de hidrogênio no Paquistão. Com isso, concluíram que, tendo em vista limitações de recursos físicos e econômicos, o potencial desse país para produção de hidrogênio pode chegar a 6,6 milhões de toneladas anualmente a partir de resíduos orgânicos agroindustriais. Essa produção pode ser acrescida em cerca de 2,8 milhões de toneladas com o uso da energia solar FV disponível. Com os resíduos sólidos municipais, a produção de hidrogênio pode ser aumentada também, em aproximadamente, um milhão de toneladas por ano. Assim, pode-se inferir que, pela alta produção agroindustrial, o Brasil tem também grande potencial de produção de hidrogênio verde a partir de resíduos.

Apesar das vantagens do hidrogênio verde, principalmente sob a perspectiva ambiental, a produção atual de hidrogênio é concentrada em países em desenvolvimento, e cerca de 90% são oriundos a partir do gás natural e de outros combustíveis fósseis, como o carvão mineral (KHAN, 2020). O processo de reforma a vapor, ou reforma a vapor do metano, é um método mais consolidado para produzir gás de síntese pela reação de hidrocarbonetos com água. Geralmente, o gás natural é a matéria-prima, cujo processamento é atualmente responsável pela produção de cerca de 96% do hidrogênio utilizado na indústria, sendo o restante proveniente da eletrólise. Esse elevado percentual de produção oriundo do gás natural pode ser atribuído aos custos e a restrições tecnológicas (JIANG et al., 2022).

A eletrólise, segundo Chien et al. (2021), é a forma mais efetiva de produção de hidrogênio puro, e atualmente fontes renováveis de energia elétrica têm sido consideradas nesse processo, com ênfase em sistemas eólicos. E em alguns estudos a eletrólise tem apresentado viabilidade econômica para a geração de hidrogênio renovável e para a gestão de excedentes da energia eólica. Apesar de ser a forma de produção de hidrogênio verde com maior desenvolvimento, a eletrólise é responsável por apenas 4% da produção mundial de hidrogênio e apresenta maiores custos de

produção do que outras tecnologias que dependem de fontes de energia não renováveis (KUMAR; LIM, 2022).

Novas rotas de geração do hidrogênio verde podem permitir viabilizar a produção em escala, podendo, assim, atender à demanda mundial com menor dependência de fontes fósseis e menos impactos ambientais. Nessa linha, o processo de digestão anaeróbia tem enorme potencial para produzir biometano e hidrogênio verde (KHAN, 2020). Uma técnica para maximizar a produção desse hidrogênio é via reforma a vapor de biogás (NOOIJER et al., 2018). Além da reforma a vapor, existe a reforma auto térmica para a produção do gás de síntese. No entanto, a tecnologia mais utilizada para produzir hidrogênio é a primeira (ANTONINI et al., 2020).

A rota de conversão de resíduos orgânicos em biogás e, posteriormente, em biometano e, ou, hidrogênio é a alternativa para tratar resíduos orgânicos com alto teor de umidade que não são adequados para a autocombustão, o que constitui uma vantagem na gestão de resíduos e uma solução para fonte de hidrogênio (KHAN, 2020). O hidrogênio e o biometano, quando utilizados como combustíveis, têm impacto mínimo no ambiente e são opções que podem ser viáveis e promissoras, mas insuficientemente estudadas. A procura mundial pela produção desses biocombustíveis pode aumentar de dezenas a centenas de vezes, e para satisfazer essa demanda são necessários estudos que permitam o desenvolvimento e consolidação de tecnologias (ZHIZNIN; TIMOKHOV; GUSEV, 2020).

Apesar de o planejamento governamental brasileiro para desenvolvimento de células de combustível ter começado em 2002, o programa foi iniciado apenas em 2021. O Brasil iniciou um novo programa de hidrogênio para promover o desenvolvimento de tecnologia, formação de recursos humanos em diferentes níveis, códigos e padrões de regulamentação de planejamento energético e um esforço especial em estímulo ao mercado e cooperação internacional (LO FARO; CANTANE; NARO, 2023). No entanto, novas células de combustível a biometano podem ser também a alternativa a ser explorada, e o planejamento energético brasileiro pode contar com essas novas tecnologias.

Há uma limitação no estudo do potencial de produção de hidrogênio verde e biometano especialmente em países em desenvolvimento (KHAN, 2020). No atual estágio das tecnologias de produção de hidrogênio verde existem limitações, como os elevados custos de produção, a falta de infraestruturas e problemas de

armazenamento e transporte, além da regulamentação e da necessária demanda pelos biocombustíveis (KHAN; AL-GHAMDI, 2023). Assim, esforços contínuos para melhorias de desempenho, aumento de escala, perspectivas técnicas e apoio político são necessários para permitir uma economia do hidrogênio competitiva em custos (YUE et al., 2021). O que se espera é que a avaliação do potencial desses novos combustíveis possa reforçar a necessidade de esforços para viabilizar técnicas de produção em escala. O objetivo desta pesquisa foi avaliar os impactos sobre o planejamento energético decorrente da possibilidade de inserção do biometano e do hidrogênio verde como energéticos alternativos para o setor de transportes do Brasil.

5.3. Rotas de produção do hidrogênio verde e biometano

Entre as rotas de produção de hidrogênio verde, a eletrólise é a mais consolidada e utilizada no mundo. Diferentes técnicas são exploradas, em especial a eletrólise alcalina e outras tecnologias em desenvolvimento, ou seja: membranas de troca iônica; membranas de troca de prótons; e óxido sólido (KHAN, 2020). Para as quatro principais tecnologias de produção de hidrogênio via eletrólise, têm-se as eficiências dos processos, desafios e oportunidades, como mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Técnicas de produção de hidrogênio via eletrólise, desafios e oportunidades

Técnica de eletrólise	Eficiência energética	Oportunidades	Desafios	Fonte
Alcalina	50 a 78%	• Desenvolvimento consolidado. • Comercializado para aplicações industriais. • Isento de metais nobres. • Custo relativamente baixo. • Estabilidade.	• Densidades de corrente limitadas a 100 mA cm^{-2}. • Mistura dos gases. • Eletrólito líquido altamente concentrado.	(KUMAR; LIM, 2022) (WANG et al., 2021)

Membra nas de troca iônica (AEM)	57 a 59%	• Isento de metais nobres. • Eletrólito líquido de baixa concentração. • Baixo custo.	• Tecnologia em desenvolvimento. • Estabilidade. • Melhoria da eficiência.	(KUMAR; LIM, 2022) (LI; BAEK, 2021)
Membra nas de troca de prótons (PEM)	50 a 83%	• Tecnologia já comercializada. • Altas densidades de corrente de cerca de 1 A cm^{-2}. • Alta pureza do H_2. • Sistema compacto. • Resposta rápida.	• Alto custo. • Depende de metais nobres. • Eletrólito ácido.	(KUMAR; LIM, 2022) (LICKERT et al., 2020)
Óxido sólido	89%	• Alta eficiência.	• Em estágio de desenvolvimento laboratorial.	(KUMAR; LIM, 2022)

Apesar das oportunidades da eletrólise, a produção de hidrogênio verde por meio dessa rota está condicionada à disponibilização de energia elétrica renovável para atendimento dessa demanda. Outras rotas de produção a partir de resíduos orgânicos podem ser mais promissoras, por permitir a geração desse biocombustível aliado ao tratamento ambiental. Existem diversas rotas para a produção de hidrogênio verde, ou bio-hidrogênio, a partir de resíduos orgânicos, as quais podem ser divididas em três principais grupos, a saber: (i) Fermentação biológica, (ii) Eletrólise microbiana e (iii) Gaseificação.

Entre as alternativas de fermentação biológica a partir de diversos tipos de biorresíduos, têm-se duas rotas, que são as mais promissoras para a produção de hidrogênio a partir de biomassa: a fermentação escura e a fotofermentação (CHENG et al., 2022). A técnica de fermentação escura permite a conversão de matéria orgânica em hidrogênio e dióxido de carbono. Na fotofermentação, compostos orgânicos e luz são utilizados como fontes de carbono e energia para o crescimento das bactérias e a produção de hidrogênio (AKHLAGHI; NAJAFPOUR-DARZI, 2020).

A eletrólise microbiana é uma tecnologia promissora, tendo em vista a produção simultânea de hidrogênio e o tratamento de águas residuais que utilizam micróbios eletrogênicos. Essa tecnologia consiste em eletrodos anódicos e cátodos na mesma câmara ou em câmaras diferentes, em que os microrganismos degradam

a matéria orgânica no ânodo e produzem hidrogênio no cátodo (GAUTAM et al., 2023). O desenvolvimento da tecnologia que ainda é praticamente de escala laboratorial apresenta dificuldades quanto à modularidade, manutenção e custos. Os eletrodos são uma parte essencial do sistema e, para permitir a escalabilidade, o custo do eletrodo e a eficiência do material do eletrodo são muito importantes para viabilizar esse processo (PARK et al., 2022).

Também, existem processos para a gaseificação da biomassa para a produção de hidrogênio que independem de etapas biológicas e têm alta eficiência na produção de gás de síntese, composto por monóxido de carbono e hidrogênio. Nesses casos, os processos possuem complicadores devido à dificuldade de determinação de parâmetros operacionais ideais em função da biomassa. Novos processos de gaseificação estão sendo aperfeiçoados especialmente com a inserção de catalisadores, que podem aumentar a eficiência do processo (SONG et al., 2022).

Na Tabela 5.2 são apresentadas as principais rotas, desafios e oportunidades de cada uma das estratégias de produção de hidrogênio verde diretamente de resíduos orgânicos.

Tabela 5.2 – Principais rotas de produção de hidrogênio verde a partir de biomassa, desafios e oportunidades

Rota de produção de hidrogênio verde	Oportunidades	Desafios	Fonte
Fermentação escura	• Simplicidade do processo. • Pressão de operação ambiente. • Ampla gama de compostos orgânicos. • Baixa dependência de fontes externas de energia.	• Necessidade de pré-tratamento físico, químico ou biológico. • Produção de CO₂. • Alta sensibilidade ao O₂.	(CARDOSO et al., 2014) (CIECIURA-WŁOCH; BOROWSKI; OTLEWSKA, 2020) (CHENG et al., 2022)
Fotofermentação	• Pode ser usada em conjunto com a fermentação escura. • Possibilidade de aumento de produção de H₂ após a fermentação.	• Dependência de luz para organismos fotossintéticos. • Baixa eficiência de conversão de luz em H₂. • Baixo rendimento. • Produção de CO₂.	(CIECIURA-WŁOCH; BOROWSKI; OTLEWSKA, 2020) e (CHENG et al., 2022)

Célula de eletrólise microbiana (MEC)	• Redução de carga orgânica de efluentes. • Demanda de energia inferior à da eletrólise.	• Viabilidade econômica. (PARK et al., 2022) • Desenvolvimento de eletrodos.
Gaseificação a vapor	• Permite a obtenção do gás de síntese com alta concentração de H₂ e CO. • Permite captura de CO₂. • A biomassa proporciona alta taxa de reação à baixa temperatura.	• Elevada temperatura de operação, entre 600 e 1.000 °C. (SONG et al., 2022) • A formação de alcatrão pode bloquear tubulações e válvulas. • Baixa eficiência de produção de H₂. • Depende do desenvolvimento de catalisadores. • Limitada a resíduos sólidos.

Devido às vantagens e difusão da tecnologia, a fermentação escura tem sido considerada como a principal rota de produção de hidrogênio verde a partir de efluentes (MASILELA; PRADHAN, 2021). A produção de hidrogênio por esse processo depende do tipo de resíduo e, em geral, pode variar de 40,0 a 79,0 ml/g_{sv} a 35 °C (resíduos de cacau), 24 a 52 ml/g_{sv} a 45 °C (resíduos vegetais e silagem de milho); 54,2 a 88,2 ml/g_{sv} a 35 °C (resíduo orgânico agroindustrial); 54,6 a 74,2 ml/g_{sv} a 35 °C (resíduo orgânico urbano); 14 a 53 ml/g_{sv} a 36 °C (resíduo da pecuária) (JUAN et al., 2020; CIECIURA-WŁOCH; BOROWSKI; OTLEWSKA, 2020; SHI et al., 2021; FAVARO et al., 2013; GUO et al., 2010).

Apesar das oportunidades da fermentação escura para conversão de resíduos orgânicos em hidrogênio verde, a eficiência energética do processo é significativamente inferior à da digestão anaeróbia. A eficiência dessa fermentação em termos de aproveitamento de energia é de 0,51 kJ/g_{sv}, enquanto a da digestão anaeróbia é de aproximadamente 5,98 kJ/g_{sv} (PHANDUANG et al., 2019). Com isso, tem-se que a produção de biometano e a posterior conversão desse gás em hidrogênio verde são opções com maior eficiência energética. O tempo de retenção hidráulica é da ordem de horas para o processo de fermentação escura, enquanto para a digestão anaeróbia é de dias (GORGEC; KARAPINAR, 2019; RUFFINO et al., 2019).

Diferentes técnicas de purificação do biogás para biometano são exploradas atualmente, entre as principais se podem destacar cinco: (i) Separação por membrana; (ii) Adsorção por balanço de pressão, (iii) Lavagem com água, (iv) Lavagem com amina e (v) Lavagem com solvente orgânico (KHAN et al., 2021). Entre essas técnicas existem variações e aperfeiçoamentos constantes que buscam sempre menores custos e, especialmente, menor consumo de energia. As técnicas são apresentadas na Tabela 5.3.

O processo de purificação do biogás para biometano é fundamental para que esse combustível possa ser utilizado, especialmente, no setor de transporte (KORBERG; SKOV; MATHIESEN, 2020).

Tabela 5.3 – Técnicas de purificação de biogás para biometano, eficiência, demanda energética, desafios e oportunidades

Técnicas de purificação de biogás para biometano	Perdas de metano, em %	Demanda de energia, em % da energia do biometano produzido	Oportunidades	Desafios
Separação por membrana	2 a 4	2,5 a 4,3	• Simples operação. • Não requer produtos químicos. • Maior viabilidade.	• Custos e degradação das membranas. • Consumo de energia. • Necessidade de remoção prévia de H₂S.
Adsorção por balanço de pressão	<4	4,6	• Não requer produtos químicos. • Tolerável a impurezas.	• Altos custos de operação. • Altos custos de implementação.
Lavagem com água	<3	4,6	• Processo simples. • Tolerável a impurezas.	• Baixa eficiência. • Problemas com corrosão. • Processo lento.
Lavagem com amina	0,5	2,7	• Alta eficiência. • Processo rápido.	• Altos custos iniciais de operação. • Necessidade de pré-tratamento.
Lavagem com outros solventes orgânicos	<1	4,9 a 6,7	• Alta eficiência. • Solventes anticorrosivos.	• Alto consumo de energia. • Altos custos de investimento e operação.

Fonte: KHAN et al., 2021.

Entre as possibilidades de produção de hidrogênio verde, tem-se que é possível a obtenção desse gás a partir da reforma auto térmica do biometano, que permite que o CH_4 seja convertido em H_2 e o processo tenha eficiência energética de cerca de 60%. O aquecimento do reator é responsável por 70% do custo energético do processo (CHEN et al., 2020). Apesar de possível, a conversão de biogás diretamente para hidrogênio apresenta limitações por conta das impurezas presentes no biogás. A reforma depende de um processo que envolve altas temperaturas, de 700 a 800 °C, e de catalisadores que podem ser degradados pelas impurezas do biogás, assim como a conversão do biogás a biometano remove as impurezas, favorecendo o processo de reforma (PARK et al., 2020).

5.4. Planejamento energético para setor de transportes

O setor de transportes do Brasil é responsável por cerca de 33% do consumo de energia primária. A demanda de energia desse setor é distribuída da seguinte forma: rodoviário, 92,6%; ferroviário, 1,4%; aéreo, 4,4%; e hidroviário, 1,6%. Em 2022, a frota brasileira de automóveis atingiu cerca de 75.082.085 unidades e a de veículos de transporte de carga, 4.995.275 (MTR, 2023). Entre os veículos de passeio no Brasil, cerca de 77,5% são do tipo *flex-fuel*, que podem utilizar etanol ou gasolina; e 13,75% são monocombustíveis, i.e., exclusivos a álcool ou a gasolina. A composição de veículos de passeio é de 91% da frota a etanol e, ou, a gasolina, menos de 1% é de veículos híbridos ou elétricos e cerca de 8% a diesel. Já os veículos de transporte de carga são majoritariamente (mais de 99%) movidos a diesel (MTR, 2023; MME, 2022).

Com essa distribuição, as opções de planejamento apresentadas nesta pesquisa foram focadas no setor de transporte rodoviário, cujo consumo de combustíveis no ano 2022 é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário do Brasil em 2022

Tipo de combustível	Consumo de combustível, em Mtep/ano	Participação em percentual energético
Gasolina	24,19	28,82
Álcool etílico	15,16	18,06
Gás natural	1,99	2,37
Óleo diesel	38,56	45,98
Biodiesel	4,00	4,77

Fonte: MME, 2023.

A renovabilidade energética do setor de transportes é de cerca de 23% em razão, essencialmente, da participação do etanol e do biodiesel (MME, 2023). Apesar da oportunidade permitida por esses biocombustíveis, outras possibilidades podem também ser exploradas, como veículos com propulsores a combustão interna a biometano ou com células de combustível a hidrogênio verde. Os automóveis e os veículos de transporte, respectivamente a etanol e, ou, a gasolina; e os veículos de carga a diesel, híbridos, a células de combustível e a biometano possuem diferentes eficiências, como apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Eficiências de automóveis e de veículos de carga com diferentes tecnologias de propulsão

Tecnologia	Automóveis MJ/km	Veículos de carga MJ/km.t
*Combustão	¹ 2,14	² 0,46
**Híbrida	² 1,58	² 0,34
Célula de combustível	³ 0,69	⁴ 0,24
***Biometano	⁵ 1,61	⁶ 0,54

Fonte: ¹MADHUSUDHANAN et al., 2020; ²CRAGLIA; CULLEN, 2019; ³LI et al., 2020; ⁴CUNANAN et al., 2021; ⁵CIGNINI et al., 2020; ⁶PÄÄKKÖNEN et al., 2019.

*Para automóveis a etanol e, ou, a gasolina e veículos de carga a diesel.

**Motor a combustão e a bateria e motor elétrico.

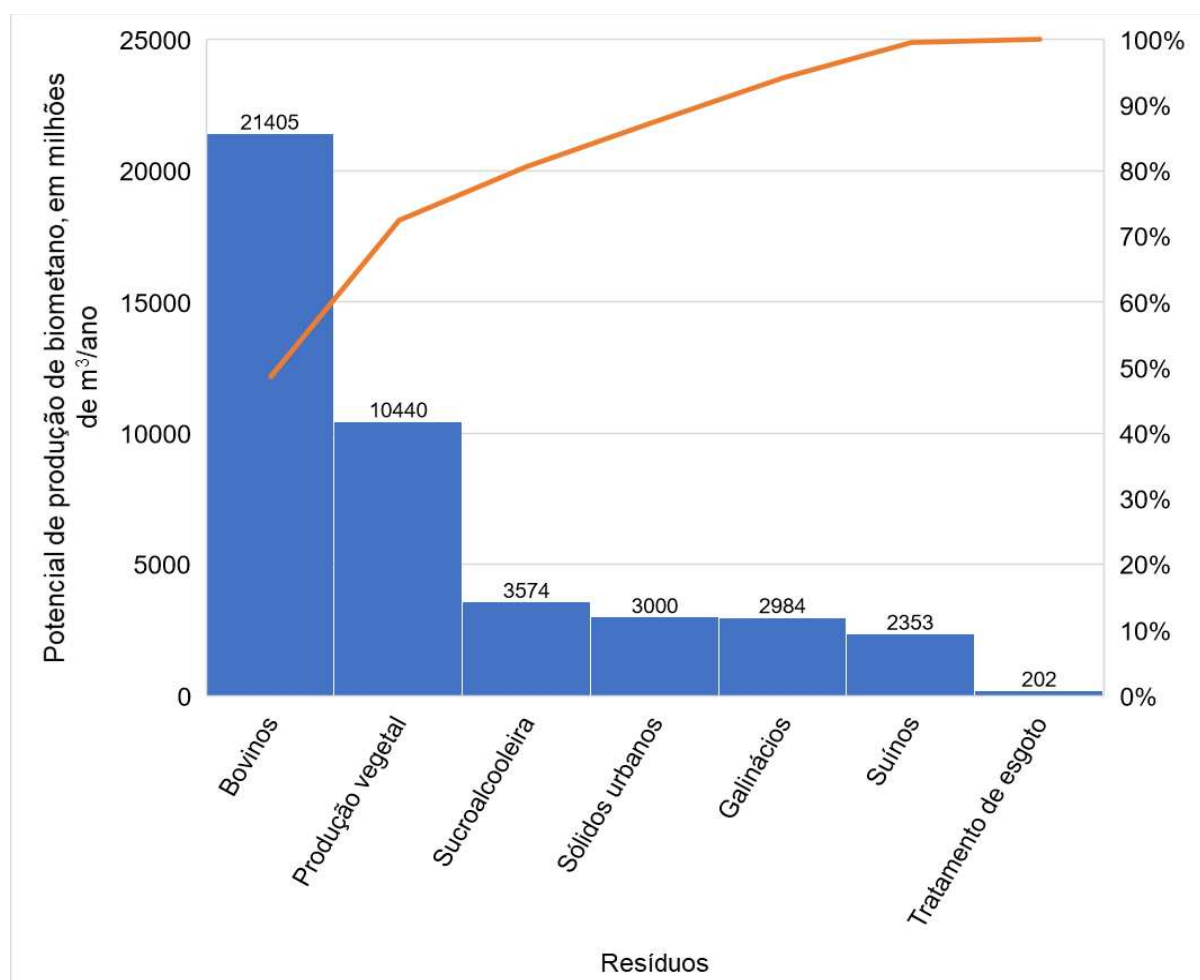
***Motor a combustão.

Os veículos de transporte rodoviário atuais utilizam, em sua maioria, motores a combustão interna e podem ser supridos por diferentes tipos de combustíveis, em

grande parte, fósseis. Para a viabilidade dessas tecnologias, especialmente de hidrogênio verde e biometano, a disponibilização de combustíveis acessíveis é essencial. Portanto, conhecer o potencial brasileiro de produção de biometano a partir de resíduos orgânicos é imprescindível.

Na Figura 5.1 é apresentado o potencial brasileiro de produção de biometano a partir de resíduos de biomassa, e as estimativas foram realizadas considerando 100% do aproveitamento dos dejetos da pecuária, da produção vegetal – incluindo agrícola e silvícola –, do setor sucroalcooleiro, de resíduos sólidos urbanos e do tratamento de esgoto. Apesar dessa estimativa, o aproveitamento total dos resíduos de alguns setores pode não ser viável economicamente.

Figura 5.1 – Potencial de produção de biometano por meio da biodigestão de resíduos orgânicos de diferentes fontes no Brasil



Fonte: ¹IBGE, 2023; ²SCARLAT et al., 2018; ³BORGES et al., 2021; ⁴SANTOS et al., 2018.

¹Dados da produção agropecuária; ²Potencial de produção de biometano a partir de resíduos da pecuária; ³Potencial de produção de biometano da produção vegetal e vinhaça; e ⁴Potencial de produção de biometano de resíduos sólidos urbanos e tratamento de esgoto.

O potencial apresentado na Figura 5.1 é de 43.958 milhões de m³ de biometano, considerando a soma de todas as fontes, o que equivale a 37,62 Mtep. Essa quantidade de energia poderia suprir 2,07 vezes a demanda de gasolina do país ou 83% da demanda de diesel. Isso foi estimado levando-se em conta o consumo de combustíveis apresentado na Tabela 5.4 e as eficiências da Tabela 5.5. Considerando a conversão do biometano a hidrogênio com eficiência energética de 60%, conforme descrito na seção 2, o potencial de produção brasileiro a partir de resíduos orgânicos seria de cerca de 87.564 milhões de m³ de hidrogênio verde, o que equivale a 22,57 Mtep.

Apesar das perdas energéticas na conversão, o potencial de hidrogênio verde no setor de transporte rodoviário poderia suprir 2,89 vezes a demanda de gasolina ou 1,12 vez a de diesel. Os valores em questão também foram estimados segundo os dados das Tabelas 5.4 e 5.5 e são maiores do que o projetado para o biometano, pois os veículos que fazem uso das células de combustível são mais eficientes. Assim, o que se pode concluir é que, mesmo com o maior custo energético para a produção do hidrogênio verde em comparação com o biometano, esse combustível é mais viável por conta da sua maior eficiência nos veículos a propulsão, pois entrega maior rendimento energético final em comparação com o biometano.

A produção de hidrogênio verde pode ser mais vantajosa do que a de biometano devido à sua maior eficiência. Apesar disso, deve-se considerar que a utilização do biometano no setor de transportes pode exigir menor custo em razão da possibilidade de conversão da frota atual com menor investimento. Nessa linha, poder-se-ia investir na expansão do gás natural veicular, haja vista que o biometano pode ser inserido nas redes de gás natural e exigiria menos investimentos, no curto prazo, em infraestrutura de armazenamento, transporte e utilização.

Apesar do grande potencial de produção de biometano a partir de resíduos orgânicos apresentado na Figura 5.1, a utilização energética em 2022 desse quantitativo foi ainda inferior a 2% do potencial (ABIOGAS, 2023). O aproveitamento dos resíduos depende da possibilidade de agrupar determinado volume de resíduos para promover a biodigestão em um processo com escala que apresente viabilidade econômica. A viabilidade da produção de biometano depende do tamanho dos biodigestores, em que, em geral, os de maior porte são mais viáveis economicamente (CAMPELLO et al., 2020).

Um desafio ao aproveitamento do estrume da bovinocultura diz respeito ao confinamento dos animais. No Brasil, cerca de apenas 20% dos animais são confinados, ou seja, o potencial apresentado na Figura 5.1 pode ser drasticamente reduzido em virtude da dificuldade de aproveitamento da matéria orgânica em curto prazo. Cabe destacar que esse percentual de pecuária intensiva vem crescendo nos últimos anos, superando os cerca de 400% acumulados no período de 1990 a 2017 (VALE et al., 2019). Assim, no curto prazo, o potencial brasileiro do aproveitamento de resíduos orgânicos é desafiador.

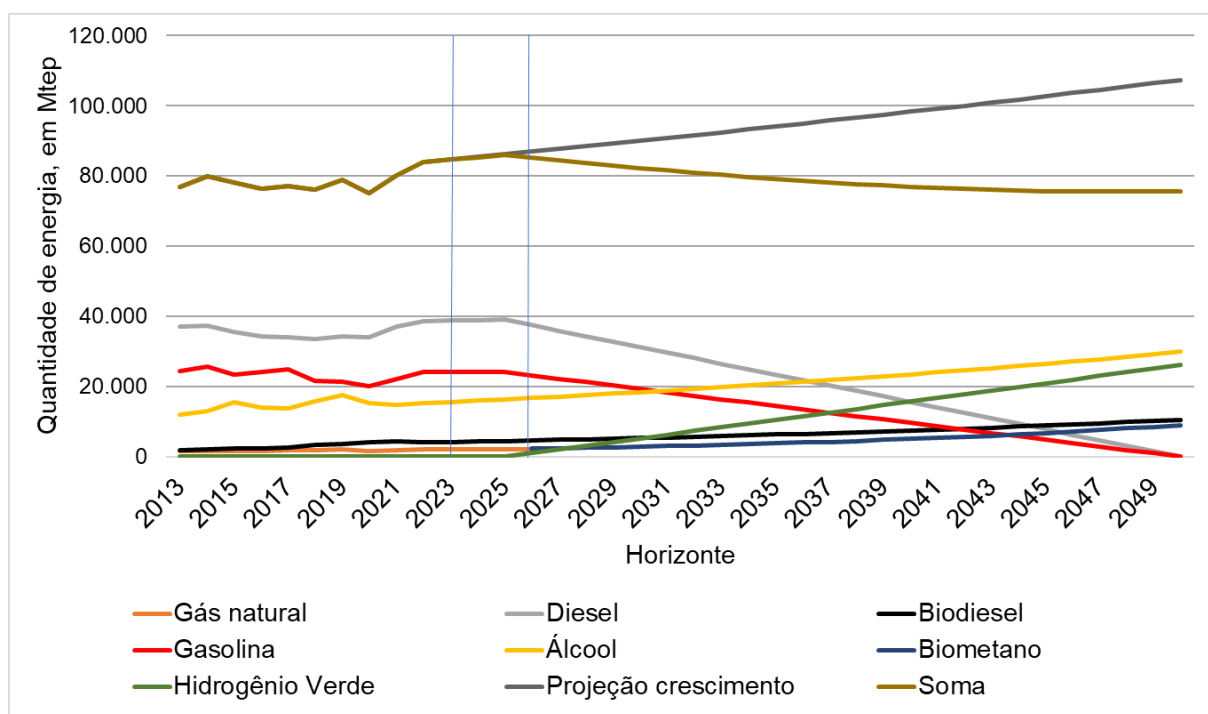
Analogamente, o aproveitamento dos resíduos da produção vegetal para produção de biometano apresenta limitações. Assim como na atividade pecuária, a distribuição dos resíduos vegetais pode ser uma limitação pela necessidade de reuni-los para viabilizar o processo de biodigestão. A produção vegetal, assim como a pecuária, pode estar também situada em regiões distantes do ponto de consumo de biometano e, ou, hidrogênio verde. E isso também pode ser uma limitação que contribui para inviabilizar o aproveitamento total desse potencial. Outra possibilidade é que os resíduos orgânicos possam ter outras aplicações, como a produção de álcool de segunda geração, o que pode também reduzir o potencial de produção de biometano e hidrogênio verde.

Nos últimos 10 anos, de 2013 a 2022, o setor de transporte rodoviário teve crescimento de cerca de 9,18% na demanda energética, ou seja, em torno de 0,88% ao ano. Projetando esse crescimento para os próximos anos até 2050, pode-se estimar a futura demanda energética desse setor. A estimativa linear de crescimento foi feita em separado para cada um dos combustíveis, de acordo com o histórico de 10 anos. A proposta de planejamento consistiu em projetar o crescimento das fontes renováveis álcool e biodiesel, bem como manter o crescimento do gás natural, porém prevendo a substituição deste pelo biometano. Para o diesel e a gasolina, propõe-se avaliar a substituição pelo hidrogênio verde.

O Brasil anunciou medidas estratégicas para o compromisso de neutralidade climática até 2050 (BRICS, 2022). Nessa linha, o que se propõe é que no horizonte de 25 anos, de 2026 a 2050, o Brasil possa zerar a dependência de fontes fósseis no setor de transportes. Assim, na Figura 5.2 é apresentado um panorama histórico e de planejamento, considerando que: (i) De 2013 a 2022, dados históricos de demanda de combustíveis no setor de transporte rodoviário; (ii) de 2023 a 2025, um período de

transição, em que se sugere a preparação para a substituição do gás natural pelo biometano; e (iii) De 2026 a 2050, em que se propõe a redução gradativa e linear da utilização do diesel e da gasolina, considerando a substituição dos respectivos veículos por modelos que fazem uso do hidrogênio com células de combustível.

Figura 5.2 – Histórico e planejamento energético do setor de transportes rodoviários do Brasil



Fonte: ¹MME, 2023.

¹Dados de 2013 a 2022; os dados dos demais anos são de projeções.

Os dados históricos apresentados na Figura 5.2 foram obtidos por meio dos balanços energéticos do Brasil de 2013 a 2022 (MME, 2023). A partir desses dados, calculou-se o crescimento médio anual da demanda de cada um dos combustíveis que compõem o atual mix de energia do setor de transporte rodoviário, a saber: gás natural, 1,91%; diesel, 0,38%; biodiesel, 3,52%; gasolina, -0,08%; álcool, 2,46%; e o índice geral do setor, que foi de 0,88%. A demanda de cada um desses combustíveis foi estimada considerando os dados de crescimento médio dos últimos 10 anos, que foram projetados linearmente até o ano 2050. A partir disso, foi avaliada a demanda de hidrogênio verde e de biometano necessária para suprir a demanda projetada de diesel, gás natural e gasolina, considerando-se as eficiências apresentadas na Tabela 5.5.

A projeção de crescimento linear adotada nesta pesquisa é uma estimativa para permitir avaliar o consumo de combustíveis do setor de transporte rodoviário dos próximos anos. Essa estimativa pode apresentar limitações, haja vista que novos modais de transporte podem ser implementados ou, até mesmo, o crescimento do transporte rodoviário seja saturado ou, ainda, apresente outras razões não exploradas nesta pesquisa. Apesar dessas possíveis limitações, o que se pretende é que o planejamento proposto seja justamente para um possível cenário menos otimista, i.e., com crescimento linear do setor de transporte rodoviário até 2050.

Com a substituição do diesel e da gasolina pelo hidrogênio verde devido à sua maior eficiência, a demanda energética do setor de transporte rodoviário reduzirá. Esse processo ocorre graças à maior eficiência do uso do hidrogênio como energético, garantindo o atendimento da projeção apresentada na curva denominada “rodoviário”. Já na situação de utilização do biometano em substituição ao gás natural não foi considerada alteração na eficiência.

A demanda de biometano e de hidrogênio verde para substituição da demanda projetada de gás natural, gasolina e diesel no setor de transporte para 2050 atinge cerca de 9,05 e 26,17 Mtep, respectivamente. O primeiro valor representa aproximadamente 24% do potencial brasileiro de produção de biometano a partir de resíduos orgânicos. O segundo valor, descontada a demanda de biometano, representa 52% a mais do que o potencial de produção de hidrogênio verde, sendo esses percentuais estimados de acordo com a disponibilidade de resíduos no Brasil em 2022. Essa diferença evidencia a importância de investimentos em tecnologias complementares para a produção do hidrogênio verde, a exemplo da eletrólise, o que pode ser uma solução complementar para o país.

Na Tabela 5.6 são apresentadas as possibilidades de atendimento à demanda de biometano e hidrogênio verde. A demanda complementar desses combustíveis foi planejada considerando o atendimento da necessidade de hidrogênio verde e estimando o consumo de energia elétrica necessária para a eletrólise e a área requerida para suprir esse resultado com sistemas FV, ou seja: (i) Radiação solar anual média de 2,0 MWh/m²/ano (MARTINS et al., 2012); (ii) Eficiência de sistemas FV de 22,5% (CANADIANSOLAR, 2023); e (iii) Eficiência da eletrólise de 64% (KUMAR; LIM, 2022). Diante dessas considerações, têm-se que é necessária uma

área de coletores solares FV de cerca de 40,5 km² para gerar o equivalente a 1 Mtep de hidrogênio/ano.

Em perspectiva, a energia elétrica gerada por sistemas FV em 2022 foi de 30.127 GWh/ano, o que corresponde a cerca de 1,66 Mtep de hidrogênio. Assim, evidencia-se que a geração do equivalente a 1 Mtep de hidrogênio verde com sistemas FV é um desafio considerável, mas exequível, tendo em vista as dimensões do Brasil. Para suprir toda a demanda de hidrogênio verde proposta para substituição do diesel e da gasolina em 2050, exclusivamente com a eletrólise suprida por sistemas FV, seria necessário multiplicar a potência instalada desses sistemas, em 2022, por cerca de 16 vezes. Melhor dizendo, para viabilizar o atendimento da demanda de hidrogênio para o novo cenário do setor de transporte rodoviário do Brasil, proposto nesta pesquisa, o aproveitamento de resíduos orgânicos pode ser uma solução para reduzir a demanda por energia elétrica.

Tabela 5.6 – Possibilidades de atendimento à demanda de hidrogênio verde proposta para o setor de transporte rodoviário do Brasil até 2050

Horizonte	Demanda, em Mtep (% de aproveitamento necessário de resíduos orgânicos)		Demanda complementar para a geração de H ₂ verde*		
	H ₂ verde	Biometano	H ₂ verde eletrólise, Mtep	Demanda elétrica, em GWh	FV necessário, em km ²
2030	5,22 (23%)	2,82 (7%)	-	-	-
2035	10,45 (46%)	3,77 (10%)	-	-	-
2040	15,69 (70%)	5,05 (13%)	5,18	60.243,40	134,16
2045	20,93 (93%)	6,76 (18%)	11,44	133.047,20	296,30
2050	**26,17 (116%)	9,05 (24%)	18,05	209.921,50	476,50

*Considerando o aproveitamento equivalente a 60% do total de resíduos orgânicos disponíveis no Brasil, em 2022, para a produção de biometano e hidrogênio verde.

**Nessa situação, a demanda de hidrogênio verde anual será superior ao potencial de produção, considerando o volume de resíduos orgânicos disponíveis em 2022.

Apenas o aproveitamento equivalente ao total de resíduos disponíveis em 2022 é insuficiente para atendimento da demanda projetada de hidrogênio verde. Assim, a produção complementar com a eletrólise pode ser oportuna. Para 2050, considerou-se no planejamento o aproveitamento do equivalente até 60% do total de

resíduos orgânicos disponíveis em 2022, o que quer dizer que esse pode ser um percentual menor do que aquele que estará disponível em 2050, devido à tendência de crescimento da produção de resíduos orgânicos. Nesse cenário, espera-se que seja necessário complementar a produção de hidrogênio verde.

Pelos dados apresentados na Tabela 5.6 serão necessários cerca de 210 TWh/ano de energia elétrica para a produção de hidrogênio verde a partir da eletrólise. Nessa perspectiva, esse valor equivale a aproximadamente 33% da energia elétrica gerada no Brasil em 2022. Para atender a essa nova demanda, espera-se um crescimento de cerca de 1,1% ao ano até 2050 na atual matriz elétrica de 2022. Esse crescimento será necessário apenas para suprir a demanda extra do setor de transportes. O crescimento percentual apresentado refere-se apenas ao necessário para suprir a produção de hidrogênio verde, no entanto, por conta de outras variáveis envolvidas no planejamento do sistema elétrico, o crescimento geral do setor pode ser em outra proporção.

5.5. Discussão

A implementação do planejamento energético do setor de transportes, proposto nesta pesquisa, dependerá da atualização da frota de veículos. Tendo em vista que a idade da frota brasileira é de, em média, 10,9 anos, espera-se que até 2050 praticamente 99% dela já tenha sido renovada (MTR, 2023). Apesar do processo de renovação já ser esperado, políticas públicas voltadas ao incentivo para aquisição de veículos a hidrogênio podem ser necessárias para facilitar o acesso a essa nova tecnologia. A produção em maior escala é promissora para redução dos preços das células de combustível, em que se espera significativa diminuição no custo dos carros elétricos a hidrogênio (THOMPSON et al., 2018).

Uma oportunidade adicional que pode favorecer o aumento da renovabilidade do setor de transporte é a mudança de modal. Essa possibilidade pode ser complementar e incentivada, especialmente, para o transporte a longas distâncias ou trajetos com alto fluxo. Essa mudança de paradigma pode permitir que o consumo energético do setor de transportes possa ser reduzido, sobretudo, pela menor dependência do transporte rodoviário. Na Tabela 5.7 são apresentadas as eficiências energéticas para transporte por diferentes modais.

Tabela 5.7 – Consumo específico energético para diferentes modais de transporte

Modal	Veículos de carga MJ/km.t	Fonte
Rodoviário*	0,46	(CRAGLIA; CULLEN, 2019)
Ferroviário	0,24	(OU; XIAOYU; ZHANG, 2011)
Marítimo	0,14	(ALHASHIMI; AKTAS, 2017)
Aéreo	10,0	(SABATÉ; JEHI, 2019)

* Caminhões a diesel.

O que se espera é que o transporte rodoviário de cargas e de passageiros possa ser gradativamente substituído por outros modais mais eficientes com relação ao consumo de energia por tonelada transportada e, ou, número de passageiros a certa distância. Na Tabela 5.7 fica evidente que a mudança de modal pode permitir economia significativa de energia. Para o cenário de 2022, o potencial de produção de biometano e hidrogênio verde a partir dos resíduos orgânicos seria suficiente para atender a cerca de 78% da demanda de combustíveis fósseis do setor de transporte rodoviário.

Se até 2050 o modal rodoviário pudesse ser reduzido em cerca de 40%, em termos de transporte de carga e passageiros em veículos a diesel, e sendo essa nova demanda atendida pelo modal ferroviário, um novo horizonte de planejamento poderia ser alcançado. Para essa nova possibilidade seria possível suprir toda a demanda energética do setor de transporte rodoviário e do novo modal ferroviário com o equivalente ao potencial de produção de biocombustíveis a partir dos resíduos orgânicos apresentados na Figura 5.1. O que se evidencia é que a mudança de modal pode ser também uma significativa oportunidade para viabilizar a transição do combustível fóssil no setor de transporte brasileiro.

Para alcançar as oportunidades decorrentes da maior utilização do hidrogênio verde como energético, muitos desafios devem ser superados, especialmente com relação à segurança envolvendo técnicas de armazenamento e de transporte. Atualmente, o hidrogênio tem sido armazenado sob a forma gasosa em altas pressões ou em forma líquida, e esses processos podem ser limitadores do desenvolvimento do hidrogênio devido aos altos custos e limitações físicas de armazenamento. Novas tecnologias são promissoras para o armazenamento em estado sólido, por meio de hidretos complexos, hidretos químicos e ligas de magnésio (TARHAN; ÇIL, 2021), ou

seja, para utilização do hidrogênio em escala, tem-se uma série de desafios tecnológicos a serem vencidos.

Mudanças de paradigmas tecnológicos serão necessárias, especialmente para a regulamentação e segurança na utilização do hidrogênio verde e do biometano. As mudanças devem ser no sentido de viabilizar novas tecnologias e permitir o desenvolvimento, com segurança, da expansão de produção de biometano e hidrogênio verde. Políticas públicas são essenciais para viabilizar a produção desses combustíveis, especialmente a partir do biogás oriundo de resíduos. A justificativa para incentivos pode ser pautada nos extensos benefícios ambientais proporcionados pela utilização dos biocombustíveis. Incentivos aos produtores podem permitir o aumento do aproveitamento do potencial de produção de biogás, que em 2023 é inferior a 2%, o que é um desafio (ABIOGAS, 2023).

Mudanças na regulamentação para armazenamento de energia elétrica podem ocorrer em conjunto com o que se propõe para o setor de transporte. Com maior oferta do hidrogênio verde será possível o aproveitamento de excedentes do sistema elétrico para gerar hidrogênio por meio da eletrólise, podendo, em momentos de contingência do sistema elétrico, ocorrer a geração de energia elétrica com hidrogênio. Assim, o hidrogênio verde pode viabilizar o armazenamento de energia para suprimento em horários críticos do sistema elétrico (ROUSHENAS; ZAREI; TORABI, 2021). O que se conclui é que o aumento da segurança energética se torna uma oportunidade factível com a disseminação do hidrogênio verde. Aliado a isso, o maior aproveitamento do potencial de produção do biometano pode permitir ao Brasil a independência de importação de gás natural e, concomitantemente, proporcionar maior vida útil às suas reservas energéticas de gás natural.

Outros desdobramentos, como a integração do hidrogênio verde nas redes de gás natural, podem ser possíveis com a produção do hidrogênio em larga escala. Essa estratégia permite aproveitar os excedentes de hidrogênio e integrá-los ao sistema de gás natural, aumentando a segurança energética e a autossuficiência do país, aliado à redução das emissões de poluentes (WITKOWSKI et al., 2018). Essa integração promove a mistura de hidrogênio e metano, que vem sendo nomeada na literatura como Hythane. Essa mistura pode ser utilizada para atendimento à demanda residencial, geração de energia elétrica, cogeração e ao setor de transporte, em que

veículos movidos a gás natural também podem ser operados com Hythane, com vantagens significativas na redução de emissões (CINTI; BIDINI; HEMMES, 2019).

O que se espera é que o aumento do aproveitamento dos resíduos orgânicos para produção de biometano e, ou, hidrogênio verde possa permitir não apenas reduzir as emissões de poluentes pela substituição de combustíveis fósseis, mas também o tratamento ambiental. O processo de digestão anaeróbia permite, em geral, a diminuição dos impactos ambientais, podendo ser considerado como uma etapa de melhoria da qualidade ambiental e da água (HOLLAS et al., 2023). Isso quer dizer que a produção de biocombustíveis pode ser considerada uma externalidade positiva do tratamento ambiental. Melhor dizendo, uma política pública voltada para a produção de biometano e, ou, hidrogênio verde tem impactos não somente no setor energético, mas também no saneamento. Além do mais, as externalidades impactam diretamente a melhoria da saúde pública e a qualidade de vida da população (KAHN; LI, 2020).

5.6. Conclusão

O desenvolvimento de uma política pública que permita que o setor de transporte brasileiro possa se desenvolver, evoluindo para combustíveis renováveis e com maior eficiência energética, deve ser prioridade para o Brasil. O que se propôs foi uma avaliação das principais rotas de produção de biometano e hidrogênio verde a partir de resíduos orgânicos ou da eletrólise assistida com energias renováveis. As diferentes rotas podem permitir muitas oportunidades de segurança energética, haja vista que o biometano pode ser convertido em hidrogênio verde e este em energia elétrica e vice-versa.

Graças às oportunidades de tratamento ambiental ocasionadas pela produção do biometano e do hidrogênio verde, especialmente quando oriundos de resíduos orgânicos, determinou-se, por meio de dados da literatura, o potencial brasileiro de produção desses gases. Com isso, percebe-se que o potencial de produção com os resíduos disponíveis em 2022 é suficiente para substituição de toda a demanda de gás natural do país ou para suprir cerca de 78% da energia do setor de transporte rodoviário nacional, nesse mesmo período. Esse enorme potencial reforça a importância do investimento no aproveitamento dos resíduos para produção de biocombustíveis.

Apesar das oportunidades aqui descritas, o aproveitamento de resíduos orgânicos para produção de biometano e, ou, hidrogênio verde apresenta limitações, seja pela disposição geográfica, seja pela viabilidade econômica para investimento em usinas geradoras de gás. Essa limitação se soma aos altos custos atuais de veículos elétricos com células de combustível a hidrogênio. Além do mais, estimativas mais precisas de crescimento do setor de transporte podem ser necessárias para a implementação do que se propõe nesta pesquisa e devem contar com mais dados, como de perspectiva de crescimento econômico e de tendências de utilização do mix energético. Apesar das limitações, evidenciou-se que tornar o setor de transportes do Brasil independente da importação de combustíveis fósseis e livre de emissões de gases causadores do efeito estufa é um desafio que pode ser alcançado por meio dos biocombustíveis.

5.7. Referências

ABDEREZZAK, B.; BUSAWON, K.; BINNS, R. Flows consumption assessment study for fuel cell vehicles: towards a popularization of FCVS technology. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 17, p. 12905-12911, abr. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.152>.

ABIOGAS. **Plano nacional do biogás**. 2023. ABiogás. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf. Acesso em: 08 jul. 2023.

AKHLAGHI, N.; NAJAFPOUR-DARZI, G. A comprehensive review on biological hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 43, p. 22492-22512, set. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.182>.

ALHASHIMI, H. A.; AKTAS, C. B. Life cycle environmental and economic performance of biochar compared with activated carbon: a meta-analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 118, p. 13-26, mar. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.016>.

ANTONINI, C.; TREYER, K.; STREB, A.; SPEK, M. V. D.; BAUER, C.; MAZZOTTI, M. Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage – A techno-environmental analysis. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 4, n. 6, p. 2967-2986, 2020. <http://dx.doi.org/10.1039/d0se00222d>.

ATILHAN, S.; PARK, S.; EL-HALWAGI, M. M.; ATILHAN, M.; MOORE, M.; NIELSEN, R. B. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 31, p. 100668, mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2020.100668>.

BORGES, C. P.; SOBCZAK, J. C.; SILBERG, T. R.; URIONA-MALDONADO, M.; VAZ, C. R. A systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110518, mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110518>.

BRICS. 2022. **joint Statement issued at the BRICS High-level Meeting on Climate Change**. Disponível em: http://brics2022.mfa.gov.cn/eng/hywj/ODMM/202205/t20220529_10694182.html. Acesso em: 08 jul. 2023.

CAMPELLO, L. D.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SANTOS, I. F. S. Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 2, p. 2614-2629, 31 mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-020-00689-y>.

CANADIANSOLAR. Painel Solar 350W Half-Cell Canadian Solar – CS3U-350P. Disponível em: <https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2023/03/15154744/Canadian-Solar-TOPCon-Module-Technical-White-Paper.v5.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023

CARDOSO, V.; ROMAO, B. B.; SILVA, F. T. M.; SANTOS, J. G.; BATISTA, F. R. X.; FERREIRA, J. S. Hydrogen production by dark fermentation. **Chemical Engineering Transactions**, v. 38, p. 481-486, 2014. <http://dx.doi.org/10.3303/CET1438081>.

CÉSAR, A. S.; CONEJERO, M. A.; RIBEIRO, E. C. B.; BATALHA, M. O. Competitiveness analysis of “social soybeans” in biodiesel production in Brazil. **Renewable Energy**, v. 133, p. 1147-1157, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.108>.

CHEN, L.; QI, Z.; ZHANG, S.; SU, J.; SOMORJAI, G. A. Catalytic Hydrogen Production from Methane: a review on recent progress and prospect. **Catalysts**, v. 10, n. 8, p. 858, 2 ago. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/catal10080858>.

CHENG, D.; NGO, H. H.; GUO, W.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; BUI, X. T.; WEI, W.; NI, B.; VARJANI, S.; HOANG, N. B. Enhanced photo-fermentative biohydrogen production from biowastes: an overview. **Bioresource Technology**, v. 357, p. 127341, ago. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127341>.

CHIEN, F.; KAMRAN, H. W.; ALBASHAR, G.; IQBAL, W. Dynamic planning, conversion, and management strategy of different renewable energy sources: a sustainable solution for severe energy crises in emerging economies. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 11, p. 7745-7758, fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.004>.

CIECIURA-WŁOCH, W.; BOROWSKI, S.; OTLEWSKA, A. Biohydrogen production from fruit and vegetable waste, sugar beet pulp and corn silage via dark fermentation. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1226-1237, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.085>.

CIGNINI, F.; GENOVESE, A.; ORTENZI, F.; VALENTINI, S.; CAPRIOLI, A. Performance and Emissions Comparison between Biomethane and Natural Gas Fuel

in Passenger Vehicles. **E3S Web of Conferences**, v. 197, p. 08019, 2020. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202019708019>.

CINTI, G.; BIDINI, G.; HEMMES, K. Comparison of the solid oxide fuel cell system for micro CHP using natural gas with a system using a mixture of natural gas and hydrogen. **Applied Energy**, v. 238, p. 69-77, mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.039>.

CRAGLIA, M.; CULLEN, J. Do technical improvements lead to real efficiency gains? Disaggregating changes in transport energy intensity. **Energy Policy**, v. 134, p. 110991, nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110991>.

CUNANAN, C.; TRAN, M.; LEE, Y.; KWOK, S.; LEUNG, V.; FOWLER, M. A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: diesel engine vehicles, battery electric vehicles, and hydrogen fuel cell electric vehicles. **Clean Technologies**, v. 3, n. 2, p. 474-489, 1 jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/cleantech3020028>.

FAVARO, L.; ALIBARDI, L.; LAVAGNOLO, M. C.; CASELLA, S.; BASAGLIA, M. Effects of inoculum and indigenous microflora on hydrogen production from the organic fraction of municipal solid waste. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 27, p. 11774-11779, set. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.06.137>.

GAUTAM, R.; NAYAK, J. K.; RESS, N. V.; STEINBERGER-WILCKENS, R.; GHOSH, U. K. Bio-hydrogen production through microbial electrolysis cell: structural components and influencing factors. **Chemical Engineering Journal**, v. 455, p. 140535, jan. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2022.140535>.

GONDAL, I. A.; MASOOD, S. A.; KHAN, R. Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 12, p. 6011-6039, mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.113>.

GORGEK, F. K.; KARAPINAR, I. Biohydrogen production from hydrolyzed waste wheat by dark fermentation in a continuously operated packed bed reactor: the effect of hydraulic retention time. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 1, p. 136-143, jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.155>.

GUO, X. M.; TRABLY, E.; LATRILLE, E.; CARRÈRE, H.; STEYER, J. Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: a review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 19, p. 10660-10673, out. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.008>.

HANDWERKER, M.; WELLNITZ, J.; MARZBANI, H. Comparison of Hydrogen Powertrains with the Battery Powered Electric Vehicle and Investigation of Small-Scale Local Hydrogen Production Using Renewable Energy. **Hydrogen**, v. 2, n. 1, p. 76-100, 25 jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/hydrogen2010005>.

HENTZ, C.; HESPANHOL, R. A. M. A agroindústria de carnes de aves e suínos e a dinâmica do consumo produtivo em Chapecó/SC. **Caminhos de Geografia**, v. 24, n. 92, p. 403-423, 4 abr. 2023. <http://dx.doi.org/10.14393/rcg249263668>.

HOLLAS, C.; RODRIGUES, H. C.; BOLSAN, A. C.; VENTURIN, B.; BORTOLI, M.; ANTES, F. G.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. Swine manure treatment technologies as drivers for circular economy in agribusiness: a techno-economic and life cycle assessment approach. **Science of the Total Environment**, v. 857, p. 159494, jan. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159494>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agropecuária**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 08 jul. 2023.

JIANG, L.; XUE, D.; WEI, Z.; CHEN, Z.; MIRZAYEV, M.; CHEN, Y.; CHEN, S. Coal decarbonization: a state-of-the-art review of enhanced hydrogen production in underground coal gasification. **Energy Reviews**, v. 1, n. 1, p. 100004, set. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enrev.2022.100004>.

JUAN, R.; KELLY, R.; PABLO, V.; PAOLA, A.; ANGELICA, S. Evaluation of Bio-hydrogen Production by Dark Fermentation from Cocoa Waste Mucilage. **Chemical Engineering Transactions**, v. 79, p. 283-288, abr. 2020. <http://dx.doi.org/10.3303/CET2079048>.

KAHN, M.; LI, P. Air pollution lowers high skill public sector worker productivity in China. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 8, p. 084003, 15 jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab8b8c>.

KHAN, I. Waste to biogas through anaerobic digestion: hydrogen production potential in the developing world - a case of bangladesh. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 32, p. 15951-15962, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.038>.

KHAN, M. I.; AL-GHAMDI, S. G. Hydrogen economy for sustainable development in GCC countries: a swot analysis considering current situation, challenges, and prospects. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 28, p. 10315-10344, abr. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.033>.

KHAN, M. U.; LEE, J. T. E.; BASHIR, M. A.; DISSANAYAKE, P. D.; OK, Y. S.; TONG, Y. W.; SHARIATI, M. A.; WU, S.; AHRING, B. K. Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111343, out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>.

KORBERG, A. D.; SKOV, I. R.; MATHIESEN, B. V. The role of biogas and biogas-derived fuels in a 100% renewable energy system in Denmark. **Energy**, v. 199, p. 117426, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.117426>.

KUMAR, S. S.; LIM, H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. **Energy Reports**, v. 8, p. 13793-13813, nov. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127>.

LI, C.; BAEK, J. The promise of hydrogen production from alkaline anion exchange membrane electrolyzers. **Nano Energy**, v. 87, p. 106162, set. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106162>.

LI, G.; CUI, P.; WANG, Y.; LIU, Z.; ZHU, Z.; YANG, S. Life cycle energy consumption and GHG emissions of biomass-to-hydrogen process in comparison with coal-to-hydrogen process. **Energy**, v. 191, p. 116588, jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.116588>.

LICKERT, T.; KIERMAIER, M. L.; BROMBERGER, K.; GHINAIYA, J.; METZ, S.; FALLISCH, A.; SMOLINKA, T. On the influence of the anodic porous transport layer on PEM electrolysis performance at high current densities. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 11, p. 6047-6058, fev. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.204>.

LO FARO, M.; CANTANE, D. A.; NARO, F. In the path for creating Research-to-business new opportunities on green hydrogen between Italy and Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 32, p. 11876-11884, abr. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.089>.

MADHUSUDHANAN, A. K.; NA, X.; BOIES, A.; CEBON, D. Modelling and evaluation of a biomethane truck for transport performance and cost. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 87, p. 102530, out. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2020.102530>.

MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; PEREIRA, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. **Energy Policy**, v. 48, p. 640-649, set. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.082>.

MASILELA, P.; PRADHAN, A. A life cycle sustainability assessment of biomethane versus biohydrogen – For application in electricity or vehicle fuel? Case studies for African context. **Journal of Cleaner Production**, v. 328, p. 129567, dez. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129567>.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MME. Ministério de Minas e Energia. Demanda de energia dos veículos leves: 2023-2032. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-656/NT-EPE-DPG-SDB-2022-09_Demanda_Ve%C3%ADculos_Leves_2023-2032.pdf. Acesso em: 10 ago. 2023.

MTR. Ministério dos Transportes. **Estatísticas - Frota de Veículos**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran>. Acesso em: 02 set. 2023.

NICITA, A.; MAGGIO, G.; ANDALORO, A. P. F.; SQUADRITO, G. Green hydrogen as feedstock: financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 20, p. 11395-11408, abr. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.062>.

NOOIJER, N.; GALLUCCI, F.; PELLIZZARI, E.; MELENDEZ, J.; TANAKA, D. A. P.; MANZOLINI, G.; ANNALAND, M. V. S. On concentration polarisation in a fluidized bed membrane reactor for biogas steam reforming: modelling and experimental validation. **Chemical Engineering Journal**, v. 348, p. 232-243, set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.205>.

PÄÄKKÖNEN; ARO; AALTO; KONTTINEN; KOJO. The Potential of Biomethane in Replacing Fossil Fuels in Heavy Transport—A Case Study on Finland. **Sustainability**, v. 11, n. 17, p. 4750, 30 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/su11174750>.

PARK, M.; KIM, J.; LEE, Y.; KIM, H.; JEONG, D. System optimization for effective hydrogen production via anaerobic digestion and biogas steam reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 55, p. 30188-30200, nov. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.027>.

PARK, S.; RAJESH, P. P.; SIM, Y. JADHAV, D. A.; NOORI, M. T.; KIM, D.; AL-QARADAWI, S. Y.; YANG, E.; JANG, J.; CHAE, K. Addressing scale-up challenges and enhancement in performance of hydrogen-producing microbial electrolysis cell through electrode modifications. **Energy Reports**, v. 8, p. 2726-2746, nov. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.198>.

PHANDUANG, O.; LUNPROM, S.; SALAKKAM, A.; LIAO, Q.; REUNGSANG, A. Improvement in energy recovery from *Chlorella* sp. biomass by integrated dark-photo biohydrogen production and dark fermentation-anaerobic digestion processes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 43, p. 23899-23911, set. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.103>.

ROUSHENAS, R.; ZAREI, E.; TORABI, M. A novel trigeneration system based on solid oxide fuel cell-gas turbine integrated with compressed air and thermal energy storage concepts: energy, exergy, and life cycle approaches. **Sustainable Cities and Society**, v. 66, p. 102667, mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2020.102667>.

RUFFINO, B.; CERUTTI, A.; CAMPO, G.; SCIBILIA, G.; LORENZI, E.; ZANETTI, M. Improvement of energy recovery from the digestion of waste activated sludge (WAS) through intermediate treatments: the effect of the hydraulic retention time (hrt) of the first-stage digestion. **Applied Energy**, v. 240, p. 191-204, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.061>.

SABATÉ, J.; JEHI, T. Determinants of sustainable diets. **Environmental Nutrition**, p. 181-196, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-811660-9.00012-6>.

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; NÓBREGA, L. G. B.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54-63, abr. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>.

SCARLAT, N.; FAHL, F.; DALLEMAND, J.; MONFORTI, F.; MOTOLA, V. A spatial analysis of biogas potential from manure in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 915-930, out. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.035>.

SHI, Z.; ZHANG, L.; YUAN, H.; LI, X.; CHANG, Y.; ZUO, X. Oyster shells improve anaerobic dark fermentation performances of food waste: hydrogen production, acidification performances, and microbial community characteristics. **Bioresource Technology**, v. 335, p. 125268, set. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125268>.

SINIGAGLIA, T.; FREITAG, T. E.; MACHADO, A.; PEDROZO, V. B.; ROVAI, F. F.; GUILHERME, R. T. G.; LANZANOVA, T. D. M.; NORA, M. D.; MARTINS, M. E. S. Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 24, p. 12074-12095, mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.234>.

SONG, H.; YANG, G.; XUE, P.; LI, Y.; ZOU, J.; WANG, S.; YANG, H.; CHEN, H. Recent development of biomass gasification for H₂ rich gas production. **Applications in Energy and Combustion Science**, v. 10, p. 100059, jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100059>.

STOLF, R.; OLIVEIRA, A. P. R. THE SUCCESS OF THE BRAZILIAN ALCOHOL PROGRAM (PROÁLCOOL) - A DECADE-BY-DECADE BRIEF HISTORY OF ETHANOL IN BRAZIL. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 243-248, abr. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p243-248/2020>.

SUN, L.; JIN, Y.; SHEN, J.; YOU, F. Sustainable Residential Micro-Cogeneration System Based on a Fuel Cell Using Dynamic Programming-Based Economic Day-Ahead Scheduling. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 8, p. 3258-3266, 2 fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08725>.

TARHAN, C.; ÇIL, M. A. A study on hydrogen, the clean energy of the future: hydrogen storage methods. **Journal of Energy Storage**, v. 40, p. 102676, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2021.102676>.

THOMPSON, S. T.; JAMES, B. D.; HUYA-KOUADIO, J. M.; HOUCHINS, C.; DESANTIS, D. A.; AHLUWALIA, R.; WILSON, A. R.; KLEEN, G.; PAPAGEORGIOPOULOS, D. Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: system and high-volume manufacturing description, validation, and outlook. **Journal of Power Sources**, v. 399, p. 304-313, set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.100>.

VALE, P.; GIBBS, H.; VALE, R.; CHRISTIE, M.; FLORENCE, E.; MUNGER, J.; SABAINI, D. The Expansion of Intensive Beef Farming to the Brazilian Amazon. **Global Environmental Change**, v. 57, p. 101922, jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.006>.

WANG, C.; ZHU, M.; CAO, Z.; ZHU, P.; CAO, Y.; XU, X.; XU, C.; YIN, Z. Heterogeneous bimetallic sulfides-based seawater electrolysis towards stable industrial-level large current density. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 291, p. 120071, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120071>.

WILBERFORCE, T.; ALASWAD, A.; PALUMBO, A.; DASSISTI, M.; OLABI, A. G. Advances in stationary and portable fuel cell applications. **International Journal of**

Hydrogen Energy, v. 41, n. 37, p. 16509-16522, out. 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.057>.

WITKOWSKI, A.; RUSIN, A.; MAJKUT, M.; STOLECKA, K. Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 166, p. 24-34, set. 2018.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.08.002>.

OU, X.; XIAOYU, Y.; ZHANG, X. Life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions for electricity generation and supply in China. **Applied Energy**, v. 88, n. 1, p. 289-297, jan. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.010>.

YUE, M.; LAMBERT, H.; PAHON, E.; ROCHE, R.; JEMEI, S.; HISSEL, D. Hydrogen energy systems: a critical review of technologies, applications, trends and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 146, p. 111180, ago. 2021.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>.

ZHIZNIN, S. Z.; TIMOKHOV, V. M.; GUSEV, A. L. Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 56, p. 31353-31366, nov. 2020.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>.

6. CONCLUSÃO GERAL

Externalidades do biogás

A avaliação das externalidades pode ser importante meio para aumentar o rigor da análise da produção de biogás oriundo da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos no Brasil. Vale destacar a relevância dessa avaliação como um primeiro passo para a internalização das externalidades em análises econômicas e para a consequente melhoria da avaliação da viabilidade econômica. Por conta do balanço das externalidades, espera-se que a avaliação delas possa contribuir positivamente com relação a um maior rigor da viabilidade econômica de novos projetos de produção de biogás.

O entendimento e avaliação econômica das externalidades, contribui fortemente com a sociedade. Os benefícios traduzidos como externalidades positivas da produção de biogás, como demonstrado nesta pesquisa, estão além do valor do próprio biogás. Tem-se em vista que, as externalidades podem ser benefícios sociais, tão logo subsídios à produção desse energético podem ser implementados. Um maior entendimento dessas externalidades pode ser fundamental no planejamento energético, pois o Brasil possui o maior potencial mundial de produção de biogás de resíduos em razão da sua grande produção agropecuária e de resíduos frutos do saneamento.

Comparação de externalidades do biogás e sistemas fotovoltaicos

Foi analisada uma série de externalidades decorrentes da geração distribuída de energia elétrica, por meio da produção e queima do biogás de resíduos orgânicos e por sistemas solar fotovoltaico, FV. Como demonstrado nesta pesquisa, o valor das externalidades avaliadas quantitativamente superou o valor econômico do biogás. A externalidade com maior valor econômico sob a perspectiva do prosumidor foi a externalidade biofertilizantes para o biogás e emissões evitadas para sistemas FV. Além de as externalidades impactarem diretamente o próprio prosumidor, os benefícios para a concessionária de energia e sociedade também são importantes. Para a sociedade, a externalidade com maior valor econômico foi emissões evitadas para o biogás e emprego e renda para sistemas FV.

Para o conjunto de externalidades estudadas, as do biogás possuem maior valor econômico do que as de sistemas FV, tanto para a sociedade quanto para o prosumidor. Além do mais, a avaliação das externalidades permitiu uma comparação mais justa entre as fontes renováveis de energia elétrica, estudadas, assim, podendo auxiliar na viabilização de políticas públicas de incentivo adequadas para as fontes que apresentam maiores benefícios para a sociedade. A discrepância de valores entre as externalidades avaliadas quantitativamente e a importância das externalidades avaliadas qualitativamente reforça a necessidade de promover a produção de biogás no Brasil.

Ainda nesta comparação entre as duas fontes renováveis de energia, i.e. biogás e sistemas FV, vale ressaltar que o biogás de resíduos orgânicos é fruto de diminuição de impactos ambientais e os sistemas FV na sua fase de geração de energia basicamente não polui. Assim o biogás possui uma vantagem intrínseca sobre os sistemas FV.

Demonstrou-se, qualitativamente, que as concessionárias de energia elétrica têm muitas oportunidades com a geração distribuída, seja por meio do biogás ou de FV. Dessa forma, os agentes reguladores e a sociedade precisam rever o atual modelo de negócio de fornecimento de energia praticado pelas concessionárias. As empresas do setor devem se adequar à oportunidade de controle do fluxo de potência, confiabilidade, manutenção, distribuição e transmissão de energia, haja vista que os consumidores se tornam prosumidores em uma tendência crescente e contribuindo para uma maior sustentabilidade.

A contrapartida para a sociedade por financiar um plano nacional de incentivo com políticas que estimulem o aumento da produção de biogás pode estar fortemente justificada pela consideração de externalidades. A internalização com a destinação de parte do seu valor econômico pode ser uma oportunidade para proposição de novas políticas energéticas. Os programas de incentivo regulamentados pelo governo devem ser revistos individualmente para cada fonte de geração renovável, destacando-se o elevado valor econômico e as particularidades das externalidades que reforçam a importância da consideração delas no planejamento energético.

O governo brasileiro precisa intervir como forma de viabilizar a desregulamentação rígida e antiga do sistema energético, visando ampliar ainda mais a inserção da geração de energia elétrica distribuída. A inclusão da possibilidade de

negociação entre concessionária e prossumidores pode permitir priorizar investimentos em fontes renováveis de energia mais vantajosas. Nesse sentido, as fontes renováveis de geração de energia elétrica mais benéficas podem ter maiores incentivos. Para isso, a consideração direta das externalidades juntamente com a atividade em si é uma métrica favorável para permitir melhorar a comparação de fontes de geração e incentivar o desenvolvimento das mais benéficas à sociedade.

Simulação da automação de biodigestores modelo lagoa coberta

Além das oportunidades das externalidades, métodos que busquem otimizar a produção de biogás podem ser opções para permitir de fato que o Brasil possa se tornar destaque internacional no setor. Os resultados desta pesquisa evidenciaram que o aquecimento com revolvimento do modelo estudado de biodigestor, i.e., modelo lagoa coberta, promove maior produção de biogás. Para as simulações de aquecimento do biodigestor, quando foi elevada a temperatura média em +12 °C, da biomassa em biodigestão, que foram as condições do caso base, chegou-se à temperatura ótima de operação de 35,58 °C. Esse valor foi obtido, em termos de maior produção de energias térmica e elétrica, pela cogeração.

Nas simulações realizadas a partir do cenário base, que se tratou de um biodigestor situado em Teixeira, Minas Gerais, Brasil, na latitude 20° 34' 07,2" S, longitude 42° 52' 01,6" O e 678 m de altitude, observou-se que a produção de biogás pode ser aumentada em cerca de 12%. Os resultados deste estudo de caso podem ser mais promissores para situações em que o biodigestor esteja em uma região de clima mais frio do que o do local do caso-base. Dessa forma, a viabilidade econômica do sistema de cogeração para aquecimento do biodigestor e do afluente pode ser significativamente aumentada.

Para os casos em que a temperatura média de operação do biodigestor for significativamente inferior à do caso-base simulado nesta pesquisa, estudos devem ser feitos para determinar o efeito do aquecimento na produção de biogás. Para climas mais frios, pode ser necessária, além das estratégias aqui simuladas envolvendo o aproveitamento de calor e o uso do calor da cogeração, a utilização da energia térmica solar ou de outras fontes extras, como a biomassa de lenha ou parte do biogás.

Hidrogênio verde e biometano de biogás

Em complemento à avaliação das externalidades e da implementação de técnicas que possam permitir maximizar a produção de biogás, avaliou-se o potencial brasileiro de produção e utilização do biometano e, ou, do hidrogênio verde oriundos do biogás de resíduos orgânicos. O que se espera é que os apontamentos desta pesquisa possam contribuir para o planejamento energético brasileiro, em especial o setor de transportes do Brasil que possui maior consumo de energia primária do país. Que contribuam também com a alta demanda energética, que gera custos significativos para outros setores, que dependem visceralmente do transporte, como o agropecuário.

Assim, o desenvolvimento de uma política pública que permita que o setor de transporte possa se desenvolver, evoluindo para combustíveis renováveis e com maior eficiência energética, deve ser prioridade para o Brasil. O que se propôs foi uma avaliação das principais rotas de produção de biometano e de hidrogênio verde a partir de resíduos orgânicos ou da eletrólise assistida com energias renováveis. As diferentes rotas podem permitir muitas oportunidades em termos de segurança energética, haja vista que o biometano pode ser convertido em hidrogênio verde, este em energia elétrica ou vice-versa.

Devido às oportunidades de tratamento ambiental ocasionadas pela produção do biometano e do hidrogênio verde, especialmente quando oriundos de resíduos orgânicos, determinou-se, por meio de dados da literatura, o potencial brasileiro de produção desses gases. Com isso, observou-se que o potencial de produção com os resíduos disponíveis em 2022 foi suficiente para a substituição de toda a demanda de gás natural do país ou para suprir em cerca de 78% da demanda de gás natural, do diesel e da gasolina do setor de transporte rodoviário brasileiro, no mesmo período. Cabe destacar que a mudança de modal pode permitir que o potencial de produção de biogás brasileiro seja, teoricamente, suficiente para atender toda demanda energética do setor de transporte. Isso pois o modal rodoviário possui a maior demanda específica de energia do que os outros como ferroviário e hidroviário. Esse enorme potencial reforça a importância do investimento no aproveitamento dos resíduos para a produção de biocombustíveis.

6.1. Sugestões para estudos futuros

Os resultados desta pesquisa podem fomentar a proposição de políticas de desenvolvimento de produção de biogás e o embasamento para o plano nacional do biogás. Apesar dos resultados alcançados, sugere-se que em estudos futuros um maior número possível de externalidades do biogás seja avaliado de forma quantitativa. Além do mais, outras fontes de geração de energia renovável devem ter suas externalidades avaliadas, sempre que possível também de forma quantitativa, para possibilitar uma maior abrangência do planejamento energético. Estudos de externalidades pontuais ou regionais podem ser realizados a partir da metodologia proposta, bem como permitir aprofundar a avaliação econômica e implicações no planejamento energético.

Incluir uma avaliação do ciclo de vida pode permitir uma comparação, especialmente em relação a impactos ambientais, entre diferentes fontes de geração de energia. Nesse sentido, o planejamento energético brasileiro pode vir a ter um salto de qualidade se os estudos futuros incluírem avaliação de ciclo de vida e avaliação de externalidades das fontes renováveis e não renováveis da matriz energética brasileira.

Na área de biodigestores com sistemas de automação e controle, sugere-se que simulações sejam replicadas para outros modelos de biodigestores, e em outras regiões, em especial de clima o mais diferente possível da região já avaliada. Ademais, a construção de protótipos em escala para a constatação de resultados simulados pode permitir, com maior precisão, validar os resultados. Por último, a implementação dos sistemas propostos de aquecimento com revolvimento em um biodigestor em escala plena pode permitir verificar os resultados e desenvolver sistemas comerciais que possam permitir aumentar a produção de biogás.

Com relação ao potencial brasileiro de produção de biometano e, ou, de hidrogênio verde a partir de resíduos orgânicos, sugere-se o estudo das implicações da disposição geográfica e da viabilidade econômica de usinas geradoras de gás. Em paralelo, estudos envolvendo avaliação da produção vegetal para produção de biogás de forma exclusiva, e, ou, para fins alimentícios podem permitir também expandir a produção de biocombustíveis no país minimizando impactos relacionados à prioridade do uso do solo. Estudos da evolução da viabilidade econômica de veículos elétricos com células de combustível a hidrogênio também podem contribuir para o planejamento energético. Além do mais, estimativas mais precisas de crescimento do

setor de transporte e de tendências de utilização do mix energético são necessárias para a implementação do que se propôs nesta tese.

6.2. Limitações desta tese

As limitações da tese se referem a pontos que podem ser aprimorados em trabalhos futuros. Podem ser vistos também como as delimitações das “condições de contorno” dos temas abordados na tese, especialmente nos quatro capítulos científicos, quais sejam capítulos de 2 a 5. O maior desenvolvimento do estudo do biogás no Brasil pode permitir aprofundar os resultados alcançados nesta pesquisa e, conseqüentemente, superar as limitações apontadas. Os tópicos a seguir elencam essas limitações:

- A avaliação econômica das externalidades alcançadas nesta pesquisa pode depender de especificidades locais ou regionais, ou seja, estudos pontuais devem ser realizados visando determinar, com maior precisão, o valor econômico das externalidades.
- A avaliação das externalidades ainda é um campo aberto para estudos. Pesquisas complementares podem permitir identificar novas externalidades, em especial de fontes renováveis de energia.
- A metodologia de quantificação econômica das externalidades pode ser aprimorada, permitindo quantificar aquelas avaliadas de forma apenas qualitativa nesta pesquisa. Pela limitação atual, especialmente dos dados disponíveis no Brasil, existem restrições acerca das análises quantitativas que podem ser realizadas.
- As simulações de sistemas de aquecimento com revolvimento aplicadas a biodigestores apresentam limitações relacionadas ao software, especialmente pela impossibilidade de avaliação de gradiente da temperatura interna do biodigestor. Além do mais, a avaliação em específico do efeito do revolvimento na produção de biogás não pôde ser realizada devido à limitação do modelo de produção de biogás utilizado nas análises.

- A validação das simulações foi efetuada apenas para o cenário-base, haja vista a inexistência de um sistema em escala plena de aquecimento com revolvimento do biodigestor que permitisse a validação das diferentes situações simuladas.
- A estimativa do potencial de produção de biometano e hidrogênio verde a partir de resíduos orgânicos e efluentes da produção pecuária, de vegetal e do saneamento urbano apresenta simplificações por falta de acesso a dados, principalmente de localização espacial e composição orgânica dos resíduos no Brasil.
- Estimativas mais precisas de crescimento do setor de transporte podem ser necessárias para a implementação do que se propõe nesta pesquisa e devem contar com mais dados, como de perspectiva de crescimento econômico, tendência de crescimento de novas tecnologias e a consideração de modais de transporte mais eficientes.