

SAMUEL CHAVES DA SILVA

**PROGRAMA NACIONAL E POTENCIAL BRASILEIRO DE PRODUÇÃO
EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE BIOGÁS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586p
2017
Silva, Samuel Chaves da, 1990-
Programa nacional e potencial brasileiro de produção em
sistemas automatizados de biogás / Samuel Chaves da Silva. –
Viçosa, MG, 2017.
xii, 80f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Delly Oliveira Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Biogás. 3. Política
energética. 4. Biodigestor - Automação. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 665.776

SAMUEL CHAVES DA SILVA

**PROGRAMA NACIONAL E POTENCIAL BRASILEIRO DE PRODUÇÃO
EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE BIOGÁS**

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

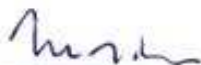
APROVADA: 31 de julho de 2017.



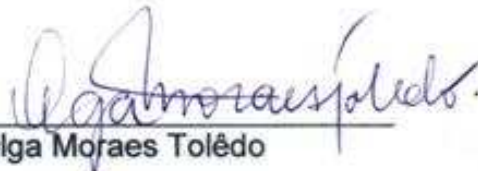
Heverton Augusto Pereira



Joyce Correna Carlo



Paulo Marcos de Barros Monteiro



Olga Moraes Tolêdo



Dely Oliveira Filho
(Orientador)

À sociedade brasileira, que me forneceu as condições necessárias para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela família que tenho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, por proporcionar um admirável ambiente de trabalho.

À CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

Ao orientador Professor Delly Oliveira Filho, pela oportunidade de pesquisa, orientações e debates valiosos para acréscimo de experiências.

Aos colegas e amigos feitos em Viçosa, pela companhia, parceria e agradável convivência.

BIOGRAFIA

Samuel Chaves da Silva nasceu na cidade de Pará de Minas - MG, filho de Zeni da Conceição Morais Chaves e Matias Pinto Chaves da Silva.

Realizou o ensino fundamental na Escola Municipal Miguel Rodrigues Duarte, em Juatuba – MG, cidade localizada a 50 km de Belo Horizonte. O ensino médio foi realizado na Universidade Federal de Viçosa – Campus Florestal, antiga CEDAF (Central de Ensino e Desenvolvimento Agrário de Florestal), e ingressou no curso de graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Viçosa (UFV) no ano de 2009.

No intervalo de agosto de 2012 a agosto de 2013 fez intercâmbio na *École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique*, na cidade de Nancy – França, pelo Ciência sem Fronteiras/CNPq, retornando posteriormente para a UFRJ.

Colou grau em julho de 2015 e em agosto de 2015 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de mestrado, pelo Departamento de Engenharia Agrícola, no setor de Energia, submetendo-se à defesa da dissertação em 31 de julho de 2017.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
Capítulo 1: Considerações iniciais	1
1.1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. LIMITAÇÕES DA PRESENTE PESQUISA	2
1.4. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	3
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
Capítulo 2: A criação de um programa nacional de incentivo à produção e uso de biogás no Brasil	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. OBJETIVOS	8
2.2.1. Objetivo geral.....	8
2.2.2. Objetivos específicos	8
2.3. METODOLOGIA.....	9
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
2.4.1. Experiências do Pró-Álcool e do PNPB para a criação e implantação eficiente de um programa brasileiro de incentivos à produção e uso do biogás no Brasil 10	
2.4.2. Análise comparativa de países com políticas de incentivo governamental ao uso e produção do biogás	15
Biogás na Ásia e na África	15
Biogás na Alemanha.....	16
Biogás na Dinamarca.....	19
2.4.3. Situação atual e histórico do uso e produção de biogás no Brasil	21
2.4.4. Legislação vigente de incentivo ao uso de fontes renováveis de energia no Brasil e sua relação com o biogás	23
2.4.5. Benefícios econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos da criação de uma política de incentivo ao uso e produção do biogás no Brasil.....	31
2.4.6. Desafios políticos e tecnológicos da implantação de um Programa Nacional de Produção e Uso do Biogás no Brasil.....	33
2.4.7. Inserção do biogás na matriz energética brasileira	36

2.4.8. O biogás como fonte energética passível de reduzir a demanda de ponta da concessionária	39
2.5. CONCLUSÕES	43
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
Capítulo 3: Potencial Brasileiro de Produção de Biogás em Sistemas Automatizados	53
3.1. INTRODUÇÃO	53
3.2. OBJETIVOS	59
3.2.1. Objetivo geral	59
3.2.2. Objetivos específicos	59
3.3. METODOLOGIA	60
3.3.1. Cálculo do potencial de produção de biogás da atividade suinícola brasileira e demais fontes obtidas na literatura	60
3.3.2. Produção de biogás no condomínio de agroenergia Ajuricaba, no Brasil	62
3.3.3. Produção de biogás em plantas de biodigestão controladas, na Dinamarca	63
3.3.4. Cálculo do potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas automatizados	64
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
3.4.1. Potencial de produção de biogás da atividade suinícola brasileira	65
3.4.2. Comparação da produtividade de biogás sem e com controles a partir dos dados práticos reais das plantas brasileiras e dinamarquesas	65
3.4.3. Potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas controlados	65
3.4.4. Análise econômica das plantas de geração de energia elétrica a partir do biogás	67
3.4.5. Cultivo de vegetais com fins exclusivamente energéticos	70
3.4.6. Limitações da metodologia de cálculo do potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas automatizados	71
3.5. CONCLUSÕES	72
3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
Capítulo 4: Conclusão geral e recomendações de trabalhos futuros	79
4.1. CONCLUSÃO GERAL	79
4.2. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Capacidade e produção mensal de biodiesel por região em 2014	14
Quadro 2.2 - Capacidade de geração elétrica instalada prevista pelo Proinfa por fonte energética	23
Quadro 2.3 - Legislação de incentivos às fontes renováveis de energia no Brasil	28
Quadro 3.1 - Potencial anual de produção de biogás por resíduo orgânico	61
Quadro 3.2 - Produção de biogás a partir de dejetos animais em biodigestores controlados na Dinamarca	63
Quadro 3.3 - Potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas não automatizados e automatizados	66
Quadro 3.4 - Indicadores econômicos	68
Quadro 3.5 - Fluxo de caixa da planta não automatizada.....	69
Quadro 3.6 - Fluxo de caixa da planta automatizada.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Produção anual brasileira de biodiesel, em milhões de bep.....	11
Figura 2.2 - Produção anual brasileira de etanol, em milhões de bep.	12
Figura 2.3 - Número de plantas de produção de biogás por país europeu.	17
Figura 2.4 - Número de plantas de biogás e da potência elétrica total de geração instalada (em MW) na Alemanha.....	18
Figura 2.5 - Custo total de plantas de biogás de cogeração de energia por capacidade elétrica instalada de geração na Europa.	20
Figura 2.6 - Evolução da geração eólica no Brasil.....	24
Figura 2.7 - Conexões por tipo de fonte até 23/05/2017 por meio da RN 482. .	26
Figura 2.8 - Potência instalada até 23/05/2017 pela RN 482, em MW.	26
Figura 2.9 - Mitigação da emissão de gases de efeito estufa por digestão anaeróbica de resíduos pecuários.....	32
Figura 2.10 - Balanço anual de gás natural no Brasil.	37
Figura 2.11 - Matriz elétrica Brasileira de 2015.....	38
Figura 2.12 - Participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira. .	38
Figura 2.13 - Demanda residencial e geração solar fotovoltaica típicas.	41
Figura 2.14 - Demanda comercial e geração solar fotovoltaica típicas.....	42
Figura 3.1 - Produção de metano em diferentes temperaturas de substrato. ...	53
Figura 3.2 – Curvas de temperatura e tempo de retenção hidráulica para a produção de biogás em diferentes taxas de alimentação do biodigestor com resíduos da produção suinícola.....	55
Figura 3.3 - Esquema do processo de produção de biogás em uma planta automatizada.	56
Figura 3.4 - Técnicas de monitoramento e estratégias de controle.	57
Figura 3.5 - Malha de controle de um processo de biodigestão.....	58
Figura 3.6 - Localização geográfica do condomínio Ajuricaba.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABiogás	- Associação Brasileira de Biogás e de Biometano;
ABIOVE	- Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais;
ANEEL	- Agência Brasileira de Energia Elétrica;
ANP	- Agência Nacional do Petróleo;
ASMAE	- Administradora de Serviços do Mercado Atacadista de Energia Elétrica;
B5	- 5% de biodiesel no diesel de petróleo;
B7	- 7% de biodiesel no diesel de petróleo;
Bep	- Barris equivalentes de petróleo;
BNDES	- Banco Nacional de Desenvolvimento;
C ₂ H ₆	- Etano;
C ₃ H ₈	- Propano;
CCEE	- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica;
CCVE	- Contratos de compra e venda de energia;
CH ₄	- Metano;
Comgas	- Companhia de Gás de São Paulo;
D _{QO}	- Demanda Química de Oxigênio;
d _s	- Dejetos produzidos por suínos;
EEG	- Lei sobre a Concessão de Prioridade a Fontes Renováveis de Energia (<i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i>);
Eletrobras	- Centrais Elétricas Brasileiras S.A.;
FITs	- <i>Feed-in-tariffs</i> ;
GD	- Geração distribuída;
GLP	- Gás Liquefeito de Petróleo;
GNV	- Gás Natural Veicular;
H ₂ S	- Sulfeto de hidrogênio;
HFP	- Horário fora de ponta;
HP	- Horário de ponta;
MAE	- Mercado Atacadista de Energia Elétrica;
MMA	- Ministério do Meio Ambiente;
MME	- Ministério de Minas e Energia;
N ₂ O	- Óxido nitroso;
NH ₃	- Amônia;

n_s	- Número de animais;
P	- Pressão atmosférica;
P_{BMTeo}	- Potencial Biológico de Metano teórico;
PCHs	- Pequenas centrais hidrelétricas;
Petrobras	- Petróleo Brasileiro S.A.;
PNBg	- Programa Nacional de Produção e Uso do Biogás;
PNPB	- Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel;
Pro-Álcool	- Programa Nacional do Álcool;
Proinfa	- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica;
RN 482	- Resolução Normativa 482;
SIN	- Sistema Interligado Nacional;
SNV	- Organização de Desenvolvimento da Holanda (<i>Stichting Nederlandse Vrijwilligers</i>);
STUB	- Cooperação Dinamarquesa para o Desenvolvimento Tecnológico de Plantas de produção de Biogás;
s_{vol}	- Sólidos voláteis nos dejetos;
T	- Temperatura do biodigestor;
t	- Tempo de funcionamento do biodigestor;
tep	- Toneladas equivalentes de petróleo;
TRH	- Tempo de Retenção Hidráulica;
UPL	- Unidade de Produção de Leitões;
V_{ch4}	- Produção de metano;
V_{ch4sv}	- Produção de metano por kg de s_{vol} ;
V_s	- Sólidos voláteis do substrato;
η_{CH_4}	- Metano molecular.

RESUMO

SILVA, Samuel Chaves da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2017. **Programa nacional e potencial brasileiro de produção em sistemas automatizados de biogás**. Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: José Vítor Nicacio e André Pereira Rosa.

A demanda mundial por energia e a preocupação com o meio ambiente são crescentes. O biogás responde essas duas questões uma vez que é uma fonte de energia renovável obtida por meio do tratamento ambiental de dejetos orgânicos. O potencial de produção de biogás de determinada matéria orgânica depende de variáveis físicas e bioquímicas do processo de biodigestão, como temperatura e pH, que podem ser controladas visando uma maior eficiência do processo. Esta dissertação analisa algumas circunstâncias políticas e estratégicas acerca da criação de um programa nacional de incentivos à produção e uso de biogás no Brasil por meio de uma análise crítica do tema feita a partir de uma ampla revisão de literatura. O potencial brasileiro de geração de biogás em sistemas automatizados é calculado por meio de uma metodologia simples baseada em dados práticos de plantas dinamarquesas e do condomínio de agroenergia Ajuricaba, no sul do Brasil. O Brasil tem programas de incentivos ao uso e produção de energias renováveis, como o álcool e o biodiesel. A experiência adquirida com a aplicação desses programas serve de aprendizado para a criação de um programa nacional de biogás. Outros países alcançaram a viabilidade econômica da exploração comercial do biogás após incentivos governamentais. O Brasil enfrenta desafios políticos e tecnológicos para fazer funcionar um programa nacional de biogás que é uma fonte estratégica para redução de demanda no horário de ponta do sistema elétrico de potência, devido ao seu fácil armazenamento e confiabilidade. Os resultados deste trabalho mostram que sistemas automatizados, de forma geral, elevam em 133% a produção de biogás, quando comparados com sistemas simples, dando ao Brasil um potencial de geração de biogás de 22,81 bilhões de m³/ano, em uma perspectiva conservadora. A implantação de políticas que incentivem o uso e produção de biogás no Brasil é necessária e traria diversos benefícios econômicos, sociais, ambientais e tecnológicos, assim como ocorreu em países como a Alemanha e Dinamarca, além de viabilizar a exploração do grande potencial energético brasileiro a partir dessa fonte renovável.

ABSTRACT

SILVA, Samuel Chaves da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2017. **National programme and the brazilian potential of production using automated systems of biogas.** Advisor: Delly Oliveira Filho. Co-advisors: José Vítor Nicacio and André Pereira Rosa.

Global demand for energy and concern for the environment is increasing. Biogas responds to these two issues since it is a source of renewable energy obtained through the environmental treatment of organic waste. The biogas production potential of organic matter depends on the physical and biochemical variables of the digestion process, such as temperature and pH, which can be controlled for a higher efficiency of the process. This masters thesis analyzes some political and strategic circumstances about the creation of a national incentive program for the production and use of biogas in Brazil through a critical analysis of the theme made from literature review. The Brazilian potential for biogas generation in automated systems is calculated using a simple methodology based on practical data from Danish plants and the Ajuricaba agroenergy condominium in southern Brazil. Brazil has incentive programs for the use and production of renewable energy, such as ethanol and biodiesel. The background from the application of these programs serves as a learning tool for the creation of a national biogas program. Other countries have achieved the economic viability of commercial biogas exploitation because of government incentives. Brazil faces political and technological challenges to run a national biogas program that is a strategic source for demand reduction in the peak hours of the power system due to its easy storage and reliability. This research results show that automated systems, in general, increase biogas production by 133% when compared to simple systems, giving Brazil a potential biogas generation of 22.81 billion m³/year, in a conservative perspective. The implementation of policies that encourage the use and production of biogas in Brazil is necessary and would bring several economic, social, environmental and technological benefits, as it has occurred in countries such as Germany and Denmark, as well as making feasible the exploitation of the great Brazilian energy potential from this renewable source.

Capítulo 1: Considerações iniciais

1.1.INTRODUÇÃO GERAL

A população mundial e seu padrão de vida têm aumentado. Com isso a demanda energética também (Al-Mulali, 2016). Para que esse crescimento venha acompanhado de qualidade de vida, é importante o cuidado com o meio ambiente. A poluição ambiental é um aspecto que influencia fortemente na saúde pública. Dessa forma a adesão de fontes renováveis de energia atende a demanda energética da população zelando por um ambiente limpo. O biogás é uma fonte renovável de energia gerado a partir da decomposição anaeróbica de matéria orgânica, obtida em estações de tratamento de esgoto, resíduos sólidos urbanos, da produção pecuária, agrícola entre outros. Esses resíduos liberam metano na atmosfera, se não forem devidamente tratados, um gás 21 vezes mais poluente que o dióxido de carbono (EPA, 2017). Principal constituinte do biogás, o metano pode ser convertido em energia elétrica, calor ou combustível veicular (Yang et al., 2014).

Espera-se que a bioenergia (energia renovável proveniente da biomassa) supra 30% da demanda energética mundial em 2050. A preocupação com o meio ambiente estimula o investimento no desenvolvimento e uso de energias renováveis em todo o mundo (Guo et al., 2015).

No Brasil o biogás é uma fonte pouco difundida se comparado à Alemanha e Dinamarca, países que incentivaram fortemente, por meio de políticas governamentais, o uso do biogás (Lybæk et al., 2013; Sorda et al., 2013).

A atual legislação brasileira de incentivo às fontes renováveis de energia não abordam o biogás de forma específica, focando na energia hidráulica, biomassa, energia eólica e solar, e ainda assim os incentivos a estas fontes não são suficientes para que essas tecnologias sejam economicamente atraentes para a população em geral (ANEEL, 2015).

Um programa nacional de incentivos ao uso e produção de biogás no Brasil traria benefícios econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos (Lybæk; et al., 2013; Sorda et al., 2013). Esses incentivos são necessários para a promoção do biogás, uma vez que os custos de tecnologias de fontes

renováveis como não convencionais não são competitivos com fontes fósseis, por não serem amplamente difundidas, o que torna custoso tanto equipamentos não comuns como serviços de manutenção (Melo et al., 2016).

As poucas plantas de produção de biogás existentes no Brasil são simples no que diz respeito ao controle do processo de biodigestão, de forma que se aproveita apenas pequena parte do potencial de geração de biogás da biomassa. As bactérias que agem na matéria orgânica geram diferentes quantidades de metano para diferentes condições de temperatura, pH, tempo de retenção hidráulica, entre outros fatores (Lybæk et al., 2013; Sorda et al., 2013). Dessa forma a automatização de biodigestores não só gerará mais biogás como também oferecerá um melhor tratamento ambiental aos dejetos biodigeridos.

O objetivo deste trabalho é analisar as circunstâncias que influenciam e justificam a criação de um programa nacional de políticas para a produção e uso do biogás no Brasil e calcular o potencial de geração de biogás no Brasil com sistemas automatizados controlando algumas variáveis do processo.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado é constituída de 4 capítulos.

O Capítulo 1 introduz, de forma geral e compacta, os temas abordados neste trabalho e sintetiza as limitações e contribuições da presente pesquisa.

O Capítulo 2 busca discutir e responder algumas questões políticas e estratégicas acerca da criação de um programa nacional de políticas de incentivo ao uso e produção de biogás no Brasil.

O Capítulo 3 traz o cálculo do potencial de geração de biogás no Brasil a partir das principais fontes de biomassa disponíveis no país em sistemas automatizados, por meio de uma metodologia simples baseada em dados reais obtidos na literatura.

O Capítulo 4 apresenta a conclusão geral deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros relativos ao tema desta pesquisa.

1.3. LIMITAÇÕES DA PRESENTE PESQUISA

Esta pesquisa buscou responder algumas questões relativas à implantação de um programa nacional de incentivos governamentais ao uso e produção de biogás no Brasil. Essas questões foram respondidas por meio de revisão bibliográfica que considerou um número finito de fontes de informação científica. Dessa forma nem todas as informações existentes pertinentes ao tema foram abordadas.

A dificuldade de encontrar dados reais de produção de biogás para diversas fontes de biomassa pode reduzir a precisão do cálculo do potencial de geração de biogás no Brasil em sistemas automatizados. Ainda, a possibilidade de diferentes níveis de controle de uma planta de biodigestão e condições físicas e bioquímicas adversas das várias regiões do Brasil, afetam diferentemente a eficiência das bactérias anaeróbicas no processo de fermentação da matéria orgânica e geração de metano. Estes fatores não foram considerados neste trabalho.

1.4. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Este trabalho visa responder e discutir algumas questões estratégicas relacionadas à criação de um programa nacional que incentive o uso e produção de biogás no Brasil, bem como reunir o que se pode aprender com a experiência tanto de programas semelhantes para outras fontes renováveis de energia no próprio país, como o álcool e biodiesel, como experiências de países que já possuem aplicação em escala comercial nacional do biogás. O país teria diversos benefícios sociais, econômicos, ambientais e tecnológicos com a implantação de políticas públicas de incentivos ao uso e produção de biogás.

Este trabalho traz, ainda, o potencial nacional de produção de biogás em sistemas automatizados, obtido com o uso de uma metodologia prática e simples, baseada em dados de plantas reais.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Mulali, U. Exploring the bi-directional long run relationship between energy consumption and life quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 824–837, 2016.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

EPA – Environmental Protection Agency. Atmospheric Lifetime and Global Warming Potential Defined. Disponível em: <<https://www.epa.gov/climateleadership/atmospheric-lifetime-and-global-warming-potential-defined>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

Guo, M.; Song, W.; Buhain, J. Bioenergy and biofuels : History , status , and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 712–725, 2015.

Lybæk, R.; Christensen, T. B.; Kjær, T. Governing Innovation for Sustainable Development in the Danish Biogas Sector – a Historical Overview and Analysis of Innovation. *Sustainable Development*, v. 21, n. October 2012, p. 171–182, 2013.

Melo, C. A.; Jannuzzi, G. D. M.; Bajay, S. V. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 61, p. 222–234, 2016.

Sorda, G.; Sunak, Y.; Madlener, R. An agent-based spatial simulation to evaluate the promotion of electricity from agricultural biogas plants in Germany. *Ecological Economics*, v. 89, p. 43–60, 2013.

Yang, L.; Ge, X.; Wan, C.; Yu, F.; Li, Y. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 1133–1152, 2014.

Capítulo 2: A criação de um programa nacional de incentivo à produção e uso de biogás no Brasil

2.1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o meio ambiente tem ocasionado maiores investimentos em fontes renováveis de energia. O biogás é gerado a partir da decomposição anaeróbica de matéria orgânica e é uma fonte renovável de energia. O biogás pode ser obtido de diversas fontes como aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto, resíduos de atividades agrícolas como dejetos de animais e resíduos da produção vegetal. Esses resíduos, por serem descartados, são obtidos a um baixo custo. Além de poder ser utilizado exclusivamente para a geração de energia elétrica, o biogás também pode ser usado em processos de cogeração de energia, onde além de gerar energia elétrica, produz energia térmica com o aproveitamento do calor residual dos equipamentos de conversão de energia. Além disso, o biogás pode ser misturado ao gás natural, depois de filtrado e concentrado ou injetado nas tubulações de redes de distribuição de gás (Yang et al., 2014).

O biogás contém em sua mistura, de 50 a 70% de metano e 30 a 50% dióxido de carbono, bem como pequenas quantidades de outros gases, entre eles o sulfeto de hidrogênio e amônia. Sua aplicação em fogões residenciais é muito comum em países em desenvolvimento, como Índia e China, onde as pessoas começaram o uso intensivo do biogás na década de 1970 e já contavam com 27 milhões de plantas de produção de biogás em 2010. Nesses países, a produção de biogás é proveniente principalmente de biodigestores de pequena escala a partir de dejetos de gado, suínos e aves (Bond e Templeton, 2011).

Em aterros sanitários e sistemas de tratamento de esgoto o biogás não é, geralmente, reaproveitado. O metano é liberado diretamente na atmosfera ou queimado para evitar maior poder de poluição. O poder calorífico do metano é de 21 a 24 MJ/m³ ou de cerca de 6 kWh/m³ e nos países em desenvolvimento o biogás é aplicado não somente para cocção mas também, para aquecimento, iluminação ou geração de energia elétrica. Após extrair o biogás, a matéria

orgânica remanescente é utilizada como biofertilizante (Bond e Templeton, 2011).

A biomassa tem sido utilizada como fonte de energia desde o surgimento da humanidade. Na China e Europa, a produção de biogás tem aumentado rapidamente, com o potencial de substituir 25% do atual consumo de gás. Espera-se que a bioenergia (energia renovável proveniente da biomassa) supra 30% da demanda energética mundial em 2050. Os incentivos para minimizar os impactos ambientais globalmente estimulam o investimento no desenvolvimento e uso de energias renováveis (Guo et al., 2015).

A disposição final dos resíduos sólidos urbanos é um sério problema ambiental e de saúde pública. Tais resíduos podem ser manejados para obterem certo valor econômico ou apenas serem descartados na natureza. Nos lixos de países em desenvolvimento se encontra uma maior proporção de matéria orgânica em relação a plásticos, diferente dos países desenvolvidos, o que causa um maior custo de incineração. Porém essa proporção é benéfica à uma maior produção de biogás (Gebreegziabher et al., 2014). No Brasil a maior parte dos resíduos sólidos urbanos se destina aos aterros sanitários, para confinamento seguro e controle dos impactos ambientais (Silva et al., 2013).

A utilização de energia é um dos indicadores socioeconômicos mais importantes para medir o desenvolvimento de uma sociedade. Três bilhões de pessoas nas áreas rurais de países em desenvolvimento continuam queimando biomassa para suprir suas necessidades de cocção. Esforços de setores não governamentais e governamentais são necessários para promover a disseminação do biogás. A organização de desenvolvimento da Holanda SNV (*Stichting Nederlandse Vrijwilligers*) tem dado suporte a iniciativas de geração de energias renováveis, especialmente aos programas domésticos de produção de biogás em vários países da África e Ásia nos últimos 20 anos (Ghimire, 2013).

Aproximadamente 1,5 bilhões de pessoas (20% da população mundial) não têm acesso à energia elétrica. Por outro lado, mais de 70% do resíduo sólido urbano é composto por matéria orgânica, o que poderia ser utilizado para a produção de biogás e assim gerar energia elétrica para essa população, bem como diminuir o impacto ambiental referente à disposição final desses resíduos de origem orgânica (Surendra et al., 2014).

O uso do biogás no Brasil ainda é pouco difundido se comparado à outros países como Alemanha e Dinamarca. Em tais países a expansão no uso do biogás se deu a partir de políticas públicas que incentivam seu uso e produção (Lybæk et al., 2013; Sorda et al., 2013).

Existem no Brasil alguns casos de uso do biogás para diversas aplicações, porém sem ser algo de ampla aplicação, apenas casos isolados. A legislação atual que incentiva o uso de fontes renováveis de energia para a geração de energia elétrica, como a Resolução Normativa 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica não trata especificamente do biogás e não se constitui de um incentivo suficientemente forte como as *feed-in tariffs* (FITs), ou tarifas prêmio, praticadas em outros países (ANEEL, 2015).

A criação de um programa nacional que incentive o uso e produção de biogás no Brasil poderia trazer diversos benefícios econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos, como acelerar a adoção de tecnologias de produção do biogás e sua conversão em energia elétrica ainda não populares no país (Lybæk et al., 2013; Sorda et al., 2013).

2.2. OBJETIVOS

2.2.1. Objetivo geral

Analisar as circunstâncias que influenciam e que justifiquem a criação de um programa nacional de incentivo a produção e uso de biogás no Brasil como os atuais programas de biocombustíveis, o histórico do uso e situação atual da produção de biogás no país.

2.2.2. Objetivos específicos

- i. Avaliar o que o Programa Nacional do Alcool (Pró-Alcool) e o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) podem fornecer de experiência ao Brasil para a criação e implantação eficiente de um Programa Nacional de Produção e Uso do Biogás (PNBg).
- ii. Fazer uma análise comparativa dos diversos países que têm o biogás sistematicamente inserido na sua matriz energética e a influência de políticas de incentivos governamentais.
- iii. Descrever a situação atual de uso e produção do biogás no Brasil, bem como o histórico.
- iv. Avaliar a legislação vigente de incentivo ao uso de fontes renováveis de energia no Brasil quanto a necessidade do biogás receber atenção especial em relação às outras fontes renováveis, por ser despolutente.
- v. Definir e discutir os benefícios econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos da criação de uma política de incentivo ao uso e produção do biogás no Brasil.
- vi. Definir quais seriam os desafios políticos e tecnológicos da implantação de um Programa Nacional de Produção e Uso do Biogás no Brasil.
- vii. Analisar como o biogás poderia ser inserido na matriz energética brasileira, como, por exemplo, tornar-se compulsória sua adição no Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e Gás Natural Veicular (GNV) em proporções crescentes ao longo dos anos.
- viii. Mostrar a vantagem do biogás como fonte energética passível de reduzir a demanda de ponta de energia elétrica.

2.3.METODOLOGIA

Foi feita uma revisão de literatura a fim de responder as questões listadas nos objetivos específicos. Foram utilizados artigos científicos das principais bases de dados disponíveis na internet, são elas a Web of Science, Scopus, Scielo e Google Acadêmico para a busca de dissertações e teses relativas ao tema da pesquisa. Também foram utilizadas informações obtidas no site de agências governamentais, como por exemplo, a ANEEL (Agência Brasileira de Energia Elétrica) e o MME (Ministério de Minas e Energia). Os objetivos específicos foram alcançados a partir da análise crítica e discussão do material estudado.

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1. Experiências do Pró-Álcool e do PNPB para a criação e implantação eficiente de um programa brasileiro de incentivos à produção e uso do biogás no Brasil

O biodiesel é um combustível que substitui o diesel de petróleo, é renovável e pode ser obtido de óleos vegetais e gorduras animais. O Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel (PNPB), criado pelo governo federal brasileiro em dezembro de 2004, visa incentivar a produção e uso do biodiesel no país. Seus principais objetivos são: o desenvolvimento social de regiões mais pobres do Brasil, gerando emprego e renda (MME, 2015), diminuir a importação de diesel e as emissões de CO₂ associadas ao diesel fóssil (Guilherme et al., 2014).

De 2005 a 2007 era voluntária a adição de 2% de biodiesel no diesel de petróleo. Com a comercialização do diesel B2 (2% de biodiesel no diesel fóssil) desde 2002, o governo esperava gerar mais de 150 mil postos de trabalho diretos e indiretos até 2005 na agricultura familiar. Porém os custos de produção do biodiesel eram maiores do que o diesel do petróleo, além disso, os produtores de soja, mamona e palmeira poderiam preferir vender seu produto para a indústria de alimentos e ao mercado externo de óleo, competindo com o PNPB (Flexor e Kato, 2017). Em 2008, a adição de 3% passou a ser obrigatória. Essa porcentagem chegou a 4% em 2009 e 5% em 2010, o que aumentou repentinamente a demanda de biodiesel. (Nogueira et al., 2016). Em novembro de 2014 foi implementado o B7 (7% de biodiesel no diesel de petróleo) e nesse ano a capacidade de produção de biodiesel no país ultrapassou 7 bilhões de litros/ano. Entretanto em 2014 o consumo de biodiesel foi de 3,29 bilhões de litros (Flexor e Kato, 2017).

A agricultura de larga escala emprega um trabalhador para cada 100 hectares enquanto a agricultura familiar emprega um trabalhador para cada 10 hectares. Com a adição obrigatória de 5% de biodiesel no diesel de petróleo, o relatório de capacidade de produção de biodiesel da comissão interministerial previu, em 2004, a criação de mais de um milhão de empregos diretos e indiretos devidos à participação de 6% de agricultura familiar no mercado do biodiesel (MME, 2003).

O PNPB falhou em cumprir todos seus objetivos iniciais. A geração empregos foi muito menor do que o previsto (Rathmann et al., 2012). Entretanto, a implantação das políticas de um plano como o PNPB é sempre positiva por introduzir medidas inovadoras e necessárias para o alcance das metas do programa a longo prazo. Desde março de 2017, 8% do combustível diesel é biodiesel (MME, 2015). Com exceção de 2016, a produção anual brasileira de biodiesel tem aumentado desde a criação do PNPB em 2004 (Figura 2.1), com 4570 barris equivalentes de petróleo (bep) em 2005, ultrapassando os 24 milhões de bep em 2015.

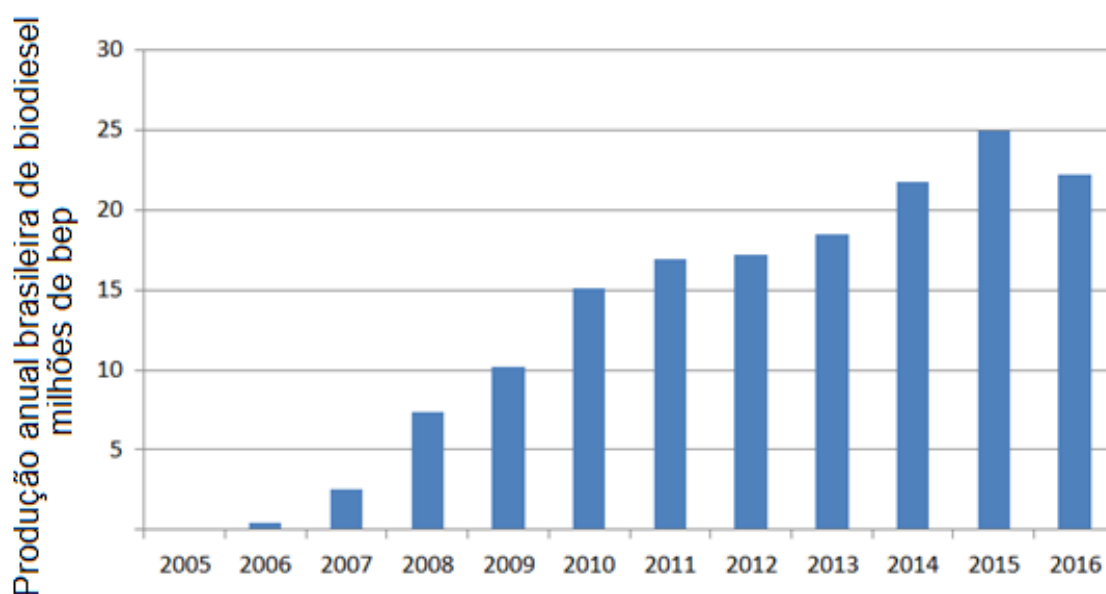


Figura 2.1 - Produção anual brasileira de biodiesel, em milhões de bep.

Fonte: (ANP, 2016).

O PNPB elevou a capacidade de produção das plantas industriais de biodiesel e provocou a queda dos custos de produção do biocombustível nos últimos cinco anos. Também houve uma queda no preço da matéria prima (soja é a principal) para sua fabricação (Nogueira et al., 2016). Utilizar 20% de biodiesel no diesel de petróleo (B20) provocaria uma redução de R\$0,09 por litro do combustível, se comparado ao uso do B7 (EMBRAPA, 2015).

O PNPB fez do Brasil referência mundial no uso de fontes renováveis de energia. Mas, o país é destaque na utilização e produção de biocombustíveis desde a criação do Pró-Álcool (Programa Nacional do Álcool) na década de 70, iniciando a utilização do álcool (etanol), especialmente da cana de açúcar, em veículos automotivos.

O Brasil é o maior produtor e consumidor de álcool combustível do planeta e o Pró-álcool foi o maior programa de substituição de combustíveis fósseis do mundo no mercado automotivo (MME, 2015).

As políticas do Pró-Álcool incluíam alvos compulsórios de adição de álcool na gasolina, acordos com fabricantes de carros para fabricarem veículos com motores que funcionam a álcool, investimento em pesquisa e desenvolvimento para melhoria de milho e cana-de-açúcar. Um possível conflito de interesses foi transformado em uma aliança entre o governo brasileiro e os fabricantes de automóveis para o sucesso do Pró-Álcool (Silveira e Johnson, 2016).

Atualmente no Brasil 90% dos carros e 50% das motocicletas vendidas são flex, isso é, funcionam com qualquer mistura de etanol e gasolina. Devido a essa participação expressiva dos veículos flex, em março de 2015 passou a ser obrigatória a adição de 27% de álcool na gasolina comum (ABRACICLO, 2013; Stattman et al., 2013).

A demanda de etanol caiu em 1990 devido à queda no preço do petróleo no mercado internacional. Porém seu sucesso foi reestabelecido a partir dos anos 2000 devido às preocupações com questões ambientais e a inserção, no mercado brasileiro, do carro flex, que funciona a álcool. (Rathmann et al., 2012) A produção de etanol no Brasil também tem aumentado nos últimos anos, com exceção de 2016, segundo a Figura 2.2.

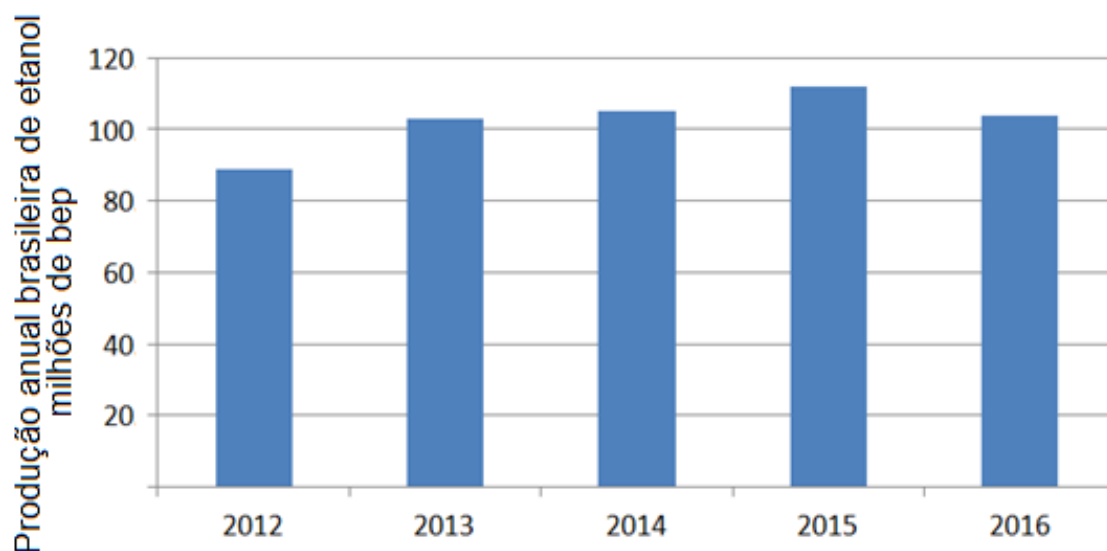


Figura 2.2 - Produção anual brasileira de etanol, em milhões de bep.

Fonte: (ANP 2016).

O PNPB e o Pró-Álcool tinham objetivos sociais semelhantes de desenvolvimento de regiões mais pobres do Brasil. O PNPB foi implantado com

um alvo social mais forte, de inclusão de pequenos produtores rurais na cadeia produtiva do biodiesel. O PNPB utilizou alguns resultados do Pró-Álcool para melhor ser implantado (Stattman et al., 2013). Da mesma forma ambos os programas podem fornecer informações importantes para o sucesso da criação de um programa nacional de uso e produção de biogás no Brasil, que receberá o acrônimo de PNBg neste trabalho.

O Brasil foi o primeiro país a promover desenvolvimento social por meio da produção em larga escala de biocombustíveis, mesmo com problemas sociais e culturais que afetam negativamente seus planos. A inclusão de agricultores familiares na cadeia de produção da matéria prima para o biodiesel enfrenta severas dificuldades até hoje, desde o início da implantação do PNPB em 2004. É difícil inserir pequenos produtores rurais em um modelo em larga escala de produção de biocombustível, principalmente quando existem adições percentuais obrigatórias de biocombustível no combustível fóssil. A produção em larga escala não é compatível com os métodos de produção dos pequenos agricultores nos países em desenvolvimento (Flexor e Kato, 2017).

Em 2004, o governo queria evitar que o PNPB promovesse a mesma concentração geográfica de produção agrícola como ocorreu com o Pró-Álcool no sudeste do Brasil. Queria se evitar também o uso de um só tipo de fonte como matéria prima, além da exclusão de agricultores familiares. Porém, mesmo tendo consciência desses problemas e tentando evitá-los, o desenvolvimento regional, inclusão social, e a diversificação de fontes se mostrou extremamente difícil de alcançar (César e Batalha, 2013; Watanabe et al., 2012).

Entre 1975 e 1985 aproximadamente 8% do álcool produzido no Brasil era extraído da mandioca (Stattman et al., 2013). Mas esse percentual foi caindo a cada ano, pois a maior parte das plantas de produção de etanol a partir da mandioca estava situada em regiões com pobre infraestrutura e mão de obra. A falta de pesquisa agrônômica no que se refere à melhor produção da mandioca também contribuiu para seu insucesso (Flexor e Kato, 2017).

As regiões que mais se beneficiaram com o PNPB foram justamente as que menos precisavam, socialmente, devido à produtividade local de soja ou à já melhor infraestrutura e condições gerais de acesso à tecnologia, informação e desenvolvimento industrial, como consta no Quadro 2.1, a capacidade e produção mensal de biodiesel por região em 2014, as regiões nordeste e norte,

que são as mais pobres do país, tiveram menor participação na produção nacional de biodiesel do que as outras três regiões (ANP, 2016; Marcossi e Moreno-Pérez, 2017).

Quadro 2.1 - Capacidade e produção mensal de biodiesel por região em 2014

Região	Capacidade de produção mensal de biodiesel (m ³)		Produção mensal de biodiesel (m ³)		Demanda mensal de biodiesel (m ³)	
		%		%		%
Centro-oeste	307.688	47	102.654	43	29.643	12
Nordeste	37.954	6	15.442	6	40.118	17
Norte	16.200	2	8.596	4	23.645	10
Sudeste	77.882	12	21.025	9	99.441	41
Sul	219.010	33	90.688	38	48.550	20
Total	658.734	100	238.405	100	241.397	100

Fonte: (ANP, 2016).

Como observado no Quadro 2.1, as regiões Nordeste e Norte são as que menos produzem biodiesel no Brasil, com a participação de, respectivamente, 6% e 4% da produção total no país.

Foi desafiador para a Petrobrás manter os contratos com as famílias agricultoras para a garantia do fornecimento de matéria prima para a produção do biodiesel devido à falta da cultura de contrato com os pequenos produtores, que ainda estão dispersos por todo o país, tornando a logística de produção custosa. Em especial, o estado da Bahia mostra como a falta de cooperação entre os produtores diminui a possibilidade de criar relações de confiança entre os eles próprios, entre cooperativas e a própria Petrobrás. Devido à falta de confiança entre as partes, a Petrobrás teve que investir mais tempo, pessoal e dinheiro para monitorar as atividades dos fazendeiros. A falta de lealdade nos contratos não pôde ser facilmente resolvida (Flexor e Kato, 2017).

Conclui-se que tanto o Pró-Álcool quanto o PNPB falharam no que diz respeito à inclusão de pequenos agricultores na cadeia produtiva agrícola. O Ministério do Meio Ambiente influenciou muito pouco no desenvolvimento de ambos os programas. Os principais autores desses programas foram a Petrobrás, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e os ministérios de energia e

de agricultura (Stattman et al., 2013). Dessa forma, não é a vantagem ambiental associada ao biogás que vai liderar a criação de um programa de incentivo à esta fonte e sim a geração alternativa de energia, com reaproveitamento e tratamento ambiental de resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos, águas residuárias, entre outras possíveis fontes.

2.4.2. Análise comparativa de países com políticas de incentivo governamental ao uso e produção do biogás

Biogás na Ásia e na África

A organização holandesa SNV (Organização de Desenvolvimento da Holanda) tem dado suporte ao uso de energias renováveis em vários países do continente asiático e africano. Especialmente por meio de programas de uso doméstico do biogás (Lim, 2016). Desde 1992, mais de 299 mil plantas domésticas foram instaladas em 14 países desses continentes, produzindo diariamente 600 mil m³ de biogás (equivalente a 240 ton. de gás liquefeito de petróleo (GLP) ou 900 MWh de energia elétrica). Esses programas visam estabelecer melhores condições de saúde no meio rural. Em 2009, a China possuísse cerca de 35 milhões de plantas domésticas de biogás, a Índia 4,5 milhões, Nepal mais de 215 mil e Vietnam mais de 80 mil. A China conta com um forte suporte estatal financeiro para produção de biogás, pois consideram que a disseminação do biogás em países onde não se tem política de energias renováveis é lenta (Ghimire, 2013). A China espera mais que dobrar sua capacidade de produção de biogás até 2021, pois só explora 5% de seu potencial dessa fonte energética (Lim, 2016; Wang et al., 2016b).

As plantas domésticas de produção de biogás foram implantadas de forma efetiva e amplamente disseminada nos países onde os governos forneceram subsídios para os projetos, construção e operação das instalações. O Ministério de Petróleo e Recursos Naturais do Paquistão financiou 4.137 plantas de biogás no país até o final da década de 80. No entanto, o programa falhou após o governo retirar o suporte financeiro. Em uma nova tentativa de incentivar o uso do biogás no país, o Conselho Paquistão de Tecnologias para Energia Renovável financiou 50% do custo de implantação de 1.200 novos biodigestores em 2001. Em 2011, o Paquistão contava com 5357 plantas

de produção de biogás, enquanto 24 mil plantas foram instaladas em Bangladesh até 2005 (Bond e Templeton, 2011).

A disseminação do uso do biogás na África subsaariana enfrenta barreiras principalmente financeiras. O investimento inicial em uma planta de produção de biogás é muito alto para os fazendeiros que ainda não conseguem financiamento facilmente (Roopnarain e Adeleke, 2017; Rupf et al., 2015).

O reaproveitamento de dejetos para produção de biogás nos países da Ásia e África não visa apenas a geração de energia, mas também é feito por motivos ambientais, saúde da população e tratamento de dejetos (Bond e Templeton, 2011; Rupf et al., 2015).

Programas nacionais de biogás foram implantados no Kenya, Uganda, Ethiopia, Tanzania, Ruanda, Camarões entre outros pequenos países africanos. Esses países se beneficiaram com as políticas de desenvolvimento tecnológico (Roopnarain e Adeleke, 2017).

Biogás na Alemanha

A Alemanha lidera o mercado europeu de biogás (Auer et al., 2017). Em 2008 gerou 3,7 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo). Isso foi 49% de toda a produção de biogás da União Europeia (Sorda et al., 2013).

Diversos países da Europa produzem biogás mas a Alemanha é, de longe, o maior produtor europeu, com 10.786 de todas as 17.240 plantas de produção de biogás do continente, Figura 2.3, com uma capacidade de geração elétrica de 8.293 MW (EBA, 2015).

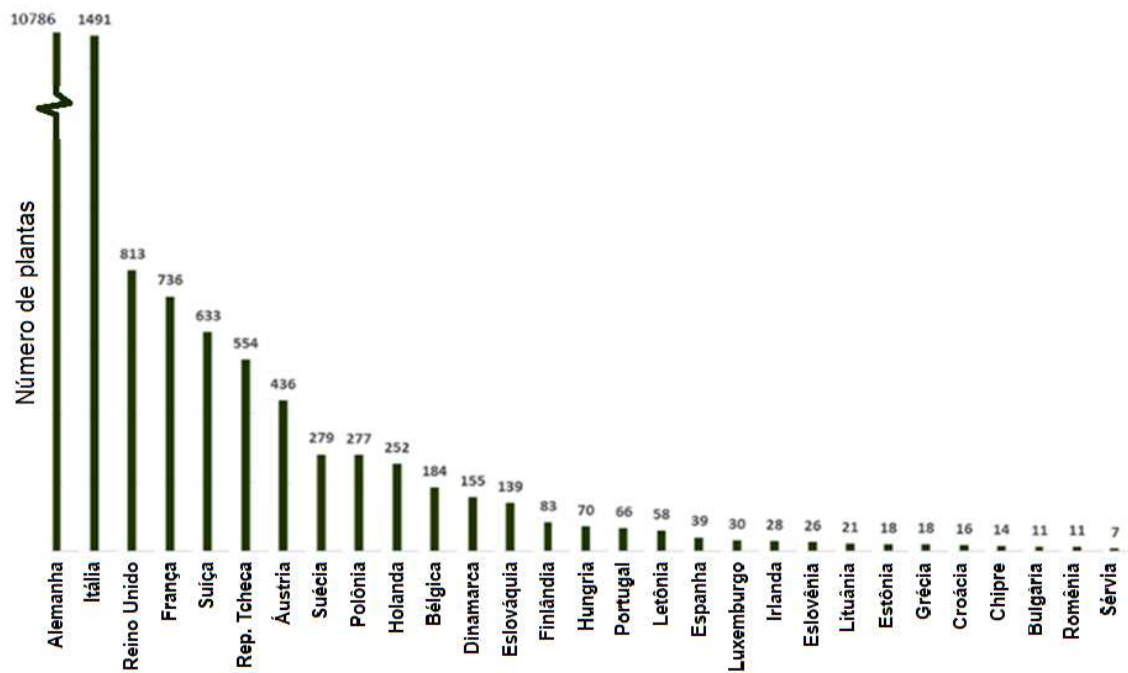


Figura 2.3 - Número de plantas de produção de biogás por país europeu.

Fonte: (EBA, 2015).

A Alemanha teve um aumento substancial no número de instalações de produção de biogás na última década (Figura 2.4), graças às tarifas especiais garantidas para inserção de energia elétrica na rede de distribuição (German Biogas Association, 2015). Isso tudo devido a uma ambiciosa política nacional de elevação na parcela de energia renovável em sua matriz energética. A Lei sobre a Concessão de Prioridade a Fontes Renováveis de Energia (*Erneuerbare-Energien-Gesetz*, EEG), criada pelo governo federal alemão em 2000, oferece suporte à geração de energia elétrica e calor a partir do biogás, o que inclui as *feed-in tariffs* para eletricidade, em que o consumidor vende energia elétrica para a concessionária local (Imran et al., 2016).

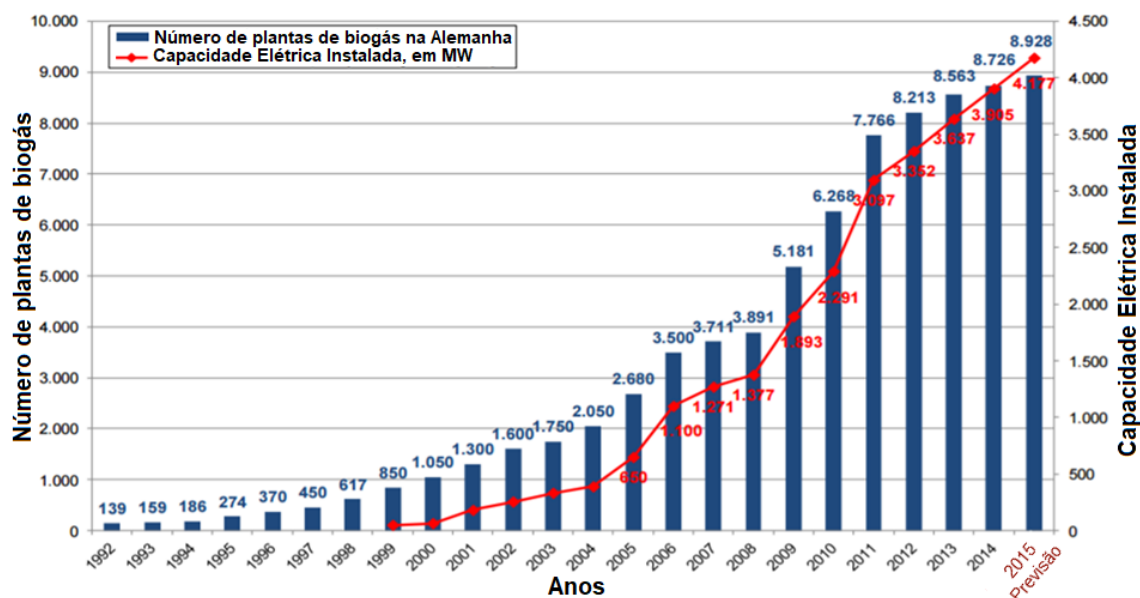


Figura 2.4 - Número de plantas de biogás e da potência elétrica total de geração instalada (em MW) na Alemanha.

Fonte: (Imran et al., 2016).

As *feed-in tariffs* são tarifas prêmio, pagas aos produtores de energia elétrica a partir de fontes renováveis, que insiram sua energia gerada na rede elétrica da concessionária local e são pagos por isso. Houve emendas à EEG em 2004, 2009 e 2012. A emenda de 2004 introduziu uma *feed-in tariff* especial para produção de biogás na agricultura, o que promoveu o uso de resíduos agrícolas levando a uma capacidade elétrica instalada de 1435 MW no país em 2008, com 4099 plantas de produção de biogás no meio agrícola, sendo 71% proveniente de pequenas propriedades rurais (Sorda et al., 2013).

O biogás foi responsável por 7,7% da eletricidade gerada a partir de fontes renováveis e 1,1% da energia elétrica total consumida na Alemanha em 2008. Para a Alemanha, melhores tarifas não implicam em aumento da capacidade elétrica instalada de biogás devido à já quase completa utilização dos resíduos agrícolas para tal. No entanto, uma redução desse incentivo pode implicar na diminuição da atratividade econômica de investir em instalações de geração elétrica a biogás. Com as atuais tecnologias e suporte do governo, novas instalações de conversão energética podem tirar vantagem da produção agrícola. A difusão do biogás para geração de eletricidade depende das *feed-in tariffs* no país (Sorda et al., 2013).

Biogás na Dinamarca

A produção de biogás a partir de resíduos pecuários e lixo orgânico na Dinamarca é uma prática comum. A disseminação das plantas de produção de biogás começou na década de 1970 nas fazendas. Os fazendeiros foram incentivados inicialmente não por políticas governamentais, mas pelo alto preço da energia devido à crise energética mundial de 1973, onde foram criados centros de pesquisa e empresas para o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia a partir dos rejeitos pecuários (Sorda et al., 2013).

O primeiro programa de pesquisa e desenvolvimento do biogás foi iniciado em 1978, chamado de Cooperação para o Desenvolvimento Tecnológico de Plantas de produção de Biogás (STUB). Havia no país políticas energéticas de uso dos recursos nacionais ao invés de importar petróleo do Oriente Médio. O programa foi financiado pelo Ministério do Comércio. O propósito desse programa era a melhoria de técnicas biológicas e fatores econômicos que afetam a instalação e manutenção das plantas de produção de biogás nas fazendas. O suporte governamental na pesquisa do biogás foi de fundamental importância (Lybæk et al., 2013).

A partir de 1980 surgiram as grandes plantas centralizadas de produção de biogás na Dinamarca. Para evitar a reintrodução do petróleo, o governo dinamarquês aumentou os impostos nos processos intermediários da cadeia de produção de energia. As energias renováveis e o gás natural foram isentados dos impostos, o que permitiu a estabilização dos preços da energia elétrica residencial, mesmo com a oscilação no preço do petróleo. Ainda hoje a união de pequenos produtores rurais para criar uma planta centralizada de biogás e geração elétrica é financeiramente interessante, uma vez que o custo dos tradicionais geradores de energia elétrica são menores para maior valor de potência da planta. A Figura 2.5 apresenta o custo total de plantas de biogás de cogeração de energia por capacidade elétrica instalada de geração na Europa (Strzalka et al., 2017).

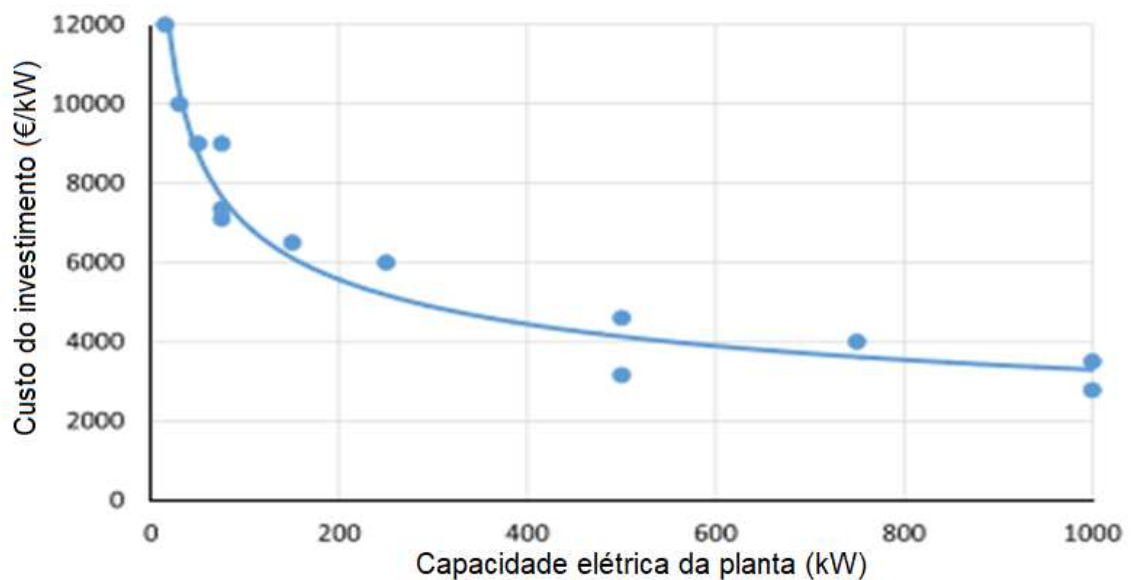


Figura 2.5 - Custo total de plantas de biogás de cogeração de energia por capacidade elétrica instalada de geração na Europa.

Fonte: (Strzalka et al., 2017).

Toda essa situação fez com que a Agência de Energia Dinamarquesa, o Ministério de Energia e o Ministério da Agricultura estabelecessem uma estrutura organizada de pesquisa e investigação sobre plantas centralizadas de biogás. Começou assim o Programa de Ação do Biogás, em 1988. O foco do programa foi a construção de novas plantas de produção de biogás, especialmente com o intuito de pesquisa e desenvolvimento. Foram concedidas linhas de financiamento em longo prazo com baixa taxa de juros a quem desejasse construir plantas centralizadas de produção de biogás. Todas essas medidas governamentais permitiram a melhoria gradual das instalações de biogás, bem como sua disseminação. Com isso, essas instalações se tornaram economicamente viáveis a partir dos anos 90 (Ravene Gregersen, 2007; Lybæk et al., 2013).

Para o sucesso do biogás na Dinamarca as autoridades estimularam a interação entre pesquisadores, fazendeiros, empresas de equipamentos de biogás, operadores das plantas e autoridades públicas. Essa abordagem resultou em uma rede de interação social a respeito do desenvolvimento e uso de tecnologias do biogás, criando um ambiente propício à troca de experiências. Com mais de 30 anos de aperfeiçoamento das tecnologias e políticas do uso do biogás, a Dinamarca é reconhecida como um caso de sucesso na Europa. O biogás na Dinamarca atualmente é responsável por 0,5% de todo o consumo energético nacional, 60% desse biogás é produzido

nas plantas centralizadas e o restante provém do tratamento de águas residuárias e aterros sanitários. Essas plantas centralizadas são também automatizadas, com controle de temperatura, agitação, pH e tempo de retenção hidráulica. As autoridades tiveram um papel importante na implantação das *feed-in tariffs* e outras atividades de suporte para o sucesso do uso do biogás na Dinamarca (Raven e Gregersen, 2007).

Em 2009 foi desenvolvido um diferente programa do biogás para dar suporte ao novo programa energético do governo chamado Estratégia de Crescimento Verde, lançado para coordenar atividades relativas ao biogás na Dinamarca. A Estratégia de Crescimento Verde prevê uma forte ligação entre as políticas energéticas e as tecnologias do biogás. Uma análise histórica do desenvolvimento das tecnologias associadas ao uso e produção de biogás na Dinamarca aponta para o sucesso quando os programas de pesquisa são ligados diretamente aos problemas experimentados no uso das tecnologias existentes, pelos fazendeiros e operadores das plantas de produção. O desenvolvimento dessas tecnologias é altamente influenciado por políticas públicas (Lybæk et al., 2013).

2.4.3. Situação atual e histórico do uso e produção de biogás no Brasil

Dois projetos com o uso do biogás foram implantados no Brasil em 1970. Um para a Companhia de Gás de São Paulo (Comgas) e o outro para duas companhias no Rio de Janeiro, a Companhia Estatal de Gás e a Companhia de Limpeza Urbana Municipal. A Comgas distribuiu o biogás de um pequeno aterro sanitário para um bairro residencial local na cidade de São Paulo. As duas outras companhias cariocas purificavam e injetavam cerca de 1.000 m³/dia de biogás na rede de distribuição de gás da cidade do Rio de Janeiro, e em 1985 tornou o biogás o combustível de uma frota de 150 caminhões municipais e alguns táxis. Esses projetos duraram cerca de 10 anos (Lino e Ismail, 2011).

No Brasil não há nenhum tipo de incentivo fiscal federal direcionado especificamente para o biogás, como existe para o álcool e o biodiesel. Os interessados em utilizar biogás para geração de energia elétrica têm principalmente a Resolução Normativa 482 (RN 482), criada no ano de 2012 pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). A RN 482 permite que

qualquer pessoa física ou jurídica que gere energia a partir de uma fonte renovável, insira na rede de energia elétrica sua energia gerada. A conta de energia elétrica é resultado do balanço da energia gerada subtraída da energia consumida da rede e caso gere um excedente este pode ser consumido futuramente em até 60 meses. A RN 482 sofreu algumas alterações por meio da Resolução Normativa 687 de 24 de novembro de 2015. Para se beneficiar da RN 482 as unidades a biogás podem ter até 5 MW de potência instalada. A tarifação permitida pela RN 482 chama-se *net-metering*, uma forma de compensação e não permite a comercialização da energia gerada. Esse tipo de tarifação é menos atrativo do que as *feed-in tariffs*, nas quais a concessionária de energia elétrica paga ao cliente pela energia que ele insere na rede, geralmente um valor maior do que o preço da energia praticado na distribuição (ANEEL, 2012).

Os dejetos de uma suinocultura, por exemplo, emitem metano na atmosfera quando descartados no ambiente. O metano é 21 vezes mais poluente do que o dióxido de carbono quando se analisa seu potencial negativo de contribuição para o efeito estufa. A biodigestão da matéria orgânica se constitui de um tratamento ambiental desse substrato, gerando ainda o biogás. Portanto, esta fonte de energia não é apenas renovável, mas também despoluente, diferente de outras fontes alternativas de energia, como eólica e fotovoltaica, que apenas não emitem poluentes na etapa de uso (EPA, 2017).

As únicas plantas de geração de energia elétrica a partir do biogás a nível comercial no Brasil reportadas na literatura são a Usina Bandeirantes com 22 MW instalados e a usina do aterro São João com 24,6 MW, ambas em São Paulo (Salomon et al., 2009; Silva et al, 2013; Souza et al., 2014).

As principais dificuldades de se explorar com maior intensidade o potencial do biogás no Brasil são os altos investimentos iniciais necessários para construir uma planta de geração de biogás, pouca pesquisa na área de digestão anaeróbica e a falta de um plano nacional do biogás com incentivos governamentais ao seu uso e produção (Salomon et al., 2009). Além disso a quase totalidade de biodigestores no Brasil não possuem qualquer tipo de controle que aumente sua eficiência na produção de biogás, como é o caso dos biodigestores alemães, por exemplo (C2ES, 2011).

Atualmente existem algumas cidades no interior do estado de São Paulo que geram energia elétrica com o biogás extraído do sistema municipal de

tratamento de esgoto, como faz a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) em Barueri. Além disso, o uso do biogás como fonte energética é uma realidade cada vez mais comum na área rural de cidades por todo o Brasil, especialmente na região sul (Coimbra-Araújo et al., 2014).

2.4.4. Legislação vigente de incentivo ao uso de fontes renováveis de energia no Brasil e sua relação com o biogás

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) foi um programa implementado em 2004 pelo Ministério de Minas e Energia no Brasil. Seus objetivos eram diversificar a matriz de energia elétrica nacional para aumentar a segurança no abastecimento e estimular a geração descentralizada de energia elétrica por produtores independentes (Souza et al., 2016). As principais fontes incentivadas foram pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), energia eólica e biomassa. O Proinfa foi a primeira e mais relevante política de incentivo a fontes renováveis no Brasil (Aquila et al., 2017). A Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras S.A.) foi a agência executora do programa, por meio de contratos de compra e venda de energia (CCVE). O Proinfa previu a implantação de 144 usinas com 3.299,40 MW de capacidade instalada. O Quadro 2.2 apresenta o plano inicial de capacidade instalada por fonte (MME, 2004; Silva et al., 2016).

Quadro 2.2 - Capacidade de geração elétrica instalada prevista pelo Proinfa por fonte energética

Fonte energética	Nº de usinas	Capacidade Instalada (MW)
PCHs	63	1.191,24
Eólica	54	1.422,92
Biomassa	27	685,24
TOTAL	144	3.299,40

Fonte: (MME, 2004).

Os contratos da Eletrobras foram fechados todos para compra de energia durante 20 anos. Apenas nos 3 primeiros anos do Proinfa a capacidade elétrica instalada a partir de energia eólica cresceu de 22 MW para 414 MW (MME,

2004). A Figura 2.6 apresenta a evolução da geração eólica no Brasil, incentivada pelo Proinfa. Atualmente a geração eólica corresponde a 3,5% da matriz elétrica brasileira (EPE, 2016).

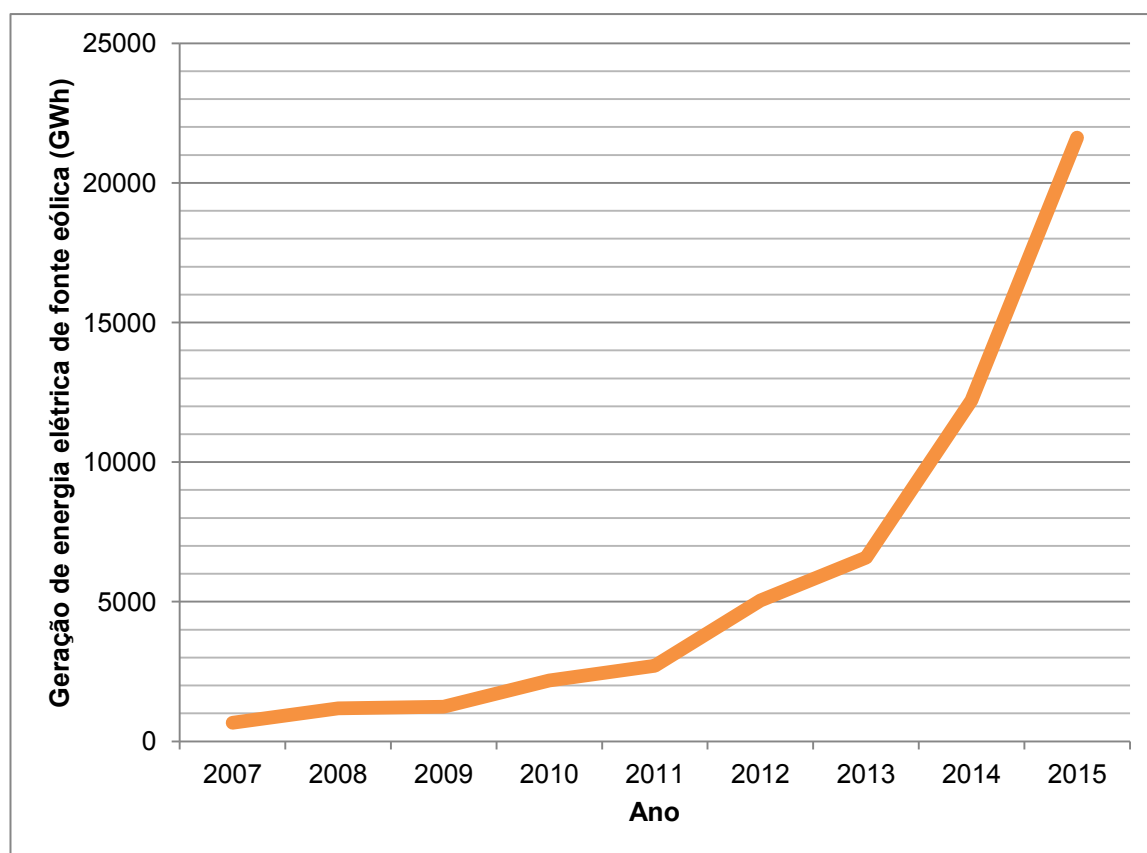


Figura 2.6 - Evolução da geração eólica no Brasil.

Fonte: (EPE, 2016).

A quase totalidade de instalações a biomassa resultantes do Proinfa foi com geração de energia elétrica a partir o bagaço da cana de açúcar, biomassa para geração de biogás não foi alvo do Proinfa, assim como energia solar fotovoltaica também não foi (Aquila et al., 2017).

O Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) concedia sistemas especiais de financiamento para construções de parques eólicos, pelo Proinfa, e inicialmente foi utilizado o sistema de *feed-in-tariffs* para a compra da energia pelas concessionárias (Aquila et al., 2017). Por este sistema as concessionárias compravam a energia gerada das usinas. Mas isso durou pouco tempo e logo as *feed-in-tariffs* foram substituídas pelos leilões de compra e venda de contratos de energia dessas usinas renováveis. Os leilões são organizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)

(Silva et al., 2016; Aquila et al., 2017). O Proinfa ainda estimula a construção de usinas de energia renovável.

Em abril de 2012 foi criada a Resolução Normativa N°482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (RN 482 da ANEEL), que passou a permitir que qualquer consumidor de energia elétrica no Brasil, seja residencial ou não, possa inserir na rede elétrica da concessionária local a energia que gera, desde que seja a partir de fontes renováveis e até 1 MW, incentivando assim a geração distribuída de energia elétrica no Brasil. A RN 482 utiliza o sistema de compensação de energia elétrica, ou *net-metering*, em que a energia ativa gerada pelo consumidor conectado à rede é cedida à concessionária por meio de empréstimo gratuito, e posteriormente (até 3 anos) é compensada com o consumo de energia elétrica da unidade consumidora ou outras unidades de mesma titularidade. A RN 482 sofreu alterações em novembro de 2015 por meio da RN 687 da ANEEL. Algumas das alterações foram: o prazo para recuperação e uso da energia inserida na rede passou a ser de 5 anos em vez de 3 e a capacidade máxima instalada permitida a ser inserida na rede elétrica mudou de 1 MW para 5 MW. Entretanto a principal evolução trazida pela RN 687 foi a possibilidade de geração compartilhada, isso é, união de consumidores, por meio de consórcio ou cooperativa, que possua unidade consumidora com geração em local diferente das várias unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada (ANEEL, 2012, 2015).

Grandes usinas a biogás (maior que 5 MW de geração instalada) podem fazer uso das vantagens oferecidas pelo Proinfa atualmente, embora não tenha sido o foco do programa. Usinas menores a biogás podem fazer uso da RN 482, embora só se possa fazer uso do sistema de compensação de energia. Até o dia 23 de maio de 2017, havia no Brasil apenas 40 micro e minigeradores a biogás conectados no sistema elétrico de distribuição por meio da RN 482. O Total de conexões até a mesma data é de 10.561, Figura 2.7.

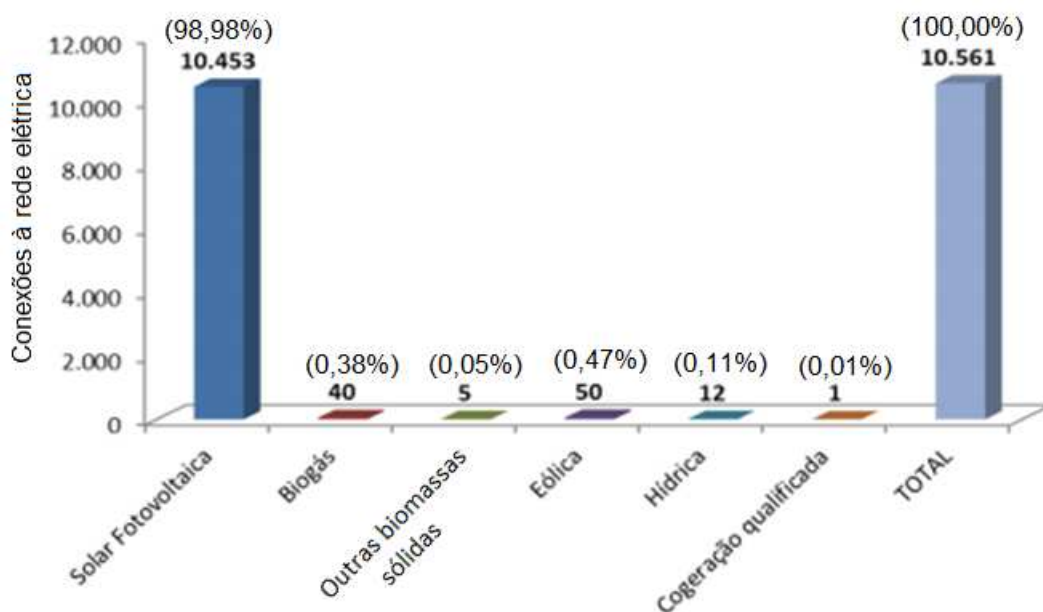


Figura 2.7 - Conexões por tipo de fonte até 23/05/2017 por meio da RN 482.
Fonte: (ANEEL, 2017).

A potência média instalada conectada à rede por meio da RN 482, proveniente do biogás, é de 5,2 MW até o dia 23 de maio de 2017, de um total de 114,7 MW, ou seja, o biogás corresponde a 4,53% da potência gerada por fontes renováveis associadas à RN 482, enquanto a solar fotovoltaica corresponde a 70% Figura 2.8.

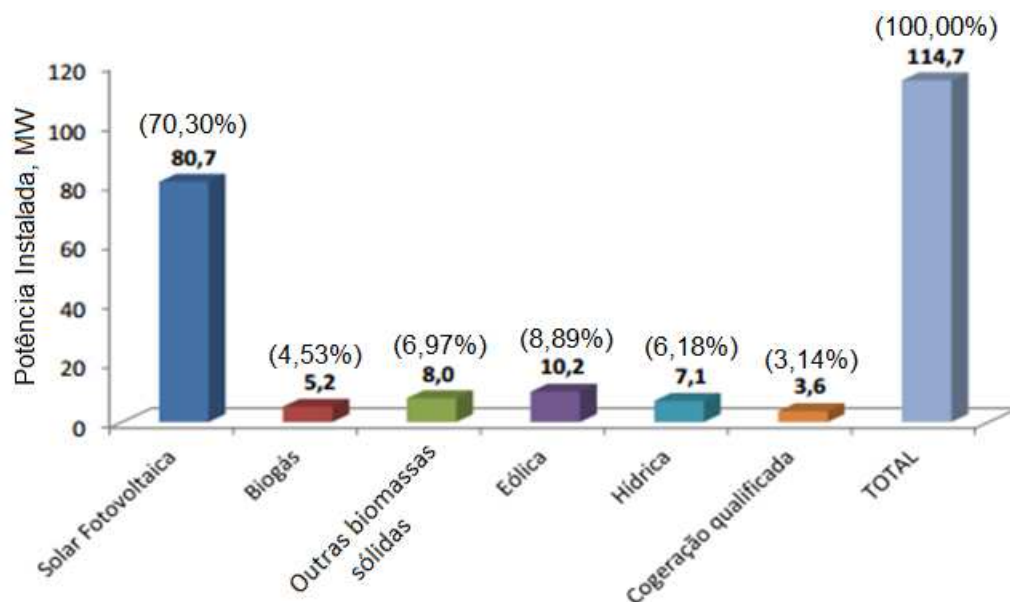


Figura 2.8 - Potência instalada até 23/05/2017 pela RN 482, em MW.
Fonte: (ANEEL, 2017).

Do ponto de vista ambiental, a geração de energia a partir do biogás é mais interessante do que as outras fontes renováveis de energia como a eólica ou a solar fotovoltaica, pois a biodigestão se constitui de um tratamento ambiental de resíduos orgânicos que poderiam estar sendo descartados no meio ambiente (Roopnarain e Adeleke, 2017). Sendo assim, tal fonte deveria receber um incentivo especial, com criações de políticas contando fortemente com a participação do Ministério do Meio Ambiente (MMA), diferentemente do PNPB e Pró-Álcool, que sofreram pouca influência do MMA (Stattman et al., 2013).

A digestão anaeróbica de dejetos agropecuários evita a emissão de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) na atmosfera além de o material biodigerido substituir fertilizantes minerais (Auer et al., 2017; Hijazi et al., 2016).

Grandes usinas a biogás são economicamente viáveis mesmo sem suporte governamental. Porém para menores produtores rurais, por exemplo, a união para criar uma única central geradora incorreria em custos de transporte da matéria prima a ser biodigerida num só local, podendo inviabilizar o empreendimento (Auer et al., 2017).

Embora a criação da RN 482 seja uma iniciativa válida para o desenvolvimento da geração distribuída (GD) e uso de fontes renováveis no Brasil, ainda faltam linhas e instrumentos de financiamento para a GD ser disseminada a nível residencial. As *feed-in-tariffs* (FITs) apresentam uma eficiência maior na promoção das fontes de energia renováveis do que as atuais formas de remunerar os mini e microgeradores de energia no Brasil (Aquila et al., 2017). O uso das FITs para o biogás provou ser um instrumento de sucesso na Alemanha e Dinamarca, e é a principal razão desses países terem se tornado o líder mundial do mercado no desenvolvimento das tecnologias de biogás (Strzalka et al., 2017).

O Proinfa e a RN 482 foram as iniciativas mais importantes no Brasil para incentivar a geração distribuída de energia a partir de fontes renováveis. Porém houve outras medidas menos significativas, como a lei nº 10.848 de 2004 que regulamenta os leilões no mercado de energia brasileiro, a lei nº 11.448 que prevê isenções de impostos para companhias que investem em infraestrutura de redes de transmissão e distribuição de energia, o Decreto Executivo de 656 de 2014 que isenta peças e componentes eólicos de impostos e o Decreto Ministerial 538 de 2015 que reduz impostos e concede linhas de crédito

especiais para projetos de geração distribuída. O Quadro 2.3 resume toda a regulamentação aplicada às fontes renováveis de energia no Brasil (Melo et al., 2016).

Quadro 2.3 - Legislação de incentivos às fontes renováveis de energia no Brasil

Ano	Regulamentação	Característica
2002	Lei nº 10.438 PROINFA	- Cria um programa de incentivo, por meio de <i>feed-in tariffs</i> , a alguns tipos de fontes de energia renovável: parques eólicos, PCHs e biomassa
2004	Lei nº 10.848 Leilões	- Define as regras de operação dos mercados de energia no país e lança diversos tipos de leilões
2007	Lei nº 11.448	Concede isenção de impostos às companhias que investem em projetos de infraestrutura de redes de energia
2012	RN 482 da ANEEL	Define as condições para pequenos produtores de energia elétrica inserir sua energia na rede da concessionária local, por meio de <i>net-metering</i>
2014	Decreto Executivo 656	Isenção de impostos sobre componentes de turbinas eólicas
2015	Decreto Ministerial 538	Redução de impostos e linhas de crédito especiais para projetos de geração distribuída

Fonte: (Melo, 2016).

Uma outra forma de comercializar energia elétrica gerada a partir do biogás é por meio do mercado livre de energia, gerido pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). A CCEE foi criada em 2004, substituiu a Administradora de Serviços do Mercado Atacadista de Energia Elétrica – ASMAE (1999) e o Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAE (2000). A CCEE viabiliza e coordena as atividades de compra e venda de energia em todo o Sistema Interligado Nacional (SIN), o que envolve aspectos regulatórios, operacionais e tecnológicos. A CCEE reúne empresas de geração pública, produtores independentes, distribuidoras, importadoras e exportadoras de energia, consumidores livres e especiais de todo o país e atua desde a medição da energia gerada e consumida até a liquidação financeira dos contratos de compra e venda de energia (CCEE, 2017a).

Apesar do enorme potencial, são poucas as usinas termoelétricas a biogás no Brasil. Por meio da Resolução Normativa no 390/2009 (RN 390), no final de 2009, a ANEEL regulamentou a geração a partir do biogás e comercialização, em que as distribuidoras podem realizar chamadas públicas para a compra de energia elétrica de plantas de biodigestão (CCEE, 2017b). As pessoas físicas ou jurídicas proprietárias de centrais geradoras com potência superior a 5.000 kW podem requerer à ANEEL seu registro como fornecedor de energia na CCEE. Este requerimento garante a autorização para a exploração do empreendimento. A construção do empreendimento pode se iniciar após a análise de seu requerimento. As centrais geradoras referidas pela RN 390 não compreendem as usinas hidráulicas, eólicas, nucleares ou fotovoltaicas (ANEEL, 2009). A central geradora só poderá de fato se conectar ao sistema elétrico e iniciar suas operações de fornecimento de energia após obter a autorização pela ANEEL e celebração dos contratos de conexão e uso da rede elétrica (ANEEL, 2013). Às centrais geradoras com potência inferior a 5.000 kW está assegurada a conexão na rede elétrica, porém não são atendidas pela RN 390 para ingressarem no mercado livre de energia (ANEEL, 2009).

A ANEEL define três tipos de consumidores, o Consumidor Livre, o Consumidor Livre Especial e o Consumidor Cativo, com critérios diferentes para cada um aderir ao mercado livre de energia elétrica conforme os requisitos a seguir:

- Consumidor Livre:

- Possuir o montante de uso do sistema de distribuição maior ou igual a 3 MW, se conectado à rede elétrica após 08/07/1995 ou;
- Possuir o montante de uso do sistema de distribuição maior ou igual a 3 MW, com tensão maior ou igual a 69 kV, se conectado à rede elétrica antes de 08/07/1995.

- Consumidor Especial:

- Possuir o montante de uso do sistema de distribuição maior ou igual a 3 MW e tensão menor que 69 kV, se conectado à rede elétrica antes de 08/07/1995 ou;
- Possuir o montante de uso do sistema de distribuição entre 0,5 e 3 MW ou;

- Possuir conjunto de unidades consumidoras, cada uma com montante de uso do sistema de distribuição maior ou igual a 0,03 MW, reunidas em comunhão que totalize o montante de uso do sistema de distribuição maior ou igual a 0,5 MW.
- Consumidor Cativo:
 - Para o Consumidor Cativo, a companhia de distribuição operante no local de sua instalação é o fornecedor compulsório de energia elétrica, com tarifa regulada, isonômica para uma mesma classe. Assim o Consumidor Cativo não tem a liberdade de comprar energia elétrica de qualquer empresa geradora.

A comunhão descrita nos requisitos do Consumidor Especial ocorre quando uma unidade consumidora não tenha sozinha a demanda suficiente para participar do ambiente de contratação livre. Essa comunhão pode ser de fato, quando as unidades consumidoras que se unem estão situadas em área contígua ou de direito, quando as unidades possuem mesma raiz de CNPJ e estão situadas no mesmo submercado.

O consumidor livre pode comprar energia especial ou não especial. Por energia especial entende-se por aquela proveniente de fonte solar, eólica, biomassa, PCH ou central geradora hidrelétrica. Já o Consumidor especial pode comprar apenas energia especial. Isso é uma forma de incentivo legal ao uso de fontes renováveis de energia, uma vez que o consumidor com demanda contratada entre 500 e 3000 kW só poderia ser consumidor especial, caso queira comprar energia na CCEE, que pode ser mais barata do que quando se é consumidor cativo (não livre), por haver concorrência entre as concessionárias e livre acordo vendedor/comprador (Silva, 2016 e CCEE, 2017c).

2.4.5. Benefícios econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos da criação de uma política de incentivo ao uso e produção do biogás no Brasil

A criação de um programa nacional que incentive o uso e produção de biogás no Brasil poderia trazer diversos benefícios econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos.

A geração de energia elétrica é essencial para o desenvolvimento humano, mas é necessário reduzir o uso de fontes não renováveis de energia, para diminuir a poluição ambiental e aumentar a qualidade de vida das pessoas. Dessa forma o biogás de digestão anaeróbica se apresenta como uma excelente alternativa, pois além de tratar diversos resíduos ambientalmente também gera energia. Além disso, o biogás é adequado para a geração distribuída, o que é uma tendência em todos os países (Dos Santos et al., 2016; Felipe et al., 2016).

Em dezembro de 2015, na 21ª Conferência das Partes (COP-21), em Paris, 187 países submeteram suas Contribuições Nacionalmente Determinadas Pretendidas, (iNDC, na sigla em inglês), ao que ficou conhecido como Acordo de Paris. Essas contribuições são ações climáticas que cada país se comprometeu a fazer para reduzir os níveis de CO₂ emitidos na atmosfera para que a temperatura média no planeta não avance 2 °C se comparada ao período anterior à era industrial (Den Elzen et al., 2016; Van Soest et al., 2017). O Brasil comprometeu-se a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025, e uma redução de 43% até 2030 (MMA, 2016). Políticas e investimentos em fontes renováveis de energia se tornam uma opção interessante para alcançar essas metas. Neste contexto o biogás é uma opção ambientalmente amigável.

Além da digestão anaeróbica ser uma maneira de tratar resíduos orgânicos da produção pecuária, o biogás proveniente desse tratamento, ao ser usado para fins energéticos, pode substituir a madeira e querosene em países não desenvolvidos e gases de efeito estufa serão evitados também pela substituição de fertilizante químico pela matéria orgânica biodigerida, Figura 2.9 (Surendra et al., 2014).

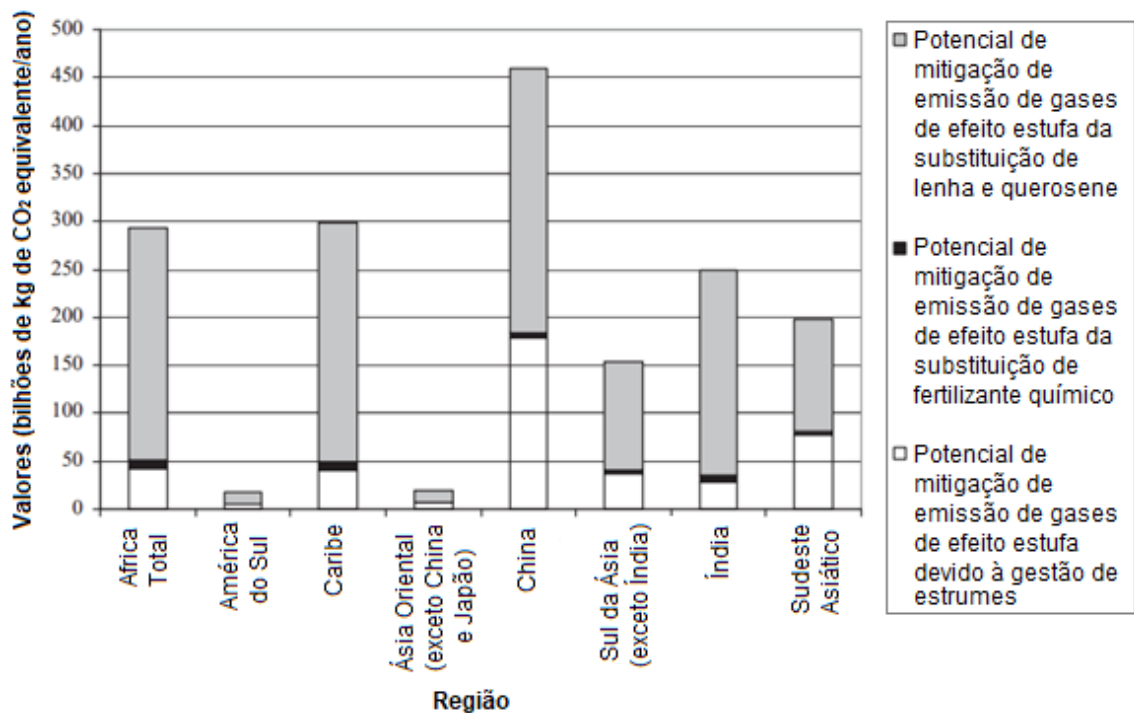


Figura 2.9 - Mitigação da emissão de gases de efeito estufa por digestão anaeróbica de resíduos pecuários.

Fonte: (Surendra et al., 2014).

A tecnologia mais usada no Brasil para a conversão do biogás em energia elétrica são os motogeradores a diesel adaptados para o biogás, embora essa não seja a forma mais eficiente. Uma tecnologia de conversão ideal seriam as turbinas a gás, porém são muito caras. A adoção do PNBg vai acelerar a adoção de tecnologias de produção do biogás e sua conversão em energia elétrica ainda não disseminadas no país (Lybæk et al, 2013; Sorda et al., 2013). O Proinfa previu um investimento de R\$ 4 bilhões na indústria nacional de equipamentos relacionados à geração de energia renovável (MME, 2004). Muitas companhias estrangeiras, especialmente de turbinas eólicas, abriram filiais no Brasil para atender a condição do governo de que pelo menos 60% dos componentes das plantas de geração deveriam ser fabricados no país (Silva et al., 2016), o que traz benefícios tecnológicos e sociais com a geração de empregos.

O maior benefício social que se pode esperar de uma política energética é a geração de emprego e renda. A aplicação das FITs na Alemanha para incentivo ao uso de fontes renováveis de energia gerou empregos devido especialmente ao crescimento dos setores de tecnologia e construção civil. Segundo a Enercon, empresa alemã fabricante de tecnologia para geração

eólica, o setor de energias renováveis será responsável pela criação de até 710 mil postos de trabalho até 2030 na Alemanha (Aquila et al., 2017). O Proinfa previu a criação de 150 mil postos de trabalho diretos e indiretos durante a construção e operação das usinas inicialmente planejadas pelo programa (MME, 2004).

O aumento de 1% no consumo total de energia renovável no Brasil implica no aumento de 0,2% do Produto Interno Bruto. A elasticidade do PIB para energias renováveis no Brasil é maior do que para a Eurásia. O impacto do consumo total de energia não renovável no Brasil é praticamente não significativo no aumento do PIB (Pao e Fu, 2013). Um programa de incentivo a fontes renováveis também ocasionam investimentos nacionais provenientes do setor privado. O Proinfa gerou investimento privado da ordem de R\$ 8,6 bilhões (MME, 2004).

Um programa nacional de incentivo ao uso e produção de biogás no Brasil não focaria no desenvolvimento específico de determinadas regiões do país, como foi com o PNPB, pois a produção de biogás se daria, a princípio, pelo aproveitamento de resíduos onde já há produção agropecuária. Porém nada impede que seja gerado biogás a partir do tratamento de águas residuárias, resíduos sólidos urbanos e até mesmo a partir de vegetais exclusivamente cultivados para fins energéticos.

2.4.6. Desafios políticos e tecnológicos da implantação de um Programa Nacional de Produção e Uso do Biogás no Brasil

Um programa nacional que incentive a produção e uso de biogás pode ir contra o interesse de fornecedores de energia a partir de outras fontes, uma vez que os produtores de biogás poderiam ser encarados como concorrentes em potencial. Isso seria um desafio político. O Pró-Álcool, por exemplo, contou com uma forte pressão do governo sobre os fabricantes de veículos até que estes finalmente assinaram, em 1979, um protocolo se comprometendo a desenvolver tecnologias e produzir motores que funcionassem a álcool. O foco no uso da soja também levou a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) a influenciar na elaboração das políticas do PNPB (Rathmann et al., 2012; Stattman et al., 2013). No Brasil, a evolução no

mercado de energia, como exemplificado pelos biocombustíveis, é ligada à influência política e econômica de grandes produtores e indústria (Flexor e Kato, 2017).

A inserção das fontes renováveis na matriz elétrica de um país enfrenta como principal desafio os altos custos das tecnologias associadas a elas e uma pior relação custo-benefício se comparadas às tradicionais fontes fósseis. Dessa forma é necessária alguma vantagem econômica para as fontes renováveis competirem com as fontes tradicionais (Abolhosseini e Heshmati, 2014; Aquila et al., 2017). Nos Estados Unidos diversas plantas de produção de biogás em larga escala não conseguiram se manter no mercado de energia devido ao baixo preço do petróleo e gás. Devido ao mesmo motivo, a implantação de programas de biogás na Malásia e Indonésia foram postergados (Lim, 2016).

Como as fontes renováveis não convencionais apresentam pior relação custo-benefício do que as fontes fósseis de energia, sua adoção pelo setor privado especialmente, não se dará de forma espontânea, já que o objetivo principal do setor é o lucro. A inserção de fontes renováveis na matriz de energia de um país não visa o lucro a curto prazo como objetivo principal, mas sim vantagens ambientais e estratégicas. Quatro diferentes domínios políticos tem atuado no Brasil e no mundo para a promoção de fontes renováveis, são eles o setor agrícola e comercial mas em especial o setor de energia e meio ambiente (Stattman et al., 2013).

O que mais limita a disseminação do uso do biogás em países em desenvolvimento são os custos iniciais de instalação da planta e a falta de serviços especializados de manutenção. A purificação do biogás pra obter biometano continua um desafio técnico específico, a amônia (NH_3) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) presentes no biogás danificam peças de motores, em contato direto com metais (Lim, 2016).

Embora a disponibilidade e forma de uso de energia seja um fator crítico para o desenvolvimento humano, este tópico não recebe a devida atenção em debates políticos, perdendo espaço para assuntos mais polêmicos como educação, saúde e segurança pública. Além disso, a implementação de tecnologias referentes às energias renováveis não são foco da maioria dos cursos de engenharia atualmente ofertados pelas universidades em países em desenvolvimento. Isso faz com que raramente existam profissionais

competentes para lidar com vários aspectos do uso e geração de energias renováveis, principalmente o biogás (Surendra et al., 2014).

O Ministério de Minas e Energia (MME) no Brasil é o principal responsável por fomentar e implementar as políticas energéticas no país. Porém, além de ineficiência organizacional, o MME enfrenta forte influência da Petrobras e da Eletrobras nos processos de tomada de decisão. Isso mostra sua fraca estrutura institucional. A Petrobras e a Eletrobras são companhias energéticas que poderiam perder grandes mercados de energia devido a difusão de fontes renováveis não convencionais, ou seja, todas as renováveis exceto as grandes hidrelétricas. Essas duas companhias têm interesse direto em atrasar toda iniciativa de promoção das fontes renováveis de energia não convencionais. Em vez da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criar condições favoráveis para o desenvolvimento do mercado de energia, com a diversificação da matriz e implementação de fontes renováveis não convencionais, a agência é altamente influenciada pelas companhias de fornecimento de energia, principalmente as concessionárias de distribuição, que são contra a o desenvolvimento da geração distribuída. Em vez da ANEEL ser uma instituição forte e independente, sua capacidade de implementação de políticas energéticas é limitada pela sua dependência política do MME o que resulta em uma lentidão extrema em colocar em prática regulamentações e procedimentos relativos à geração distribuída por meio de fontes renováveis não convencionais (Melo et al., 2016).

As fontes fósseis apresentam menor custo de produção do que o biogás, mas este possui a vantagem de ser produto do tratamento ambiental de dejetos poluidores, que emitem gases de efeito estufa na atmosfera. Considerando não apenas o custo de produção do biogás, mas também o serviço ambiental associado à sua obtenção como, por exemplo, melhoria da qualidade do ar nos arredores da planta de biodigestão e diminuição nos gastos de saúde pública (relativa à tratamento de esgotos, por exemplo), a viabilidade econômica do biogás será aumentada. Logo, dependendo de quanto valem essas questões ambientais relacionadas ao uso do biogás, este pode ser uma fonte economicamente mais vantajosa do que as fontes fósseis.

2.4.7. Inserção do biogás na matriz energética brasileira

O biogás é uma fonte de energia versátil no que diz respeito às suas aplicações. Pode ser canalizado para ser transportado para locais de uso diferentes dos locais de produção. O biogás pode ser usado em motores a combustão externa e interna. Pode ser comprimido para transporte em tanques de gás comprimido. O biogás também pode ser misturado ao gás natural após purificado e injetado nas redes de gás para uso residencial ou veicular (Lim, 2016; Strzalka et al., 2017), que é uma prática muito comum da Suécia, por exemplo, que por meio de políticas de suporte à fonte renovável inseriu o biogás como um dos principais combustíveis no sistema de transporte do país (Larsson et al., 2016). Outros países da Europa e Ásia também tiveram experiências com o biogás no uso automotivo. Motores com ignição por centelhamento, a gasolina, por exemplo, são facilmente convertidos para o uso do biogás purificado. É usada a mesma técnica de converter os motores a gasolina para gás natural (Coimbra-Araújo et al., 2014), já utilizada no Brasil. Como o poder calorífico do biogás purificado não é tão alto quanto diesel ou gasolina, ele é ideal para veículos que operam a curtos trajetos como ônibus urbanos e táxis. E seu uso no transporte em vez da conversão elétrica ou aquecimento é ainda melhor no que diz respeito à emissão de gases de efeito estufa (Strzalka et al., 2017).

Da mesma forma que a produção e uso do álcool e biodiesel foi estimulada por meio da adição compulsória desses biocombustíveis na gasolina e diesel de petróleo (AFIFF et al., 2013), um PNBg poderia exigir a adição de biometano (biogás purificado) no GLP e GNV. Dessa forma um mercado para o biometano seria criado. Para dar tempo de o mercado se adaptar a essas novas exigências, percentagens cada vez maiores de biometano no GLP e GNV seriam estipuladas no decorrer de alguns anos. No caso do PNPB, as adições compulsórias de biodiesel no diesel de petróleo fez com que a produção de biodiesel no Brasil saltasse de 736 m³ em 2005, logo após a implantação do PNPB, para 3,419,838 m³ em 2014, criando empregos, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e ajudando a despoluir a matriz energética, ou seja, a produção e utilização de biogás é um serviço ambiental (De Oliveira e Coelho, 2017).

O gás natural tradicional utilizado no país é extraído junto de reservas de petróleo, composto de mais de 70% metano (CH_4 , o mesmo constituinte principal do biogás), menos de 2% de propano (C_3H_8) e etano (C_2H_6). O gás natural veicular é metano, obtido a partir da purificação do gás natural (ANP, 2017).

O Brasil importa atualmente quase metade do gás natural consumido no país (Figura 2.10), especialmente da Bolívia. Em 2015, dos 102,58 milhões de m^3/dia de gás natural ofertado no país, 50,43 milhões foram importados. Em 2014 mais de 50% do gás natural foi importado (MME, 2016). Quanto maior a produção de biogás, mais perto da independência de gás natural seria o Brasil.

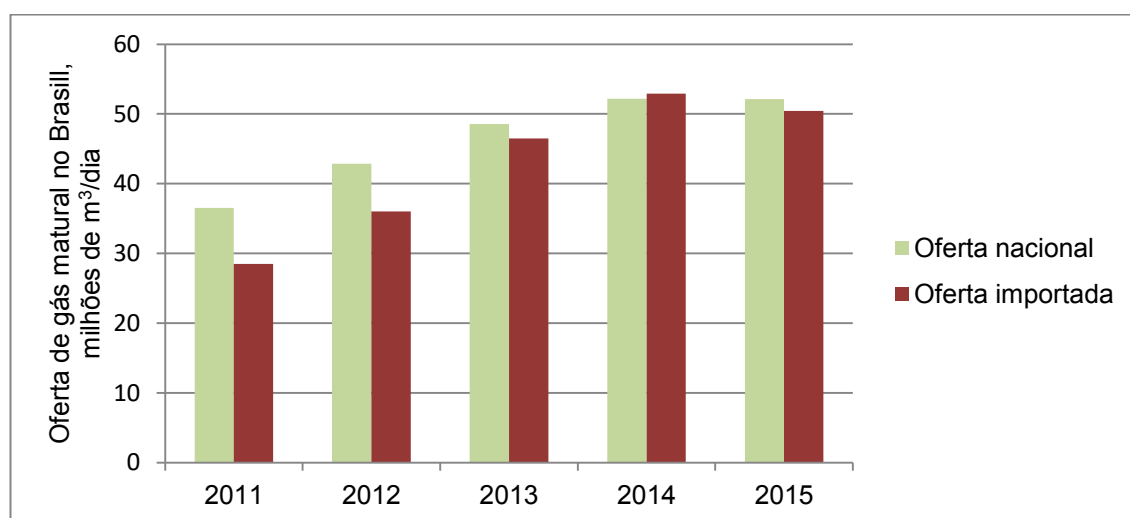


Figura 2.10 - Balanço anual de gás natural no Brasil.

Fonte: (MME, 2016).

A oferta total de energia elétrica no Brasil em 2015 foi de 615,9 TWh, dos quais 64,0% (394,2 TWh) foi de fonte hidráulica (Figura 2.11), e 12,9% de gás natural, substituível facilmente por biogás (EPE, 2016).

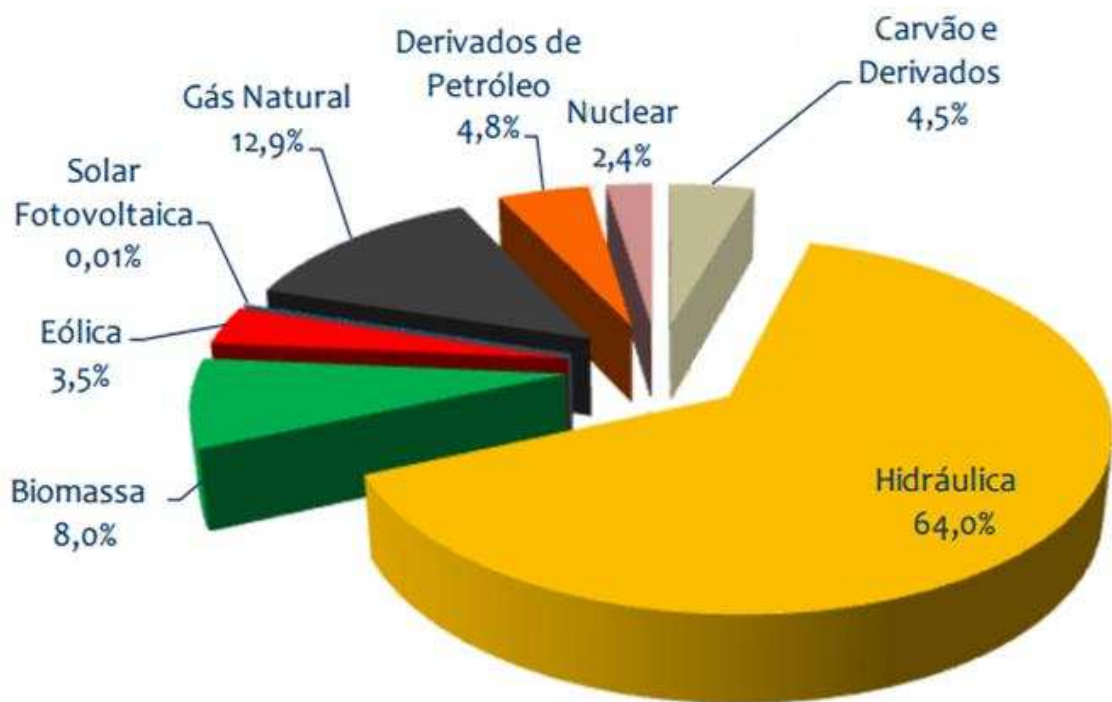


Figura 2.11 - Matriz elétrica Brasileira de 2015.

Fonte: (EPE, 2016).

A participação de fontes renováveis na matriz de energia elétrica do Brasil é motivo de orgulho para o país no cenário mundial. Porém essa taxa tem diminuído nos últimos anos, Figura 2.12, com exceção de 2015, que devido à queda na economia nacional, houve uma queda na demanda de energia, especialmente de fontes fósseis. Nas termoeletricas o gás natural é responsável por 39,7% de toda a geração (EPE, 2016). A substituição parcial desse gás natural pelo biogás contribuiria para a manutenção de uma matriz energética cada vez mais limpa, embora tal empreendimento implicaria na construção de sistemas de transporte (gasodutos) ou compressão do biogás, caso seja gerado em plantas descentralizadas.

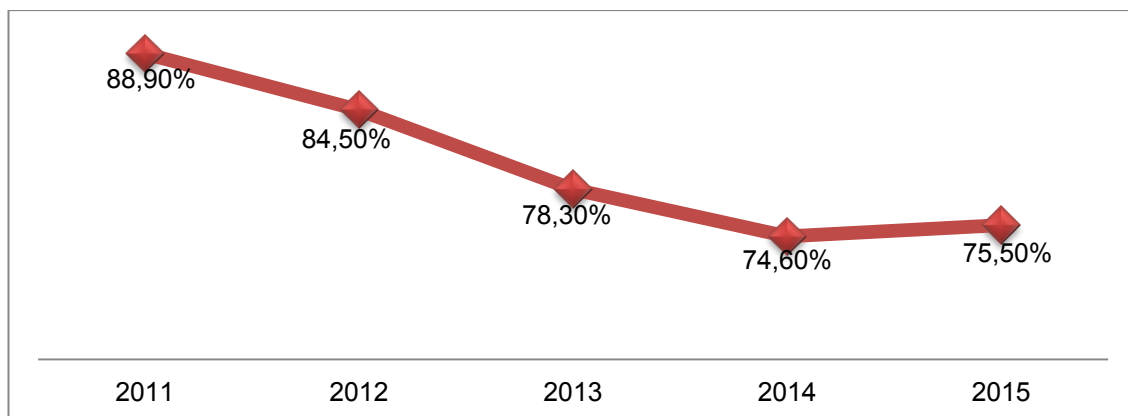


Figura 2.12 - Participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira.

Fonte: (EPE, 2016).

Na geração distribuída de energia elétrica, o mecanismo mais importante para a promoção das fontes renováveis são as *feed-in-tariffs*, os sistemas de cotas de crédito e os leilões de energia (Aquila et al., 2017). Nas FITs a concessionária é obrigada a comprar a energia gerada pelo consumidor pelo preço que o consumidor pagaria à concessionária.

Nos sistemas de cotas de crédito a concessionária não é obrigada a comprar e absorver toda a energia do consumidor produtor, o consumidor fica vulnerável às oscilações do mercado de energia. A energia gerada é medida e certificada por uma autoridade governamental. Esses certificados de crédito de energia podem ser comercializados de forma semelhante ao estabelecido pelo protocolo de Kyoto, com a venda de créditos de carbono. Nos leilões de energia, em um evento organizado pelo governo, empresas de energia renovável apresentam suas propostas de capacidades de fornecimento de potência com um preço por unidade de energia que elas podem gerar. Posteriormente o governo avalia as propostas e assina um contrato de compra de energia com os vendedores (Atalay et al., 2017).

Além das adições mandatórias de biocombustível no combustível fóssil, que é um exemplo prático que pode ser copiado do PNPB e Pró-Álcool para o biogás, outras ações que foram tomadas pelo governo para incentivar a maior produção do biodiesel e álcool podem ser aplicadas em um PNPg, como isenções de impostos sobre a venda de energia a partir do biogás, incentivos para a produção de motores veiculares adequados ao biometano e compra pelo público, subsídios para a produção de biomassa e compensação pelo custo adicional do biogás sobre o gás natural e suporte para pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias associadas ao uso do biogás (Flexor e Kato, 2017). Todos esses incentivos à produção e uso do biogás podem ser economicamente justificados por esta opção ser “despoluente” ao minimizar os impactos que os resíduos agrícolas causam ao meio ambiente.

2.4.8. O biogás como fonte energética passível de reduzir a demanda de ponta da concessionária

Atualmente as concessionárias de energia elétrica definem dois diferentes intervalos de tempo durante o dia para tarifação da energia consumida e

potência demandada por consumidores não residenciais. O horário de ponta (HP) e o horário fora de ponta (HFP). O HP é o período de três horas consecutivas em que a distribuidora define como sendo de maior carga de seu sistema, e não inclui sábados, domingos e feriados nacionais. O HFP são todas as 21 horas restantes do dia (ANEEL, 2011).

O preço da energia e da demanda é mais alto no HP para incentivar os consumidores a consumirem energia no outro horário (Mallick e Maruf, 2016), pois no HP a rede elétrica atende um pico de demanda, é o horário de maior solicitação de potência elétrica. Para os consumidores em que se diferencia o preço da demanda HP e HFP, a demanda, em R\$/kW é mais de 3 vezes mais alto no HP se comparado ao HFP. As tarifas de consumo, em R\$/kWh, é pouco mais de 50% mais alto no HP do que no HFP (CEMIG, 2011).

A potência gerada por uma central hidrelétrica é aproximadamente constante no decorrer de um dia, tendo geralmente um reservatório que permite aumento da potência elétrica gerada até certo limite, quando demandado pela rede, no HFP. Períodos de seca podem influenciar na geração hidrelétrica. A energia eólica não oferece a mesma flexibilidade de geração de energia elétrica como as hidrelétricas, pois a velocidade do vento em determinado local geralmente varia durante todo o dia, não se pode prever ou garantir uma velocidade mínima por um período de tempo e momento pré-estabelecido. A energia solar fotovoltaica também não é flexível ou muito previsível, uma vez que os painéis geradores praticamente não funcionam durante a noite, além de ter sua potência gerada reduzida com nebulosidades, que também não são facilmente previsíveis. Desse modo um sistema fotovoltaico não oferece confiabilidade para o fornecimento de potência em horários pré-definidos, não se pode contar com essa tecnologia para diminuir a demanda de ponta das hidrelétricas e termoelétricas. O biogás é uma fonte energética que além de ser uma forma de tratamento ambiental de resíduos orgânicos, pode ser facilmente armazenado para ser convertido em energia elétrica nos horários de maior interesse/demanda do sistema, em que a energia é mais cara. Além disso o biogás oferece uma grande flexibilidade e garantia de fornecimento de demanda, devido a simplicidade de seu armazenamento, podendo ser usado para balancear flutuações na demanda do sistema. O biogás então não têm as inconveniências das fontes eólica ou fotovoltaica. A geração elétrica a partir do biogás está limitada apenas à disponibilidade da

matéria orgânica e manutenção da planta de geração e biodigestão (Ju et al., 2016; Peng et al., 2016; Lauer et al., 2017).

Quando se tem geração em excesso de alguma fonte renovável, como eólica ou solar, este excedente de energia pode ser utilizado para a produção de hidrogênio por hidrólise. Este hidrogênio reage com o dióxido de carbono de uma planta de produção de biogás o que resulta no biometano, com um maior poder calorífico do que o biogás. Esta tecnologia oferece um armazenamento mais denso de energia do que o biogás (Strzalka et al., 2017).

A Figura 2.13 e a Figura 2.14 ilustram as curvas de carga típicas dos consumidores residenciais e comerciais conectados à rede elétrica por meio da RN 482, até o dia 23 de maio de 2017, comparadas com a curva típica diária de geração fotovoltaica dos mesmos consumidores ao longo de um dia típico (ANEEL, 2017). A geração fotovoltaica não corresponde às necessidades momentâneas de demanda dos consumidores. Com o biogás seria possível a adequação das curvas com garantia de fornecimento no decorrer de todo o dia, ou gerar conforme decisão do operador da planta.

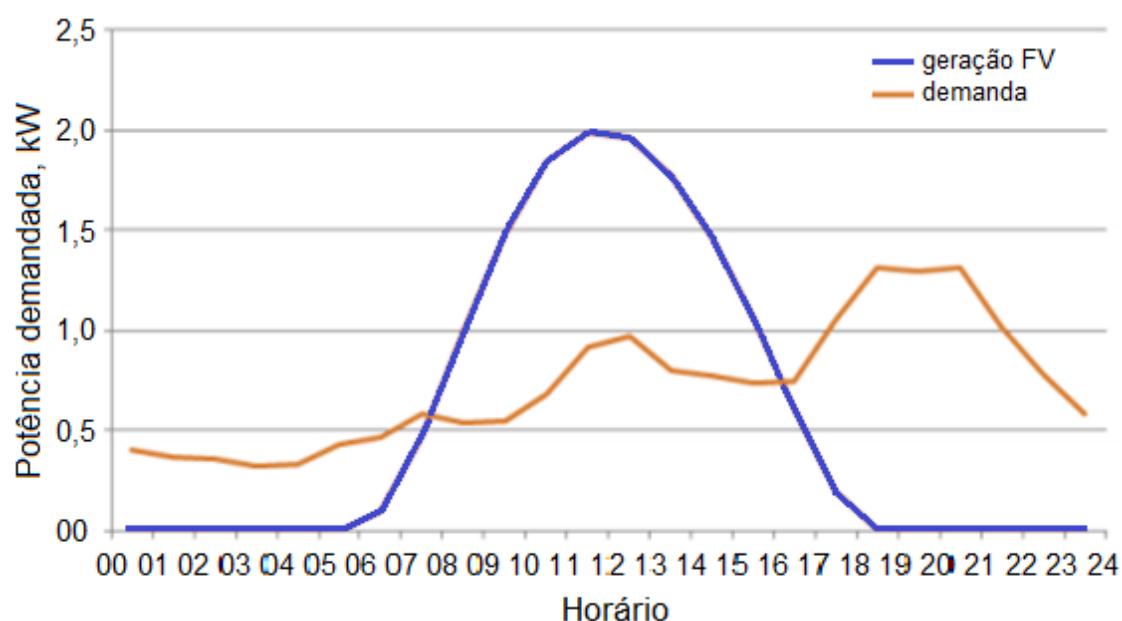


Figura 2.13 - Demanda residencial e geração solar fotovoltaica típicas.

Fonte: (ANEEL, 2017).

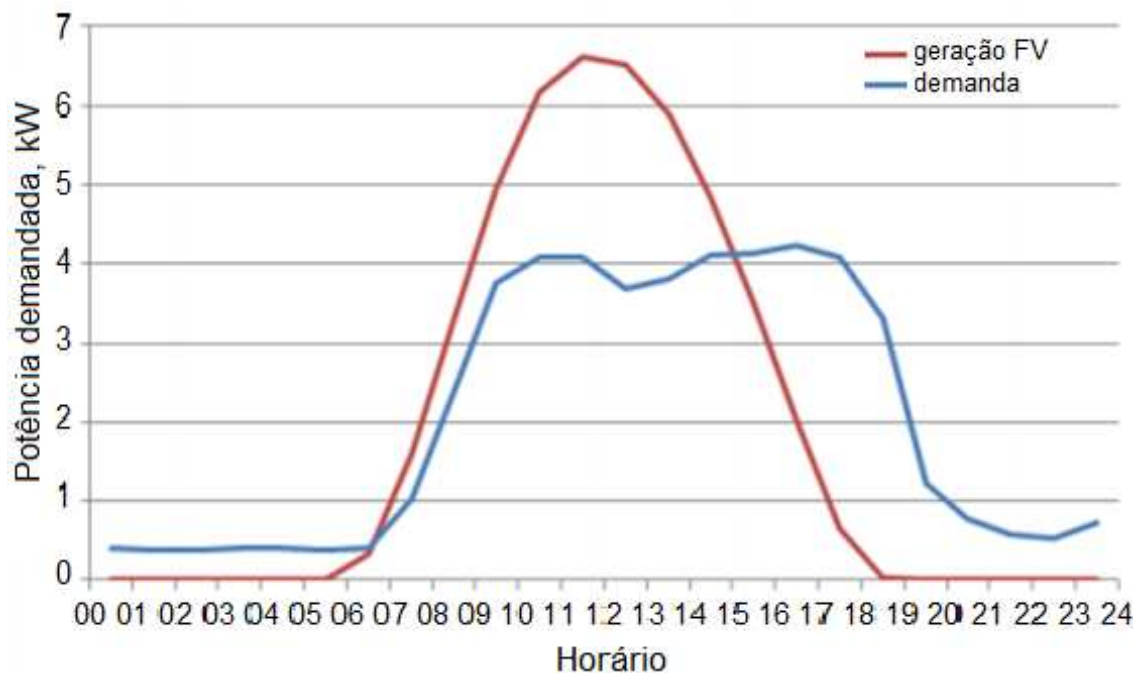


Figura 2.14 - Demanda comercial e geração solar fotovoltaica típicas.

Fonte: (ANEEL, 2017).

A situação ideal para um melhor atendimento da curva de carga de um sistema elétrico interligado é a geração distribuída integrando diversas fontes, como a fotovoltaica e eólica, mas com atenção especial ao manejo do biogás, que é uma fonte com alta flexibilidade e confiabilidade de fornecimento (Felipe et al., 2016; Peng et al., 2016). A geração descentralizada por meio de diversas fontes aumenta a confiabilidade e por isso a qualidade do sistema, reduz congestionamento das redes, a necessidade de suprimento de potência de pico e permite a redução de custos com transmissão e distribuição, as perdas são menores do que um sistema de geração centralizada (Melo et al., 2016; Strzalka et al., 2017).

2.5. CONCLUSÕES

Para que o biogás se torne uma fonte economicamente viável e explorada comercialmente em nível nacional, é necessária a implantação de uma política clara que regulamente e ofereça incentivos fiscais associados ao seu uso e produção.

A Alemanha e a Dinamarca inseriram o biogás de forma significativa em suas respectivas matrizes de energia, de forma economicamente viável. Mas para isso foram necessários políticas energéticas de incentivo à produção e uso do biogás e anos de desenvolvimento tecnológico.

Em geral, a demanda de energia cresce com o poder econômico de uma nação. Por isso, existe a necessidade de contínuo aumento na oferta de energia. Em vez de elevar as potências instaladas das plantas tradicionais a combustíveis fósseis, a criação de políticas de incentivo ao uso das fontes renováveis de energia na matriz elétrica nacional, como a RN 482 da ANEEL ou a implantação de *feed-in-tariffs* permite a postergação ou eliminação de investimentos em termoelétricas movidas a combustíveis fósseis.

Por consequência da inserção significativa do biogás na matriz de energia elétrica do Brasil, serão evitadas a emissão de toneladas de CO₂ na atmosfera, cooperando para o efetivo cumprimento de metas de geração renovável de energia e tratados internacionais que visam a menor devastação do meio ambiente, devido às atividades humanas de exploração de recursos naturais e produção industrial, se tornando uma possível solução para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, agropecuários e de esgotos no Brasil.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abolhosseini, S.; Heshmati, A. The main support mechanisms to finance renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 876–885, 2014.

ABRACICLO - Associação Brasileira Dos Fabricantes De Motocicletas Ciclomotores Motonetas Bicicletas E Similares. Anuário da Indústria Brasileira de Duas Rodas 2013 [Two Wheels Brazilian Industry Yearbook], 2013.

Afiff, S.; Wilkenson, J.; Carriquiry, M.; Jumbe, C.; Searchinger, T. Biofuels and food security. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. Royal Netherlands Institute of Southeast Asian and Caribbean Studies (KITLV), 2013.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 390 de 15 de dezembro de 2009, 2009. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2009390.pdf>>

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa No 414, de 9 de setembro de 2010, 2011. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa No 546 de 16 de abril de 2013, 2013. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013546.pdf>>

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica_0056_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9>.

ANP – Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/gas-natural>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

ANP - Agência Nacional De Petróleo - Gás Natural E Biocombustíveis. Dados Estatísticos. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/dados-estatisticos>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

Aquila, G.; Pamplona, E. O.; Queiroz, A. R.; Rotela Junior, P.; Fonseca, M. N. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, n. October 2015, p. 1090–1098, 2017.

Atalay, Y.; Kalfagianni, A.; Pattberg, P. Renewable energy support mechanisms in the Gulf Cooperation Council states: Analyzing the feasibility of feed-in tariffs and auction mechanisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, n. November 2016, p. 723–733, 2017.

Auer, A.; Vande, B.; Nathan, H.; Abram, F.; Barry, G.; Fenton, O.; Markey, B. K.; Nolan, S.; Richards, K.; Bolton, D.; Waal, T.; Gordon, S. V.; O'Flaherty, V.; Whyte, P.; Zintl, A. Agricultural anaerobic digestion power plants in Ireland and Germany: policy and practice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 97, n. 3, p. 719–723, 2017.

Bond, T.; Templeton, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, v. 15, n. 4, p. 347–354, 2011.

C2ES. Anaerobic Digesters - Center for Climate and Energy Solutions. Disponível em: <<https://www.c2es.org/technology/factsheet/anaerobic-digesters>>. Acesso em: 3 jun. 2017.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-somos/razao-de-ser?_adf.ctrl-state=1cgsw59pg7_4&_afLoop=1862920145688725#%40%3F_afLoop%3D1862920145688725%26_adf.ctrl-state%3D18nl6obv17_4>. Acesso em: 24 jun.

2017a.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=8hm37yrqx_4&_afLoop=1932177593125259#%40%3F_afLoop%3D1932177593125259%26_adf.ctrl-state%3Dc4qm6f1g_151>. Acesso em: 25 jun. 2017b.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso_rapido_header_publico_nao_logado/faq/faq_detalhe?categoriaFaqlId=CCEE_383107&contentId=CCEE_386128&assuntoFaqlId=CCEE_383105&_adf.ctrl-state=19eocj0c8o_17&_afLoop=208010474720841#%40%3FcategoriaFaqlId%3DCCEE_38310>. Acesso em: 20 maio. 2017c.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Manual de Gerenciamento de Energia, 2011. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/CEMIGD1011-0718_Manual_de_Gerenciamento_de_Energia_2011_21x28cm_BAIXA_29-05_AFS.pdf>

César, A. Da S.; Batalha, M. O. Brazilian biodiesel: The case of the palm's social projects. *Energy Policy*, v. 56, p. 165–174, 2013.

Coimbra-Araújo, C. H.; Mariane, L.; Bley Júnior, C.; Frigo, E. P.; Frigo, M. S.; Araújo, I. R. C.; Alves, H. J. Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.

Corrêa Da Silva, R.; De Marchi Neto, I.; Silva Seifert, S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 328–341, 2016.

Oliveira, F. C.; Coelho, S. T. History, evolution, and environmental impact of biodiesel in Brazil: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, n. July 2015, p. 168–179, 2017.

Den Elzen, M.; Admiraal, A.; Roelfsema, M.; van Soest, H.; Hof, A. F.; Forsell,

N. Contribution of the G20 economies to the global impact of the Paris agreement climate proposals. *Climatic Change*, v. 137, n. 3–4, p. 655–665, 2016.

dos Santos, I. F. S.; Vieira, N. D. B.; Barros, R. M.; Tiago Filho, G. L.; Soares, D. M.; Alves, L. V. Economic and CO₂ avoided emissions analysis of WWTP biogas recovery and its use in a small power plant in Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 17, p. 77–84, 2016.

EBA – European Biogas Association. EBA Biomethane & Biogas Report 2015 published! Disponível em: <<http://european-biogas.eu/2015/12/16/biogasreport2015/>>. Acesso em: 5 maio. 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Biodiesel pode tornar diesel mais barato. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2945806/biodiesel-pode-tornar-diesel-mais-barato>>. Acesso em: 10 out. 2017.

EPA – Environmental Protection Agency. Atmospheric Lifetime and Global Warming Potential Defined. Disponível em: <<https://www.epa.gov/climateleadership/atmospheric-lifetime-and-global-warming-potential-defined>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

EPE - Empresa De Pesquisa Energética. Brazilian Energy Balance. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>.

Felipe, I.; Barros, R. M.; Lucio, G.; Filho, Tiago. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, v. 126, p. 504–514, 2016.

Flexor, G.; Kato, K. Biofuels and inclusive development: the Brazilian experience. *Development in Practice*, v. 27, n. 2, p. 157–167, 2017.

Gebreegziabher, Z.; Naik, L.; Melamu, R.; Balana, B. B. Prospects and challenges for urban application of biogas installations in Sub-Saharan Africa. *Biomass and Bioenergy*, v. 70, p. 130–140, 2014.

German Biogas Association. Biogas production in Germany: Status quo and future trends. Disponível em: <http://www.handelskammer.dk/fileadmin/ahk_daenemark/Veranstaltungen/Bioenergi/4-20160301_EE_AHK-GR_Daenemark_PPP_Friedl_2016.pdf>.

Ghimire, P. C. SNV supported domestic biogas programmes in Asia and Africa. *Renewable Energy*, v. 49, p. 90–94, 2013.

Guilherme, J.; Belo, D.; Vasco, J.; Ittersum, M. K. V. Integrated assessment of biodiesel policies aimed at family farms in Brazil. *Agricultural Systems*, v. 131, p. 64–76, 2014.

Guo, M.; Song, W.; Buhain, J. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 712–725, 2015.

Hijazi, O.; Munro, S.; Zerhusen, B.; Effenberger, M. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 1291–1300, 2016.

Imran, H. A.; Schröder, D.; Munir, B. A. Agent-based simulation for biogas power plant potential in Schwarzwald-Baar-Kreis, Germany: a step towards better economy. *Geocarto International*, n. October, p. 1–12, 2016.

Ju, L.; Tan, Z.; Yuan, J.; Tan, Q.; Li, H.; Dong, F. A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind – photovoltaic – energy storage system considering the uncertainty and demand response. *Applied Energy*, v. 171, p. 184–199, 2016.

Larsson, M.; Gronkvist, S.; Alvfors, P. Upgraded biogas for transport in Sweden - Effects of policy instruments on production, infrastructure deployment and vehicle sales. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 3774–3784, 2016.

Lauer, M.; Dotzauer, M.; Hennig, C.; Lehmann, M.; Nebel, E.; Postel, J.; Szarka, N.; Thrän, D. Flexible power generation scenarios for biogas plants operated in Germany: impacts on economic viability and GHG emissions. *International Journal of Energy Research*, v. 41, n. 1, p. 63–80, 2017.

Lim, X. Uphill climb for biogas in Asia. *Chemical and Engineering News*, v. 94,

n. 19, p. 20–22, 2016.

Lino, F. A. M.; Ismail, K. A. R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. *Energy Policy*, v. 39, n. 6, p. 3496–3502, 2011.

Lybæk, R.; Christensen, T. B.; Kjær, T. Governing Innovation for Sustainable Development in the Danish Biogas Sector – a Historical Overview and Analysis of Innovation. *Sustainable Development*, v. 21, n. October 2012, p. 171–182, 2013.

Mallick, N. H.; Maruf, M. H. Analysis of Power Demand Response for Smart Home in Germany from End-User's Perspective Based on High Resolution Power Demand Model. 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT). *Anais...Dhaka, Bangladesh: 2016*

Marcossi, G. P. C.; Moreno-Pérez, O. M. A closer look at the Brazilian Social Fuel Seal: uptake, operation and dysfunctions. *Biofuels*, v. 7269, n. January, p. 1–11, 2017.

Melo, C. A.; Jannuzzi, G. D. M.; Bajay, S. V. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 61, p. 222–234, 2016.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Acordo de Paris. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 13 jun. 2017.

MME - Ministério De Minas E Energia. Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade de utilização de óleo vegetal – biodiesel como fonte alternativa de energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/galerias/arquivos/biodiesel/relatoriofinal.pdf>>. Acesso em: 5 maio. 2017.

MME - Ministério De Minas E Energia. O PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em: 5 maio. 2017.

MME - Ministério De Minas E Energia. Portal do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel#>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

MME - Ministério De Minas E Energia. Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural, 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138769/1732803/Boletim_Gas_Natural_nr_107_JAN_16.pdf/9a2fcf86-b7fe-445e-a481-6a58b7e1b689>

Nogueira, L. A. H. ; Capaz, R. S.; Souza, S. P.; Seabra, J. E. A. Biodiesel program in Brazil: learning curve over ten years (2005 – 2015). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, p. 728–737, 2016.

Pao, H. T.; Fu, H. C. Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 381–392, 2013.

Peng, C.; Xie, P.; Pan, L. ; Yu, R. Flexible Robust Optimization Dispatch for Hybrid Wind/Photovoltaic/Hydro/Thermal Power System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 2, p. 751–762, 2016.

Rathmann, R.; Szklo, A.; Schaeffer, R. Targets and results of the Brazilian Biodiesel Incentive Program – Has it reached the Promised Land? *Applied Energy*, v. 97, p. 91–100, 2012.

Raven, R. P. J. M.; Gregersen, K. H. Biogas plants in Denmark: successes and setbacks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, p. 116–132, 2007.

Roopnarain, A.; Adeleke, R. Current status, hurdles and future prospects of biogas digestion technology in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 1162–1179, 2017.

Rupf, G. V.; Bahri, P. A. ; De Boer, K. ; McHenry, M. P. Barriers and opportunities of biogas dissemination in Sub-Saharan Africa and lessons learned from Rwanda, Tanzania, China, India, and Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 468–476, 2015.

Salomon, K. R.; Eduardo, E.; Lora, S. Estimate of the electric energy generating

potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, p. 1101–1107, 2009.

Silva, T. N.; Freitas, F. S. N. De; Candiani, G. Evaluation of surface emissions of gas from large landfills. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 95–104, 2013.

Silveira, S.; Johnson, F. X. Energy Research & Social Science Navigating the transition to sustainable bioenergy in Sweden and Brazil : Lessons learned in a European and International context. *Chemical Physics Letters*, v. 13, p. 180–193, 2016.

Sorda, G.; Sunak, Y.; Madlener, R. An agent-based spatial simulation to evaluate the promotion of electricity from agricultural biogas plants in Germany. *Ecological Economics*, v. 89, p. 43–60, 2013.

Souza, S. N. M. DE et al. Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil : Landfill gas , biogas and thermal treatment. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association*, v. 32, n. 10, p. 1015–1023, 2014.

Souza, S. N. M. ; Lenz, A. M. ; Werncke, I.; Nogueira, C. E. C.; Antonelli, J.; Souza, J. Gas emission and efficiency of an engine-generator set running on biogas. *Engenharia Agrícola*, v. 36, n. 4, p. 613–621, 2016.

Stattman, S. L.; Hospes, O.; Mol, A. P. J. Governing biofuels in Brazil : A comparison of ethanol and biodiesel policies. *Energy Policy*, v. 61, p. 22–30, 2013.

Strzalka, R.; Schneider, D.; Eicker, U. Current status of bioenergy technologies in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, n. January, p. 801–820, 2017.

Surendra, K. C.; Takara, D. ; Hashimoto, A. G. ; Kumar, S. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.

Van Soest, H. L.; Reis, L. A.; Drouet, L.; van Vuuren, D. P. ; Den Elzen, M. G.

J. ; Tavoni, M.; Akimoto, K.; Calvin, K. V.; Fragkos, P.; Kitous, A.; Luderer, G.; Riahi, K. Low-emission pathways in 11 major economies: comparison of cost-optimal pathways and Paris climate proposals. *Climatic Change*, p. 1–14, 2017.

Wang, X.; Lu, X.; Yang, G.; Feng, Y.; Ren, G.; Han, X. Development process and probable future transformations of rural biogas in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 55, p. 703–712, 2016.

Watanabe, K.; Bijman, J.; Slingerland, M. Institutional arrangements in the emerging biodiesel industry: Case studies from Minas Gerais-Brazil. *Energy Policy*, v. 40, n. 1, p. 381–389, 2012.

Yang, L.; Ge, X.; Wan, C.; Yu, F.; Li, Y. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 1133–1152, 2014.

Capítulo 3: Potencial Brasileiro de Produção de Biogás em Sistemas Automatizados

3.1.INTRODUÇÃO

As bactérias que atuam no substrato orgânico no interior de um biodigestor anaeróbio sintetizam metano de forma ótima a determinadas condições de temperatura, acidez (pH), agitação, tempo de retenção hidráulica (TRH), entre outras. O controle dessas variáveis otimiza a produção de biogás. Dessa forma sistemas automatizados e controlados não apenas geram mais biogás, como também tratam de maneira mais eficiente os resíduos a serem biodigeridos. Mais biogás representa menor impacto ambiental, mais energia e, portanto, maior lucro na atividade principal que gera os resíduos orgânicos. Isso permite que o produto final da atividade se torne mais competitivo no mercado e acessível, com o lucro proveniente da energia do biogás sendo repassado ao produto final da atividade fim (Lybæk et al., 2013).

A produção de metano varia, entre outros fatores, com a temperatura do substrato. A Figura 15 apresenta a taxa específica de produção de metano em um biodigestor genérico (em gramas de metano por quilograma de sólidos voláteis ao dia) para: a) dejetos de gado e b) dejetos de suínos. Essas curvas foram obtidas por meio de ensaios em que todas as outras variáveis, como pH e tempo de retenção hidráulica, foram mantidas constantes, e iguais para todos os valores de temperatura experimentados (Elsgaard et al., 2016).

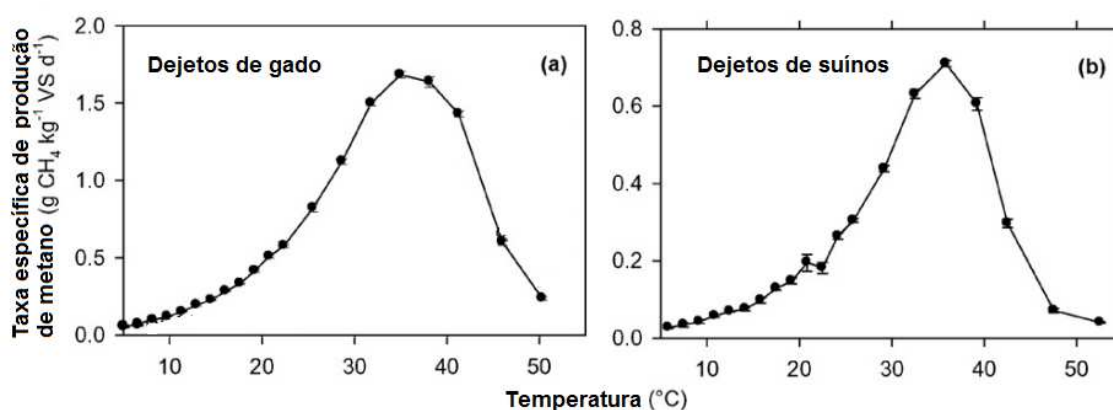


Figura 15 - Produção de metano em diferentes temperaturas de substrato.

Fonte: (Elsgaard et al., 2016).

O Potencial Biológico de Metano teórico ($P_{BMT_{eo}}$) é a quantidade máxima teórica de metano que é bioquimicamente possível se extrair de determinada quantidade de matéria orgânica, geralmente dado em litros de metano (nas CNTP) por grama de sólido volátil (L/g). O $P_{BMT_{eo}}$ é dado conforme a Eq. 1:

$$P_{BMT_{eo}} = \frac{\eta_{CH_4} R T}{p V_S} \quad (1)$$

em que:

R - constante universal dos gases, 0,082 atm L/mol K;

T - temperatura do biodigestor, 308 K;

P - pressão atmosférica, 1,0 atm;

V_S - sólidos voláteis do substrato, g; e

η_{CH_4} - metano molecular, mol.

A quantidade de metano molecular é calculada por meio da Eq. 2:

$$\eta_{CH_4} = \frac{D_{QO}}{64} \quad (2)$$

em que D_{QO} é a Demanda Química de Oxigênio da matéria orgânica a ser biodigerida (em g)(Nielfa et al., 2015).

O Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) é o período em que a matéria orgânica permanece no interior do biodigestor. Este período influencia na quantidade de biogás que pode ser extraído do substrato. A Figura 16 mostra a produção de biogás, em m^3 de biogás por m^3 de biomassa para diferentes valores de temperatura do substrato e TRH, variando com a taxa de alimentação de dejetos no biodigestor, em quilogramas de sólidos voláteis por m^3 de biomassa para resíduos de suinocultura (EMBRAPA, 2006).

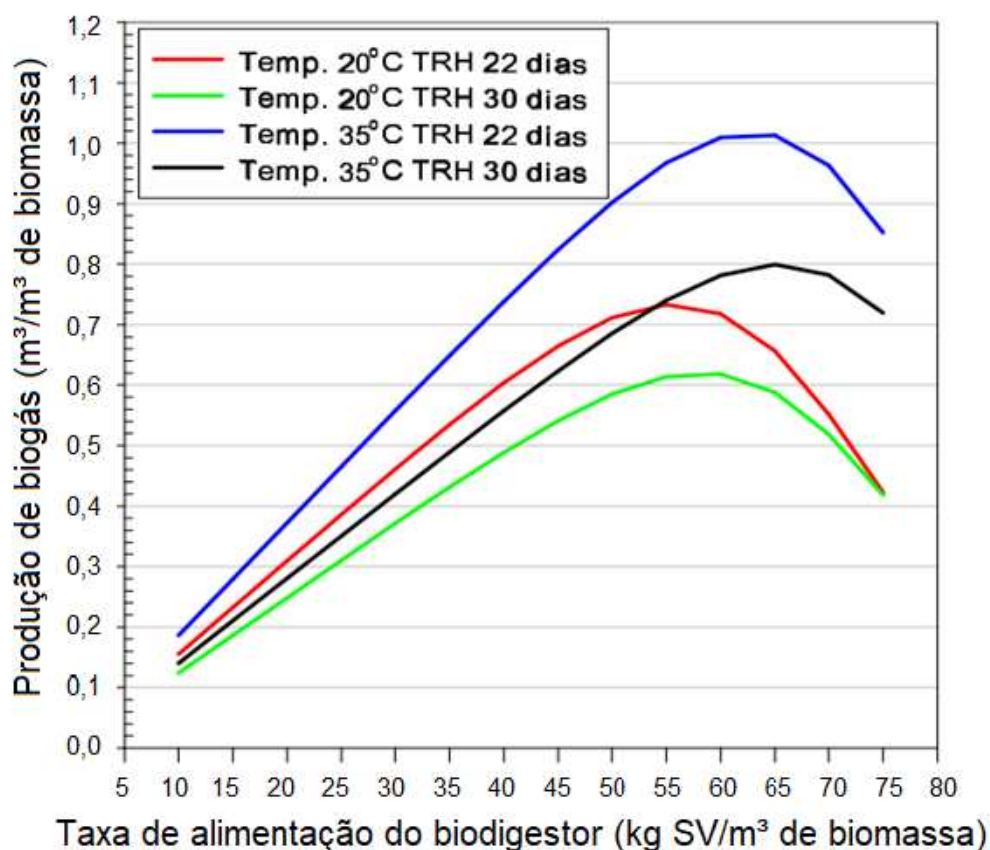


Figura 16 – Curvas de temperatura e tempo de retenção hidráulica para a produção de biogás em diferentes taxas de alimentação do biodigestor com resíduos da produção suinícola.

Fonte: (EMBRAPA, 2006).

Os biodigestores mais comuns no Brasil ainda não são automatizados ou controlados. Tendo em vista a possibilidade de aumentar a produção de biogás controlando algumas variáveis físicas e bioquímicas do processo de biodigestão, um sistema com tais controles permite uma maior produção de biogás da mesma quantidade de matéria orgânica (Lybæk et al., 2013; Sorda et al., 2013).

Em uma planta de produção automatizada de biogás com controle do processo Figura 17, os dejetos da agropecuária, como estrume, resíduos vegetais e mesmo vegetais cultivados para fins energéticos, são colocados com água, no interior do biodigestor, que é livre de oxigênio para ocorrer a fermentação anaeróbica. Previamente, todo esse material é coletado e devidamente preparado para melhor eficiência da biodigestão, como, por exemplo, trituração para aumentar a área de ação das bactérias nos resíduos

vegetais. Essa matéria orgânica fica sob ação de bactérias anaeróbicas por um prazo ótimo pré-determinado, quando há a geração de metano. Para criar um ambiente propício para as bactérias gerarem metano de forma ótima, o substrato é mantido a uma temperatura constante adequada à ação do micro-organismos. O calor neste processo é proveniente da queima do biogás gerado na própria planta de forma direta ou reaproveitado em uma planta de cogeração. O substrato é também revolvido por meio de pás, essa agitação garante que todo o substrato seja digerido (Wellinger et al., 2013).

Os biodigestores automatizados possuem geralmente uma cúpula flexível fixada na parte superior de seu corpo metálico. Esta cúpula infla na medida em que a pressão interna do biodigestor aumenta devido à geração dos gases do processo. O biogás é então captado por gasodutos e queimado em turbinas ou motores a gás, que transferem essa energia a um gerador de energia elétrica. A energia elétrica alimenta os processos da própria planta e pode, ainda, ser inserida na rede de distribuição local. Parte do biogás pode, também, ser devidamente tratada para seu uso em automóveis ou mesmo sua inserção na rede local de gás natural. O que sobra no biodigestor após a digestão é armazenado para uso como biofertilizante de alta qualidade nas lavouras, o que fecha o ciclo do processo (Wellinger et al., 2013; SATHYA, 2017).

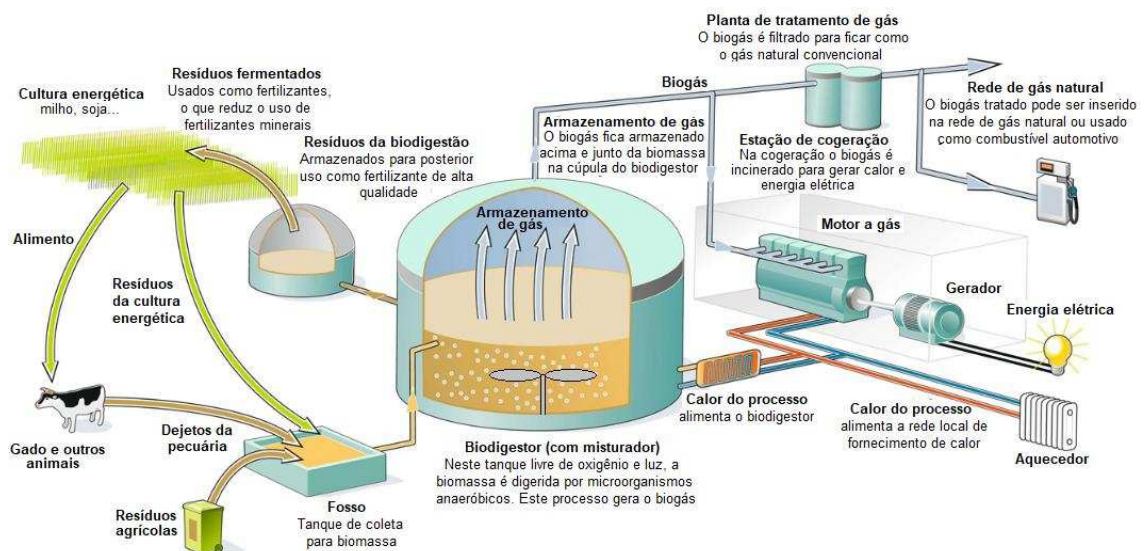


Figura 17 - Esquema do processo de produção de biogás em uma planta automatizada.

Fonte: (SATHYA, 2017) adaptado pelo autor.

De acordo com a complexidade do controle da planta de biodigestão, inúmeras variáveis do processo podem ser consideradas e monitoradas. Dependendo da variável, diversas estratégias de controle podem ser adotadas como controle liga/desliga com retroalimentação, lógica fuzzy, redes neurais ou combinações destas. Técnicas simples de controle podem ser implementadas com equipamentos complexos e vice-versa. A Figura 18 mostra algumas técnicas de monitoramento e estratégias de controle aplicáveis numa planta de biodigestão anaeróbica (García-Gen et al., 2015; Nguyen et al., 2015).

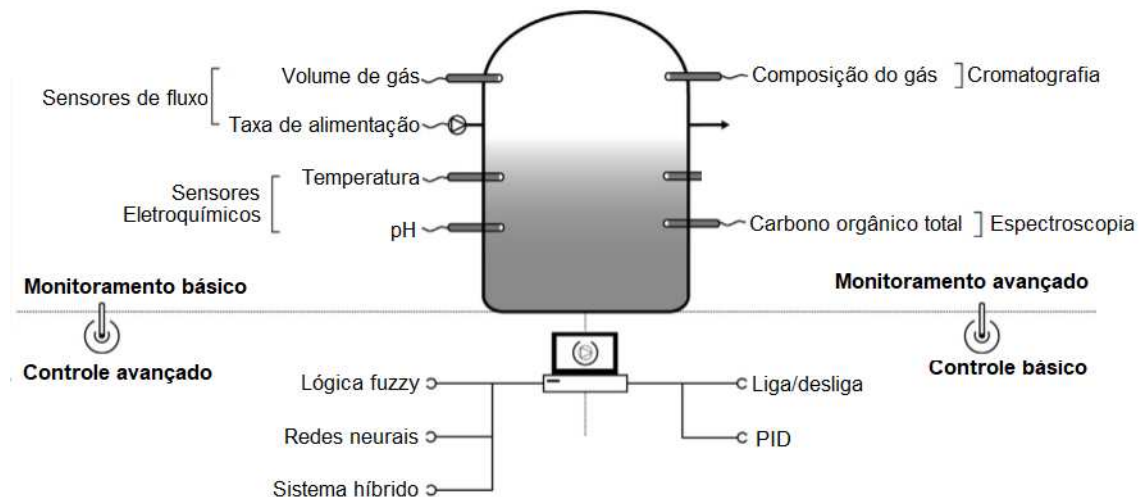


Figura 18 - Técnicas de monitoramento e estratégias de controle.

Fonte: (Nguyen et al., 2015) adaptado pelo autor.

O diagrama esquemático na ilustrado na Figura 19 representa a malha básica do sistema de controle de uma variável qualquer em uma planta de digestão anaeróbica, em que o parâmetro é medido e monitorado por meio de um sensor na planta, essa informação é comparada com o valor de referência ótimo pré-definido (set-point) e em seguida, baseado nesse desvio, o controlador envia um sinal ao equipamento atuador na planta para efetuar a correção da variável controlada. Distúrbios externos são considerados (Nguyen et al., 2015; Gaida et al., 2017).

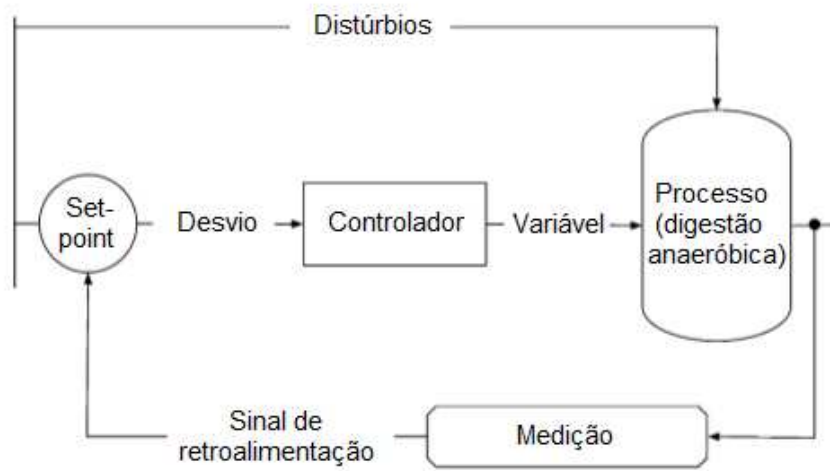


Figura 19 - Malha de controle de um processo de biodigestão.
Fonte: (Nguyen et al., 2015) adaptado pelo autor.

3.2.OBJETIVOS

3.2.1. Objetivo geral

Calcular o potencial de geração de biogás no Brasil (em metros cúbicos) a partir de sistemas automatizados, como ocorre em países europeus como Dinamarca e Alemanha, onde a biodigestão para fins energéticos acontece com controle de variáveis do processo, especialmente a temperatura.

3.2.2. Objetivos específicos

i.Revisar dados práticos de geração de biogás em sistemas reais com e sem controle de variáveis do processo;

ii.Calcular a porcentagem de aumento na produção de biogás em sistemas controlados a partir de dados práticos reais de produção encontrados na literatura;

iii.Obter a quantidade de biogás que poderia ser gerada no Brasil se a produção fosse toda automatizada, que será calculada a partir do percentual de aumento na produção de biogás obtida de forma prática em sistemas controlados e o atual potencial de produção de biogás em sistemas não controlados.

3.3.METODOLOGIA

Calculou-se o potencial de produção de biogás a partir da biodigestão não automatizada de dejetos de todo o rebanho suíno brasileiro. O potencial de produção não automatizado de biogás das outras principais fontes de dejetos orgânicos biodigeríveis disponíveis no Brasil foram encontrados na literatura.

A partir de dados práticos de plantas reais encontrados na literatura, obteve-se a quantidade de biogás gerada em típicos sistemas não automatizados e a quantidade gerada em sistemas automatizados. Para os sistemas não automatizados utilizou-se a geração de biogás por determinada massa de dejetos do condomínio de agroenergia Ajuricaba, situado no sul do Brasil, único empreendimento do tipo no país e que divulgam seus dados de produção. Para os sistemas automatizados utilizou-se uma média de geração de biogás por determinada massa de dejetos (principalmente suínos) de plantas dinamarquesas, pois não encontrou-se dados práticos de outras plantas.

Comparando a geração de biogás nas plantas dinamarquesas com o condomínio Ajuricaba, encontrou-se uma porcentagem de aumento na eficiência de geração de biogás das plantas automatizadas em relação às não automatizadas. Essa porcentagem foi então aplicada no atual potencial de geração não automatizada de biogás no Brasil, a partir das principais fontes de biomassa, anteriormente calculadas, obtendo assim o potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas automatizados.

3.3.1. Cálculo do potencial de produção de biogás da atividade suinícola brasileira e demais fontes obtidas na literatura

Existem basicamente três tipos de sistema de produção de suínos. O primeiro é o ciclo completo, envolvendo todas as etapas de criação de suínos, do nascimento à engorda, com maternidade, creche e terminação. O segundo tipo é a Unidade de Produção de Leitões (UPL), com creche e maternidade, sendo seus animais retirados da granja com, no máximo, 25 kg e levados para outras propriedades denominadas Unidades de Terminação, que é o terceiro tipo de suinocultura (Cherubini et al., 2015).

Quando não se sabe o sistema de criação de suínos, calcula-se uma média de metano gerado por uma suinocultura em função do número de animais, conforme a Eq. 2 (Orrico Júnior et al., 2011):

$$V_{ch4} = t n_s d_s s_{vol} V_{ch4sv} \quad (2)$$

em que:

V_{ch4} - produção de metano (em $m^3 \text{ ano}^{-1}$);

t - tempo de funcionamento do biodigestor (em dia ano^{-1});

n_s - número de animais;

d_s - dejetos produzidos por suínos (em $m^3 \text{ dia}^{-1} \text{ animal}^{-1}$);

s_{vol} - sólidos voláteis nos dejetos (em kg m^{-3});

V_{ch4sv} - produção de metano por kg de s_{vol} (em $m^3 \text{ kg}^{-1}$).

Considera-se $t = 365 \text{ dia ano}^{-1}$. A produção de dejetos por suínos, d_s , é de $0,007 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} \text{ animal}^{-1}$ com concentração de sólidos voláteis s_{vol} de $53,55 \text{ kg m}^{-3}$ (Souza et al., 2009). A produção de metano por kg de sólidos voláteis, V_{ch4sv} , é $0,42716 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, segundo o recomendado pela literatura (Orrico Júnior et al. JÚNIOR, 2011). Esses dados são genéricos para produção não automatizada de biogás para o Brasil.

O Quadro 3. apresenta o potencial anual de produção de biogás no Brasil a partir das fontes mais importantes no que diz respeito a produção de biogás, com exceção dos dejetos suínos. O cálculo foi feito considerando a quantidade de cada um dos resíduos gerados anualmente no Brasil e de dados de geração de metano por unidade de quantidade dos rejeitos orgânicos (Salomon et al., 2009).

Quadro 3.1 - Potencial anual de produção de biogás por resíduo orgânico

Resíduo orgânico	Quantidade de biogás (bilhões de m^3/ano)
Vinhaça	4,76
Aterros sanitários	1,16
Estações de tratamento de esgoto	0,07
Dejetos bovinos	0,11
Total	6,11

Fonte: (Salomon et al., 2009).

3.3.2. Produção de biogás no condomínio de agroenergia Ajuricaba, no Brasil

O condomínio de agroenergia Ajuricaba, situado na cidade paranaense de Marechal Candido Rondon, Figura 20, é um projeto pioneiro no Brasil de cooperação entre 33 pequenos produtores de suínos e gado de leite para a geração de biogás por meio dos resíduos agropecuários de suas propriedades. Este projeto foi fruto de uma parceria entre a Itaipu Binacional, a prefeitura de Marechal Candido Rondon e o Centro Internacional de Energias Renováveis–Biogás (Clbiogás - Itaipu), funciona desde 2009 e desde 2014 insere energia elétrica do biogás na rede da concessionária local. São utilizados biodigestores de lagoa coberta. O biofertilizante produto da biodigestão é usado nas propriedades (ITAIPU BINACIONAL, 2016).

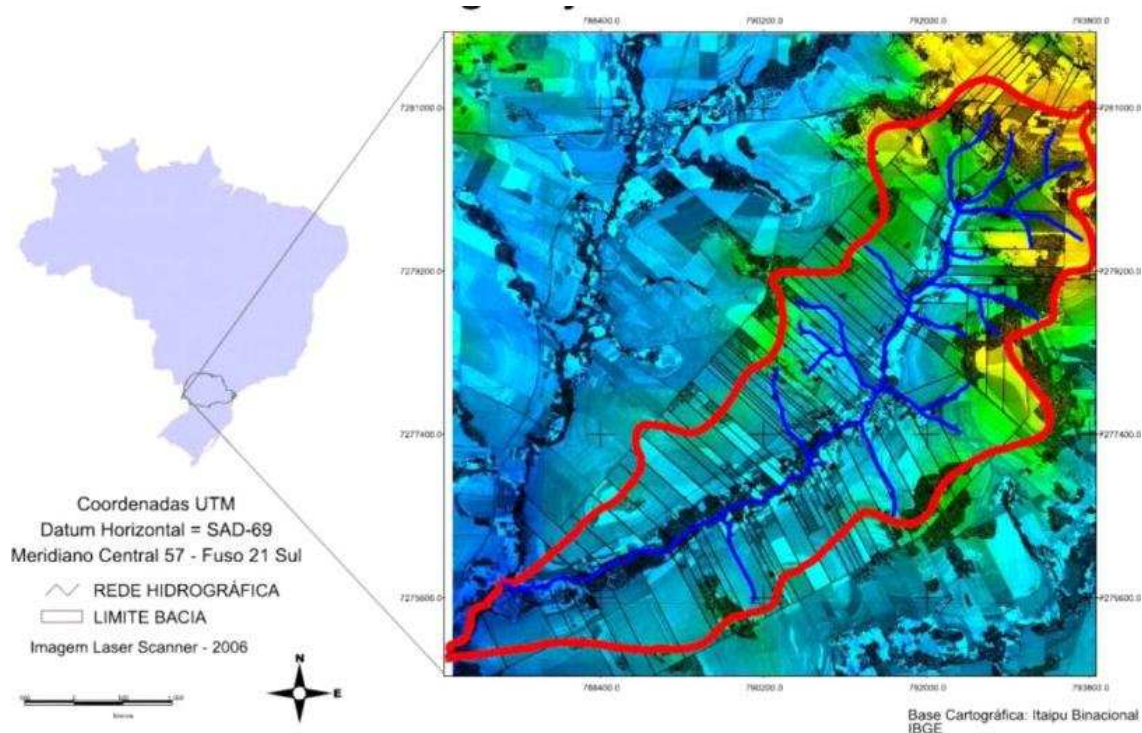


Figura 20 - Localização geográfica do condomínio Ajuricaba.

Fonte: (Coimbra-Araújo et al., 2014).

Cada uma das 33 propriedades do condomínio possui seu biodigestor individual, uma rede de 25,5 km de gasoduto leva o biogás de cada biodigestor para a microtermoelétrica, que gera 350 kWh/dia. O condomínio conta no total com 400 cabeças de gado e 5000 suínos. Os biodigestores não possuem qualquer tipo de controle automatizado. O sistema produz 821,8 m³/dia de

biogás (nas CNTP) de um efluente cuja vazão total é de 48,43 m³/dia (Coimbra-Araújo et al., 2014; CIBIOGÁS, 2017). Considerando uma densidade de 1005 kg m⁻³ dos dejetos líquidos da suinocultura (Franco, 2015), a vazão mássica total de efluente do condomínio Ajuricaba é de 48,67 ton/dia de dejetos líquidos. Atualmente outros quatro projetos estão em fase de construção com base na experiência do Condomínio Ajuricaba, que ainda é o único do tipo em operação no Brasil (PBPDS, 2017).

3.3.3. Produção de biogás em plantas de biodigestão controladas, na Dinamarca

A Dinamarca possui uma forte tradição de cooperação entre pequenos agricultores que formam condomínios de agroenergia, para a produção de biogás e biofertilizantes, como o condomínio Ajuricaba, mas com plantas automatizadas e com diversos controles como agitação, pH, tempo de retenção hidráulica e especialmente temperatura. Essa tradição existe devido ao longo histórico de desenvolvimento de políticas governamentais em que o país incentiva a geração de energia renovável principalmente de resíduos agropecuários (Lybæk et al., 2016; Lora Grando et al., 2017). O Quadro 3.2 mostra dados de produção de biogás (nas CNTP) para 6 plantas automatizadas com controles de temperatura, em diferentes cidades da Dinamarca (Mês et al., 2003).

Quadro 3.2 - Produção de biogás a partir de dejetos animais em biodigestores controlados na Dinamarca

Local da planta	Lemvig	Thorso	Arhus	Studs- gaard	Blabjerg	Nysted
Dejetos* (ton/dia)	437	261	392	266	309	211
Produção de biogás (Nm ³ /ton)	38	34	30	65	31	38

*Acima de 83% dos dejetos é estrume animal, os quase 17% restantes são outros resíduos orgânicos não especificados na literatura.

Fonte: (Mês et al., 2003).

3.3.4. Cálculo do potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas automatizados

A produção de biogás e biometano a partir de determinado material está diretamente relacionada à sua constituição de matéria orgânica e sólidos voláteis presentes nos sólidos totais. Dessa forma pode-se esperar que, para diferentes resíduos orgânicos submetidos à biodigestão, o controle das variáveis físico-químicas do substrato provocará uma mesma proporção de aumento na taxa de produção de biogás (Orrico Júnior et al., 2011; Campuzano e González-Martínez, 2016). Assim aplicou-se o percentual de aumento na taxa de produção de biogás em sistemas automatizados, em comparação à produção dos sistemas simples, conforme encontrado para os dejetos suínos a partir de dados práticos de biodigestores dinamarqueses controlados e do condomínio Ajuricaba no Brasil.

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1. Potencial de produção de biogás da atividade suinícola brasileira

O rebanho de suínos do Brasil é de 37.929.357 cabeças (SEAPA, 2016). Utilizando então a Eq. (1), obtém-se o potencial de produção anual de metano no Brasil a partir de seu rebanho total de suínos de $2.216.748.574 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$, ou seja, aproximadamente 2,22 bilhões de m^3 de biometano todo ano apenas a partir da atividade suinícola. Considerando 60% de metano no biogás (Feroskhan e Ismail, 2016), tem se então 3,69 bilhões de m^3 de biogás por ano proveniente da atividade suinícola no Brasil.

3.4.2. Comparação da produtividade de biogás sem e com controles a partir dos dados práticos reais das plantas brasileiras e dinamarquesas

Segundo o Quadro 3.2, em média, em uma planta controlada dinamarquesa, produz-se de biogás $39,33 \text{ Nm}^3/\text{ton}$ de dejetos. Enquanto o condomínio Ajuricaba, com plantas não controladas, produz-se $821,8 \text{ m}^3/\text{dia}$ de biogás, nas CNTP, com $48,67 \text{ ton}/\text{dia}$ de dejetos líquidos, o que resulta numa geração de biogás de $16,89 \text{ Nm}^3/\text{ton}$ de dejetos. Dessa forma, a produção automatizada de biogás nas plantas controladas da Dinamarca possuem um rendimento aproximadamente 133% maior do que a produção em plantas não controladas no Brasil, representadas pelo condomínio Ajuricaba.

3.4.3. Potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas controlados

O Quadro 3.3 foi construído a partir da aplicação do aumento percentual de 133% na produção de biogás nas fontes apresentadas no Quadro 3., incluindo a produção de biogás a partir da suinocultura brasileira obtida a partir da Eq. (2).

Quadro 3.3 – Potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas não automatizados e automatizados

Resíduo orgânico	Estimativa da produção de biogás em sistemas não automatizados (bilhões de m ³ /ano)	Estimativa da produção de biogás em sistemas automatizados (bilhões de m ³ /ano)
Vinhaça	4,76	11,09
Aterros sanitários	1,16	2,70
Estações de tratamento de esgoto	0,07	0,16
Dejetos bovinos	0,11	0,26
Dejetos suínos	3,69	8,60
Total	9,79	22,81

Fonte: quadro construído pelo autor.

O controle, especialmente de temperatura dos biodigestores, mais que dobra a produção de biogás de determinada massa de matéria orgânica. O potencial brasileiro de produção de biogás de 22,81 bilhões de m³/ano está próximo do potencial estimado pela Associação Brasileira de Biogás e de Biometano (ABiogás) em sua Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano, de 23 bilhões de m³/ano, de forma conservadora (ABIOGÁS, 2015).

O poder calorífico inferior do biogás é 6 kWh m⁻³ (Niels et al., 2017). Tradicionalmente gera-se de energia elétrica 1,42 kWh m⁻³ de biogás (Sganzerla, 1983; Catapan et al., 2011; Onofre et al., 2015), o que implica em um rendimento de 24% do conjunto motor-gerador para a conversão do biogás em energia elétrica. Assim os 22,81 bilhões de m³ de biogás correspondem ao potencial de geração elétrica de 32.390 GWh/ano, o que corresponde a uma potência média instalada de 3.697,49 MW.

O potencial de geração elétrica de 32.390 GWh/ano a partir do biogás no Brasil representa 5,3% da oferta total de energia elétrica no país de 615,9 TWh, em 2015 (EPE, 2016).

3.4.4. Análise econômica das plantas de geração de energia elétrica a partir do biogás

Em uma planta de geração de energia elétrica a partir do biogás não automatizada no Brasil, com potência elétrica instalada de 210 kW, tem-se um custo inicial de instalação de R\$7.060,00/kW (Santos e Vieira, 2015). Se automatizada, uma planta com a mesma quantidade de substrato, gera 2,33 vezes mais biogás, logo uma potência 2,33 vezes maior que 210kW, ou seja, 489,3 kW. Segundo a Figura 2.5, para 489,3 kW, o custo inicial de instalação de uma planta de geração elétrica a partir do biogás é €4.172/kW, considerando o euro R\$3,98 (BACEN, 2015; Santos e Vieira, 2015) tem-se o custo inicial de R\$16.604,00/kW para a instalação de uma planta automatizada.

Supondo o preço de venda da energia na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica de R\$0,53/kWh (CCEE, 2017d), a taxa de juros do setor agrícola brasileiro de 6,5% ao ano (MAPA, 2017), 15 anos de vida útil (Wang et al., 2016a) e um custo de operação e manutenção das usinas a biogás de R\$0,37/kWh (BACEN, 2015; PSU, 2017), calculou-se os fluxos de caixa para a planta automatizada e para a planta não automatizada. A partir dos fluxos de caixa, foram calculados os indicadores econômicos VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno), RBC (Relação Benefício Custo), (RLT) Receita Líquida Total e TRC (Tempo de Retorno do Capital).

Para a planta não automatizada, o investimento inicial foi obtido simplesmente do produto entre a potência total da planta de 210 kW e o custo por unidade de potência, de R\$7.060,00/kW (Santos e Vieira, 2015), resultando em R\$ 1.482.600,00. Os custos anuais de operação e manutenção foram calculados a partir do produto entre a potência total (210 kW), 8.640 h/ano e R\$0,37/kWh (BACEN, 2015; PSU, 2017), resultando em R\$671.328,00/ano. A receita anual com a venda de energia foi obtida por meio do produto entre a potência total da planta (210 kW), 8.640 h/ano e R\$0,53/kWh (CCEE, 2017d), resultando em R\$961.632,00/ano. O fluxo de caixa detalhado se encontra no Quadro .

Para a planta automatizada, o investimento inicial foi obtido simplesmente do produto entre a potência total da planta de 489,3 kW e o custo por unidade de potência, de R\$16.604,00/kW (Santos e Vieira, 2015), resultando em R\$

8.124.337,20. Os custos anuais de operação e manutenção foram calculados a partir do produto entre a potência total (489,3 kW), 8.640 h/ano e R\$0,37/kWh (BACEN, 2015; PSU, 2017), resultando em R\$1.564.194,24/ano. A receita anual com a venda de energia foi obtida por meio do produto entre a potência total da planta (489,3 kW), 8.640 h/ano e R\$0,53/kWh (CCEE, 2017d), resultando em R\$2.240.602,56/ano. O fluxo de caixa detalhado se encontra no Quadro 3.6.

Os indicadores econômicos para ambas as plantas são mostrados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Indicadores econômicos

Indicador Econômico	Planta Não Automatizada	Planta Automatizada
Valor Presente Líquido (6,5% a.a)	R\$ 1.424.458,48	-R\$ 1.350.890,93
Taxa Interna de Retorno	23,01%	3,38%
Relação Benefício/Custo	1,25	1,06
Receita Líquida Total	R\$ 2.871.960,00	R\$ 2.021.787,60
Tempo de Retorno do Capital (anos)	5,37	12,73

Todos os indicadores econômicos são piores para a planta automatizada se comparada à planta não automatizada. O valor presente líquido para a planta automatizada é negativo, segundo os dados utilizados. Dessa forma pode-se concluir que, para dada quantidade de resíduos a serem transformados em biogás e energia elétrica, é mais viável economicamente o uso de uma planta de geração de biogás não automatizada.

Porém, não foram analisados aqui, aspectos com maior dificuldade de serem quantificados em valor monetário, como o serviço ambiental promovido pelos biodigestores automatizados, que tratam de maneira mais eficiente os resíduos orgânicos do que os não automatizados. Também por isso, os biofertilizantes apresentam uma melhor qualidade nos sistemas automatizados.

Quadro 3.5 - Fluxo de caixa da planta não automatizada

PLANTA NÃO AUTOMATIZADA	ANO				
	0	1	2	3	4
Saidas					
Total Geral das Saidas	R\$ 2.153.928,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00
Investimento inicial	R\$ 1.482.600,00				
Operação e manutenção	671328	671328	671328	671328	671328
Entradas					
Total Geral das Entradas	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00
Receita com a venda de energia	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00
Fluxo de Caixa	-R\$ 1.192.296,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00
Saldo Acumulado	-R\$ 1.192.296,00	-R\$ 901.992,00	-R\$ 611.688,00	-R\$ 321.384,00	-R\$ 31.080,00
Saldo Descontado (6,5% a.a)	-R\$ 1.192.296,00	R\$ 272.585,92	R\$ 255.949,22	R\$ 240.327,90	R\$ 225.660,00
Saldo Descontado Acumulado (6,5% a.a)	-R\$ 1.192.296,00	-R\$ 919.710,08	-R\$ 663.760,87	-R\$ 423.432,97	-R\$ 197.772,96
PLANTA NÃO AUTOMATIZADA (continuação)	ANO				
	5	6	7	8	9
Saidas					
Total Geral das Saidas	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00
Investimento inicial					
Operação e manutenção	671328	671328	671328	671328	671328
Entradas					
Total Geral das Entradas	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00
Receita com a venda de energia	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00
Fluxo de Caixa	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00
Saldo Acumulado	R\$ 259.224,00	R\$ 549.528,00	R\$ 839.832,00	R\$ 1.130.136,00	R\$ 1.420.440,00
Saldo Descontado (6,5% a.a)	R\$ 211.887,33	R\$ 198.955,24	R\$ 186.812,43	R\$ 175.410,73	R\$ 164.704,91
Saldo Descontado Acumulado (6,5% a.a)	R\$ 14.114,36	R\$ 213.069,60	R\$ 399.882,03	R\$ 575.292,76	R\$ 739.997,67
PLANTA NÃO AUTOMATIZADA (continuação)	ANO				
	10	11	12	13	14
Saidas					
Total Geral das Saidas	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00	R\$ 671.328,00
Investimento inicial					
Operação e manutenção	671328	671328	671328	671328	671328
Entradas					
Total Geral das Entradas	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00
Receita com a venda de energia	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00	R\$ 961.632,00
Fluxo de Caixa	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00	R\$ 290.304,00
Saldo Acumulado	R\$ 1.710.744,00	R\$ 2.001.048,00	R\$ 2.291.352,00	R\$ 2.581.656,00	R\$ 2.871.960,00
Saldo Descontado (6,5% a.a)	R\$ 154.652,50	R\$ 145.213,61	R\$ 136.350,81	R\$ 128.028,93	R\$ 120.214,96
Saldo Descontado Acumulado (6,5% a.a)	R\$ 894.650,17	R\$ 1.039.863,78	R\$ 1.176.214,59	R\$ 1.304.243,53	R\$ 1.424.458,48

Quadro 3.6 - Fluxo de caixa da planta automatizada

PLANTA AUTOMATIZADA	ANO				
	0	1	2	3	4
Saídas					
Total Geral das Saídas	R\$ 9.688.531,44	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24
Investimento inicial	R\$ 8.124.337,20				
Operação e manutenção	1564194,24	1564194,24	1564194,24	1564194,24	1564194,24
Entradas					
Total Geral das Entradas	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56
Receita com a venda de energia	2240602,56	2240602,56	2240602,56	2240602,56	2240602,56
Fluxo de Caixa	-R\$ 7.447.928,88	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32
Saldo Acumulado	-R\$ 7.447.928,88	-R\$ 6.771.520,56	-R\$ 6.095.112,24	-R\$ 5.418.703,92	-R\$ 4.742.295,60
Saldo Descontado (6,5% a.a)	-R\$ 7.447.928,88	R\$ 635.125,18	R\$ 596.361,67	R\$ 559.964,01	R\$ 525.787,81
Saldo Descontado Acumulado (6,5% a.a)	-R\$ 7.447.928,88	-R\$ 6.812.803,70	-R\$ 6.216.442,02	-R\$ 5.656.478,01	-R\$ 5.130.690,20
PLANTA AUTOMATIZADA (continuação)	ANO				
	5	6	7	8	9
Saídas					
Total Geral das Saídas	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24
Investimento inicial					
Operação e manutenção	1564194,24	1564194,24	1564194,24	1564194,24	1564194,24
Entradas					
Total Geral das Entradas	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56
Receita com a venda de energia	2240602,56	2240602,56	2240602,56	2240602,56	2240602,56
Fluxo de Caixa	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32
Saldo Acumulado	-R\$ 4.065.887,28	-R\$ 3.389.478,96	-R\$ 2.713.070,64	-R\$ 2.036.662,32	-R\$ 1.360.254,00
Saldo Descontado (6,5% a.a)	R\$ 493.697,47	R\$ 463.565,70	R\$ 435.272,96	R\$ 408.707,00	R\$ 383.762,44
Saldo Descontado Acumulado (6,5% a.a)	-R\$ 4.636.992,73	-R\$ 4.173.427,03	-R\$ 3.738.154,08	-R\$ 3.329.447,07	-R\$ 2.945.684,63
PLANTA AUTOMATIZADA (continuação)	ANO				
	10	11	12	13	14
Saídas					
Total Geral das Saídas	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24	R\$ 1.564.194,24
Investimento inicial					
Operação e manutenção	1564194,24	1564194,24	1564194,24	1564194,24	1564194,24
Entradas					
Total Geral das Entradas	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56	R\$ 2.240.602,56
Receita com a venda de energia	2240602,56	2240602,56	2240602,56	2240602,56	2240602,56
Fluxo de Caixa	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32	R\$ 676.408,32
Saldo Acumulado	-R\$ 683.845,68	-R\$ 7.437,36	R\$ 668.970,96	R\$ 1.345.379,28	R\$ 2.021.787,60
Saldo Descontado (6,5% a.a)	R\$ 360.340,32	R\$ 338.347,72	R\$ 317.697,39	R\$ 298.307,41	R\$ 280.100,85
Saldo Descontado Acumulado (6,5% a.a)	-R\$ 2.585.344,31	-R\$ 2.246.996,59	-R\$ 1.929.299,19	-R\$ 1.630.991,79	-R\$ 1.350.890,93

3.4.5. Cultivo de vegetais com fins exclusivamente energéticos

Tipicamente no Brasil, produz-se 50 ton de silagem de milho por hectare de área cultivada (Pereira, 2003). A produção de biogás pela silagem de milho é de 149,23 m³/ton (65% metano)(INOVAGRID, 2016), uma produção de biogás mais de 6 vezes maior do que a tonelada de estrume suíno ou bovino, o milho é o cereal cuja silagem é mais utilizada para geração de biogás (Bacenetti et al., 2015). O tempo médio no Brasil desde o plantio até a colheita da silagem de milho é menor do que 100 dias (Pereira Filho et al., 2017). Como o potencial calculado de produção de biogás no Brasil é de 22,81 bilhões de m³ de biogás por ano, esta mesma quantidade pode ser fornecida por 153 milhões de ton de silagem de milho, que necessita de 3 milhões ha para o cultivo, o que

representa um aumento de 20% na atual área brasileira utilizada para plantio de milho, de 14,96 milhões de há (em 2016)(IBGE, 2017).

3.4.6. Limitações da metodologia de cálculo do potencial brasileiro de produção de biogás em sistemas automatizados

A metodologia aqui utilizada abordou apenas as tradicionais fontes de biomassa no Brasil para a biodigestão. Em um cenário de políticas públicas em que a produção de biogás seja economicamente atrativa, o plantio vegetal exclusivo para a biodigestão deve ser considerado. O Brasil possui uma vasta área cultivável atualmente não utilizada, com excelentes condições para produção de biomassa para fins energéticos (Silva et al., 2016). Com um aumento de 2% na área de cultivo de milho, por exemplo, tanto os Estados Unidos quanto o Brasil poderiam aumentar de 80 a 90% sua produção total de biocombustíveis (Nuñez et al., 2013). Com o cultivo de vegetais para biodigestão, o potencial de produção de biogás no Brasil é muito maior do que o calculado neste trabalho. Também não foram consideradas neste trabalho material proveniente de podas de árvores, restos de alimentos descartados em restaurantes, dejetos da avicultura, entre outros. Dessa forma o potencial aqui calculado é uma estimativa prática, com um resultado conservador.

É muito difícil estimar o potencial de geração de biogás em uma nação. Existem diversas metodologias plausíveis para se obter tal resultado. Este trabalho considerou dados práticos de biodigestão de um condomínio específico localizado em Ajuricaba, no sul do Brasil. Se o um condomínio semelhante estivesse localizado em outra região do país, os biodigestores estariam sujeitos a diferentes temperaturas, o que ocasionaria uma produção diferente de biogás.

Foi ainda considerado o mesmo aumento percentual na eficiência de biodigestores automatizados em relação aos simples, para diferentes fontes de biomassa, o que pode não estar de acordo com a realidade. Assumiu-se essa mesma porcentagem de aumento na eficiência de produção de biogás para diversas fontes pela falta de dados práticos para cada uma das biomassas consideradas e pelo fato de a revisão bibliográfica conduzida neste trabalho apontar para essa possibilidade.

3.5.CONCLUSÕES

A automatização de sistemas para o controle de variáveis do processo de biodigestão eleva em 133% a produção de biogás, de forma genérica, para diversas fontes de resíduos orgânicos, mas principalmente dejetos de suinocultura.

O potencial de produção de biogás em sistemas automatizados no país é de 22,81 bilhões de m³/ano.

Se a produção e uso de biogás no Brasil for economicamente viável, a nível comercial, empresas vão naturalmente buscar formas de aumentar a eficiência na produção de biogás, o que acarretará em um desenvolvimento tecnológico do setor.

A mera implementação políticas públicas de incentivo ao uso e produção de biogás no Brasil, necessárias para a fonte, implicará no investimento privado em tecnologias e melhor tratamento ambiental dos dejetos utilizados, por consequência direta da biodigestão.

3.6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGÁS – Associação Brasileira de Biogás e de Biometano. Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano PNBB, 2015. Disponível em: <https://docs.wixstatic.com/ugd/e3a792_c21f5cd0dafe4a0997ef62fd84d94806.pdf>

BACEN – Banco Central. Cotações e boletins. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em: 9 set. 2017.

Bacenetti, J.; Negri, M.; Lovarelli, D.; Garcia, L. R.; Fiala, M. B. Economic performances of anaerobic digestion plants: Effect of maize silage energy density at increasing transport distances. *Biomass and Bioenergy*, v. 80, p. 73–84, 2015.

Campuzano, R.; González-Martínez, S. Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management*, v. 54, p. 3–12, ago. 2016.

Catapan, A.; Catapan, D. C.; Catapan, E. A. Formas alternativas de geração de energia elétrica a partir do biogás: uma abordagem do custo de geração da energia. *Custos e Agronegócio*, v. 7, n. 1, p. 25–37, 2011.

CCEE- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Preços Semanais Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_semanais?_afLoop=84957296463962#!%40%40%3F_afLoop%3D84957296463962%26_adf.ctrl-state%3Dq8tjy7o68_49>. Acesso em: 10 out. 2017.

Cherubini, E.; Zanghelini, G. M. ; Alvarenga, R. A. F.; Franco, D.; Soares, S. R. C. Life cycle assessment of swine production in Brazil: a comparison of four manure management systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 68–77, 2015.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis–Biogás. Condomínio Ajuricaba. Disponível em: <https://cibiogas.org/condominio_ajuricaba>. Acesso em: 4 maio. 2017.

Coimbra-Araújo, C. H.; Mariane, L.; Bley Júnior, C.; Frigo, E. P.; Frigo, M. S.; Araújo, I. R. C.; Alves, H. J. Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.

Corrêa Da Silva, R.; De Marchi Neto, I.; Silva Seifert, S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 328–341, 2016.

Elsgaard, L.; Olsen, A. B.; Petersen, S. O. Temperature response of methane production in liquid manures and co-digestates. *Science of The Total Environment*, v. 539, p. 78–84, 2016.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos Concórdia/SC, 2006. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_I4I77t4r.PDF>

EPE - Empresa De Pesquisa Energética. Brazilian Energy Balance. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>.

Feroskhan, M.; Ismail, S. Investigation of the effects of biogas composition on the performance of a biogas–diesel dual fuel CI engine. *Biofuels*, v. 7, n. 6, p. 593–601, 2016.

Franco, D. Avaliação do desempenho de gotejadores com uso de água residual da suinocultura. [s.l.] UNESP Botucatu, 2015.

Gaida, D.; Wolf, C.; Bongards, M. Feed Control of Anaerobic Digestion Processes for Renewable Energy Production: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, n. January 2016, p. 869–875, 2017.

García-Gen, S.; Rodríguez, J.; Lema, J. M. Control strategy for maximum anaerobic co-digestion performance. v. 80, 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores IBGE 2017 - [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2017_set.pdf>.

INOVAGRID. O biogás a partir de substratos da produção agropecuária. Disponível em: <<http://www.inovagrid.com/geracao-com-biogas/o-biogas-partir-de-substratos-da-producao-agropecuaria/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

Itaipu Binacional. Projeto pioneiro na produção de biogás completa sete anos. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/projeto-pioneiro-na-producao-de-biogas-completa-sete-anos>>. Acesso em: 5 jun. 2017.

Lora Grando, R.; Antune, S. A. M.; Fonseca, F. V.; Sánchez, A.; Barrena, R.; Font, X. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 44–53, 2017.

Lybæk, R.; Asai, M.; Hayashi, T. How to speed up the deployment of agricultural based biogas technology: Case study of Denmark and Japan. The 11th GMSARN Int. Conf. on Innovative Energy, Environment, and Development in GMS. Anais...2016 Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Masayasu_Asai/publication/313399788_How_to_speed_up_the_deployment_of_agricultural_based_biogas_technology_Case_study_of_Denmark_and_Japan/links/58997583aca2721f0dafeb60/How-to-speed-up-the-deployment-of-agricultural-b>

Lybæk, R.; Christensen, T. B.; Kjær, T. Governing Innovation for Sustainable Development in the Danish Biogas Sector – a Historical Overview and Analysis of Innovation. *Sustainable Development*, v. 21, n. October 2012, p. 171–182, 2013.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Agrícola e Pecuário 2017/2018 - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. [s.l:

s.n.]. Disponível em:
<<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-agricola-e-pecuario/arquivos-pap/folder-pap-2017-18>>.

Mes, T. De; Stams, A.; Reith, J. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. In: Bio-methane & Bio-hydrogen. [s.l.] Dutch Biological Hydrogen Foundation, 2003. p. 58–102.

Nguyen, D.; Gadhamshetty, V.; Nitayavardhana, S.; Kumar, S. Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. *Bioresource Technology*, v. 193, p. 513–522, 2015.

Nielfa, A.; Cano, R.; Fdz-Polanco, M. Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, v. 5, p. 14–21, 2015.

Niels, S. S.; Paclijan, R. S.; Gensch, D. Biogas Electricity (Small - scale). Disponível em: <<http://www.sswm.info/>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

Nuñez, H. M.; Önal, H.; Khanna, M. Land use and economic effects of alternative biofuel policies in Brazil and the United States. *Agricultural Economics*, v. 44, n. 4–5, p. 487–499, 2013.

Onofre, S. B.; Abatti, D. ; Refosco, D.; Tessaro, A. A.; Onofre, J. A. B.; Tessaro, A. B. O. Energy potential of poultry litter for the production of biogas. *African Journal of Agricultural Research*, v. 10, n. 31, p. 3062–3066, 2015.

Orrico Júnior, M. A. P.; Orrico, A. C. A.; De Lucas Júnior, J. Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 2, p. 399–410, 2011.

PBPDS – Plataforma de Boas Práticas para o Desenvolvimento Sustentável. Condomínio Ajuricaba de Agroenergia para Agricultura Familiar. Disponível em: <<http://www.boaspraticas.org.br/index.php/pt/areas-tematicas/energias-renovaveis/16-condominio-ajuricaba-de-agroenergia-para-agricultura-familiar>>. Acesso em: 4 jun. 2017.

Pereira, M. N. Uma comparação financeira simples entre milho grão e milho silagem. Disponível em: <<https://www.milkpoint.com.br/radar-tecnico/nutricao/uma-comparacao-financieira-simples-entre-milho-grao-e-milho-silagem-15938n.aspx>>. Acesso em: 10 out. 2017.

Pereira Filho, I. A.; Cruz, J. C.; Silva, A. R. C., Cruz, R. V. Milho verde - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONT000fy779fnk02wx5ok0pvo4k3c1v9rbg.html>>. Acesso em: 10 out. 2017.

PSU - Pennsylvania State University. Basic economics of power generation, transmission and distribution. Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/eme801/node/530>>. Acesso em: 10 out. 2017.

Salomon, K. R.; Eduardo, E.; Lora, S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, p. 1101–1107, 2009.

Santos, I. F. S.; Vieira, N. D. B. Aproveitamento energético do biogás gerado em uma ETE anaeróbia em Itajubá-MG : Uma avaliação teórica de potencial e custos. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais...Brasília - DF: 2015Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Nathalia_Vieira2/publication/285546107_Aproveitamento_energetico_do_biogas_gerado_em_uma_ETE_anaerobia_em_Itajuba-MG_Uma_avaliacao_teorica_de_potencial_e_custos/links/56a7ceb708aeded22e370a96.pdf>

SATHYA – Sathya Energy. Bio-gas power. Disponível em: <<http://sathyaenergy.com/power-generation/bio-gas-power-generation/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

SEAPA - Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais - Suinocultura 2016. Disponível em: <http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Pecuaria/2016/Set/suinocultura_set_2016.pdf>.

Sganzerla, E. Biodigestor: uma solução. Agropecuária, 1983.

Sorda, G.; Sunak, Y.; Madlener, R. An agent-based spatial simulation to evaluate the promotion of electricity from agricultural biogas plants in Germany. *Ecological Economics*, v. 89, p. 43–60, 2013.

Souza, C. F.; Carvalho, C. C. S.; Campos, J. A.; Matos, A. T.; Ferreira, W. P. M. Caracterização de dejetos de suínos em fase de terminação. *Ceres*, v. 56, n. 2, p. 128–133, 2009.

Wang, C.; Zhang, Y.; Zhang, L.; Pang, M. Alternative policies to subsidize rural household biogas digesters. *Energy Policy*, v. 93, p. 187–195, 2016.

Wellinger, A.; Murphy, J.; Baxter, D. *The biogas handbook - Science, production and applications*. 52. ed. [s.l.] Woodhead, 2013.

Capítulo 4: Conclusão geral e recomendações de trabalhos futuros

4.1. CONCLUSÃO GERAL

O biogás apresenta vantagens sobre outras fontes de energia renovável, como por exemplo, o fato de ser uma forma de aproveitamento que limpa o meio ambiente. A produção de biogás é resultado direto de uma forma de tratamento ambiental de dejetos que, por serem geralmente descartados, possuem um custo baixo. Além disso, o biogás é facilmente armazenado para ser utilizado como energia de *back-up* ou geração elétrica no horário de ponta. Neste contexto, a simples implantação de *feed-in tariffs* daria vantagem ao biogás sobre as outras fontes renováveis, pelo fato de o operador de uma usina a biogás poder concentrar a inserção de energia na rede elétrica no horário de ponta, em que a energia é mais cara.

O Brasil possui um interessante potencial de produção de biogás em sistemas automatizados, 22,81 bilhões de m³/ano, o que é cerca de 133% maior do que a biodigestão sem controles das variáveis do processo, isso sem considerar a produção vegetal exclusiva para gerar biogás. Mas para esta exploração se tornar economicamente viável, é necessária a implantação de uma política clara que incentive seu uso e produção no país, como fizeram outros países, especialmente na Europa.

Sem incentivos governamentais o biogás não tem condições de competir com as outras fontes de energia tradicionalmente utilizadas no Brasil, fósseis ou renováveis.

4.2. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Investigar o estado da arte do plantio vegetal exclusivo para biodigestão com fins energéticos, no Brasil e no mundo. Avaliar a área nacional para cultivo atualmente não utilizada, detectar possíveis competições entre alimento e vegetais para fins energéticos e calcular o potencial brasileiro de produção de biogás, baseado na área disponível para cultivo no território nacional, de diversos tipos de culturas como cana de açúcar, milho, etc.

2. Calcular, por meio de simulações, em quais condições o lucro com a venda da energia do biogás superaria o lucro da atividade fim de um empreendimento que, tradicionalmente, produz o biogás como atividade secundária, por exemplo, uma suinocultura.

3. Analisar a viabilidade econômica da instalação de uma planta de produção de biogás automatizada em algum empreendimento e, comparar com a viabilidade econômica de uma planta não automatizada, hoje, no Brasil, respondendo às seguintes perguntas: atualmente vale a pena economicamente, optar por uma planta automatizada no Brasil? Quão grande deve ser o empreendimento para que isso seja viável?