

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS COMO FORMA DE
DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

Mario Augusto Alexandre Coelho

Tese para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre
2019

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS COMO FORMA DE
DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

Tese de Doutorado Acadêmico a ser
apresentado ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais – PPGE3M, da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Ambiental

Porto Alegre

2019

MARIO AUGUSTO ALEXANDRE COELHO

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS COMO FORMA DE
DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

Tese de Doutorado Acadêmico a ser apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aprovada em 08 de agosto de 2019

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Nestor Cezar Heck (Orientador)
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini
UERGS – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Alexandre Beluco
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. José de Souza
FETLSV – Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	18
3. REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1. DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA EM MEIO LÍQUIDO	19
3.1.1. CONSTITUIÇÃO E QUALIDADE DO BIOGÁS	21
3.2. GERAÇÃO DE ENERGIA: BIOGÁS X BIOMASSA.....	22
3.2.1. PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO	23
3.3. POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO	24
3.4. TECNOLOGIA PARA PRODUÇÃO DE BIOMETANO	27
3.5. SITUAÇÃO ATUAL DA TECNOLOGIA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL	29
3.5.1 MODELO CANADENSE.....	29
3.5.2 SISTEMA PLUG FLOW	30
3.5.3 SISTEMA TIPO GARAGEM – FERMENTAÇÃO A SECO.....	31
3.5.4 TECNOLOGIA DE FERMENTAÇÃO LÍQUIDA (CSTR)	31
3.6. TIPOS DE SUBSTRATOS	34
3.6.1. SUBSTRATOS AGRÍCOLAS E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.....	35
3.6.2. PLANTAS ENERGÉTICAS.....	39
3.7. PARÂMETROS IMPORTANTES DO PROCESSO BIOLÓGICO.....	40
3.8. PROBLEMAS RELACIONADOS À SILAGEM	44
3.9. BIOFERTILIZANTES	46
4. CENÁRIOS.....	49
4.1. METODOLOGIA.....	49
4.1.1. DADOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	50
4.1.2. CAPEX E OPEX.	52
4.2. ANÁLISE DE CENÁRIOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA	53
4.2.1. CENÁRIO 1: SILAGEM DE MILHO	53

4.2.2. CENÁRIO 2: SILAGEM DE CEREAIS	57
4.2.3. CENÁRIO 3: SILAGEM DE MILHO (SM) E SILAGEM DE CEREAIS (SC).....	60
4.2.4. CENÁRIO 4: DEJETO SUÍNO (DS).....	64
4.2.5. CENÁRIO 5: DEJETO BOVINO (DB)	68
5. DISCUSSÃO	72
5.1. BIODIESEL VERSUS BIOMETANO	73
5.2. BIOMETANO VERSUS ETANOL.....	74
5.2.1. BIOMETANO DE MILHO X ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR	74
5.2.2. BIOMETANO DE CEREAIS X ETANOL DE CEREAIS	75
5.2.3. BIOMETANO DE MILHO X ETANOL DE MILHO.....	76
5.3. ENERGIA ELÉTRICA: FONTES RENOVÁVEIS X BIOGÁS	76
5.4. EMISSÕES DE CO2: FONTES RENOVÁVEIS X BIOGÁS	81
5.5. GANHOS EM FUNÇÃO DOS CENÁRIOS: 1 A 5.....	86
CONCLUSÃO.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO – I.....	96
ANEXO – II.....	97
ANEXO – III.....	98
ANEXO - IV	99
ANEXO – V	100

RESUMO

Este trabalho investigou diferentes possíveis modelos de negócio para a geração de energia elétrica a partir do biogás no Rio Grande do Sul. A finalidade deste estudo é mostrar, que é crível (i) aumentar a renda do produtor rural, através da produção das silagens de milho, no verão, e de cereais no inverno (ii) reduzir custos de aquisição de energia elétrica das empresas eletrointensivas, (iii) dar destinação correta para os resíduos orgânicos dos produtores de suínos e bovinos, (iv) aumentar significativamente o produto interno bruto do Estado do Rio Grande do Sul e (v) aumentar a arrecadação de ICMS através da geração de energia renovável. Dentre todas as tecnologias existentes para a produção de Biogás a que mais se adapta à realidade brasileira é a de fermentação líquida. Sua grande vantagem, em relação às outras, reside no fato de poder ser gerenciada remotamente com total controle sobre o monitoramento do processo biológico, gerenciamento do gás, com baixo custo de manutenção e de consumo de energia elétrica, além de possuir uma estrutura de tanques, que permite uma vida útil de projeto de, no mínimo, vinte anos. Estas características garantem o ganho econômico de todas as partes interessadas. A análise da viabilidade econômica foi realizada para diferentes tipos de substratos e diferentes setores, como o agrícola (silagens de milho e cereais) e o de produção animal (esterco suíno e bovino). Os resultados provam que é possível promover o aumento de renda no campo e a redução de custos nas atividades agroindustriais e eletrointensivas do setor produtivo gaúcho. Este estudo pode servir de base para o planejamento de políticas públicas que visem a promoção do desenvolvimento social, econômico e ambiental deste Estado.

Palavras-chave: Biogás, Biometano, Energia Renovável, Resíduo Orgânico, Plantas Energéticas, silagem de milho, silagem de trigo, silagem de cereais, esterco.

ABSTRACT

This work investigated the different possible business models for electricity generation from biogas in Rio Grande do Sul. The purpose of this study is to show that it is credible (i) to increase the income of rural producers through the production of corn in the summer and cereals silage in the winter (ii) to reduce electricity acquisition costs of electro-intensive companies, (iii) do a properly dispose of organic waste from pork and cattle producers, (iv) significantly increase the gross domestic product State of Rio Grande do Sul and (v) increase the tax revenues of ICMS through the generation of renewable energy. Among all existing technologies for the production of biogas the one that best fits the Brazilian reality is that of liquid fermentation. Its major advantage over the others is that it can be managed remotely with full control over biological process monitoring, gas management, low maintenance and power consumption, and has a tank structure, which allows a project life of at least twenty years. These features ensure the economic gain of all stakeholders. The economic viability analysis was performed for different substrate types and different sectors, such as agricultural (corn silage and cereals) and animal production (swine and cattle manure). The results prove that it is possible to promote the increase of income in the field and the reduction of costs in the agroindustrial and electro-intensive activities of the productive sector in Rio Grande do Sul. This study can serve as a basis for planning public policies aimed at promoting the social, economic and environmental development of this state.

Keywords: Biogás, Biomethane, Renewable Energy, Organic Waste, Energetic Plants, Development, Social, Environmental, Public Policy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases do processo de degradação anaeróbia.....	20
Figura 2: Possibilidades de ganho de energia de matéria prima biogênica	23
Figura 3: Exigências para purificação do Biogás.....	28
Figura 4: Biodigestor de lona PVC, modelo Canadense.....	29
Figura 5: Sistema Plug Flow	30
Figura 6: Esquema Tipo Garagem	31
Figura 7: (A) Esquema da estrutura do tanque de fermentação da empresa (B) Tanques de concreto (construção). (C) Tanques Aço (Glass-Fused-To-Steel) da empresa PERMASTORE (fabricante), Inglaterra	32
Figura 8: Esquema de uma planta de biogás com duas etapas de fermentação anaeróbia.....	33
Figura 9: Tempo de retenção necessário em ensaio (batelada) para uma degradação aceitável	37
Figura 10: Tempo de retenção necessário em ensaio ($T_B 95$ e $T_C 95$) para uma degradação aceitável	38
Figura 11: Fungos em silagem de milho	45
Figura 12: Efeitos da inibição de micotoxinas em aplicações de escala na prática	45
Figura 13: Custo de Geração de 1 MWh de Energia Elétrica a partir do Biogás (40t/ha) – Cenário 1	56
Figura 14: Custo de Geração de 1 MWh de Energia Elétrica a partir do Biogás (30t/ha) – Cenário 2	60
Figura 15: Custo de Geração de 1 MWh de Energia Elétrica a partir do Biogás – Cenário 3 (40 t/ha de SM e 30 t/ha de SC)	64
Figura 16: Evolução do custo de geração de 1MWh utilizando dejetos suínos	68

Figura 17: Custo de Geração de 0,250 MWh de Energia Elétrica a partir do Biogás – Cenário 5	71
Figura 18: Biogás x Solar Fotovoltaica em Geração Distribuída, com capacidade de rede de 40 MWh	78
Figura 19: Comparação entre GD de Biogás e Solar Fotovoltaico com o histórico da eficiência da GD Solar e o seu perfil de geração de energia elétrica durante o dia	80
Figura 20: Comparação entre a evolução da geração de energia renovável com a geração de energia fóssil e as emissões de CO2 do setor de energia na Alemanha, 1990 a 2017	83
Figura 21: Relação entre o aumento da capacidade instalada de solar, eólico e biomassa com as emissões de CO2 do setor de energia	86
Figura 22: Área plantada de Milho (primeira Safra) no Brasil – 2004 a 2019	87
Figura 23: Área plantada de Milho (primeira Safra) no Rio Grande do Sul – 2004 a 2019	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros selecionados para o processo de formação do Biogás	18
Tabela 2: Produção de Biogás e Metano conforme o grupo de substância	26
Tabela 3: Potencial de produção de Biogás por tipo de substrato.....	26
Tabela 4: Quantidade estimada de bioenergia produzida por ano conforme a produtividade da silagem de milho	27
Tabela 5: Divisão dos principais substratos para a produção de biogás	34
Tabela 6: Características dos substratos agrícolas	36
Tabela 7: Comparação de Substratos Agrícolas para gerar 1 MWh	39
Tabela 8: Potencial de Plantas Energéticas para geração de energia	40
Tabela 9: Digestato – Valor do Fertilizante	46
Tabela 10: Teores de N total, N-amônio, nitrato-N, C orgânico total e C orgânico dissolvido em três fertilizantes à base de lama, bem como N total e C em cortes de gramíneas-trevo usadas como adubo verde. As variáveis são dadas por kg de material fresco aplicado e por g de solo seco nas unidades experimentais	48
Tabela 11: Dados médios de plantas de biogás na Alemanha (2010 – 2014, MT-Energie)	50
Tabela 12: Composição de nutrientes das amostras: XP = Proteína Bruta; XL = Gordura Bruta; XF = Fibra Bruta; XA = Cinzas; ADL = Lignina; Cel = Celulose; Hem = Hemicelulose; C/N = C:N; XF = Fibra Bruta; XA = Cinzas; ADL = Lignina; Cel = Celulose; Hem = Hemicelulose; C/N = C:N; Produção de Biogás e Metano em m ³ /t Sólidos Voláteis (273 K, 1,013 bar)	51
Tabela 13: Produção de Biomassa por diferentes partes da planta	51

Tabela 14: Dados de produção do Cenário 1 – Produtividade de 40 t/ha de silagem de milho	54
Tabela 15: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 1	55
Tabela 16: Viabilidade Econômica em função da Produtividade da Silagem de Milho	56
Tabela 17: Dados de produção do Cenário 2 – Produtividade de 30 t/ha de silagem de cereais	57
Tabela 18: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 2	58
Tabela 19: Viabilidade Econômica em função da Produtividade da Silagem de Cereais	59
Tabela 20: Dados de produção do Cenário 3 – Produtividade de 40 t/ha de SM e 30 t/ha de SC	60
Tabela 21: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 3	62
Tabela 22: Viabilidade Econômica em função da Produtividade da SM e SC	63
Tabela 23: Produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos Suínos	64
Tabela 24: Dados de produção do Cenário 4 para uma planta de 500 kWh de capacidade instalada	65
Tabela 25: Teores de nitrogênio, fósforo e potássio em função do teor de matéria seca (MS) em dejetos suínos	66
Tabela 26: Valores de N, P ₂ O ₅ e K ₂ O no biofertilizante (digestato 10% de MS)	66
Tabela 27: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 4	67
Tabela 28: Dados de produção do Cenário 5 para uma planta de 250 kWh de capacidade instalada	68
Tabela 29: Valores de N, P ₂ O ₅ e K ₂ O no biofertilizante (digestato 10% de MS)	70
Tabela 30: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 4	70
Tabela 31: Produtividade do etanol a partir de cana e de biometano a partir de milho	74
Tabela 32: Produtividade do etanol e de biometano a partir de cereais	75
Tabela 33: Produtividade do etanol e de biometano a partir de milho	76

Tabela 34: Capacidade instalada de geração de energia elétrica eólica e solar do Brasil	78
Tabela 35: Capacidade Instalada para geração de energia elétrica na Alemanha, 2018	81
Tabela 36: Emissões em 1.000 t equivalentes de CO2 por Setor da economia Alemã	82
Tabela 37: Geração bruta de energia elétrica – variação entre 1990 e 2018	84
Tabela 38: Capacidade Instalada em MW na Alemanha – 2009 a 2018	85
Tabela 39: Comparação entre os Cenários 1, 2 e 3 e a produção de grãos de milho e cereais	88

LISTA DE ABREVIATURAS

- ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias
- PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
- GIZ – Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
- RSU – Resíduo Sólido Urbano
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- ST – Sólidos Totais
- SV – Sólidos Voláteis
- SF – Sólidos Fixos
- PEB – Produção Específica de Biogás
- PEM – Produção Específica de Metano
- DIN – Deutsche Institut für Normung e.V.
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- ISO - International Standard Organisation
- MS – Matéria Seca
- MoS – Matéria Orgânica Seca
- PB – Proteína Bruta
- EE – Extrato Etéreo
- FB – Fibra Bruta
- ENN – Extrato não Nitrogenado
- MM – Matéria Mineral
- MF – Matéria Fresca
- LDPE – Low Density Polyethylene
- LLDPE – Linear Low-Density Polyethylene

HDPE – High Density Polyethylene
EDC – Ethylene Dichloride
DBFZ – Deutsche Biomasse Forschungszentrum
BRF – Brasil Foods
TRH – Tempo de Retenção Hidráulico
CSTR – Continuous Stirred-Tank Reactor
CEASA – Centrais de Abastecimento
MWh – Megawatt hora
SRB – Bactérias Sulfato Redutoras
NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio
EMATER – Empresas de Assistência Técnica Rural
SM – Silagem de Milho
SC – Silagem de Cereais
DS – Dejeito Suíno
DB – Dejeito Bovino
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CONAB – Companhia Brasileira de Abastecimento
IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
GD – Geração Distribuída

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) foi sancionada em 02 de agosto de 2010 [1], após 21 anos tramitando no Congresso Nacional, tornando-se o marco regulatório para os resíduos sólidos no Brasil. Como anteriormente a regulação era diferente em cada Estado Brasileiro, a falta de unidade com relação à legislação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) deixava o Brasil em situação vexatória quando o tema era o 'lixo'. Contudo, a situação caótica da disposição dos RSU, sem tratamento algum de separação e estabilização da matéria orgânica, agora pressionada pela PNRS e somada ao alto custo da matriz energética e elétrica brasileira, acaba por gerar uma oportunidade para negócios, para todas as empresas que atuam na área ambiental e de energia em nosso país.

A PNRS [1] previu punições e determinou um prazo de quatro anos, contados a partir de 02 de agosto de 2010, para que todos os municípios com situação de lixo irregular cumprissem a nova lei. Infelizmente nenhum município a cumpriu no prazo determinado. Um prazo maior foi então estipulado para o fim dos 'lixões'. Ele se estendeu até 31 de julho de 2021 para municípios com menos de 50 mil habitantes; até 31 de julho de 2020, para municípios de 50 a 100 mil habitantes; até 2019 para municípios de fronteira e os que possuem mais de 100 mil habitantes; e até 31 de julho de 2018 para as capitais e cidades metropolitanas.

Além desta exigência, a Lei obrigou a fazer reciclagem, reuso, coleta seletiva e tratamento do lixo, bem como, a estabilização da matéria orgânica antes do seu descarte num aterro sanitário. Portanto, está absolutamente claro que não é mais permitido destinar resíduos diretamente em aterros sanitários sem antes de ter sido executada a sua triagem, para um melhor aproveitamento e tratamento dos resíduos sólidos urbanos, industriais, rurais, do serviço de saúde e resíduos perigosos. A matéria orgânica, obrigatoriamente, deverá ser estabilizada para sua utilização como

adubo. Quem não cumprir com essas determinações não receberá mais verbas federais para investimentos nesta área. Com isto, os municípios e os geradores que cumprirem a lei poderão optar pela estabilização da matéria orgânica através da fermentação aeróbia ao ar livre, na presença de oxigênio ou anaeróbia em tanques fechados, na ausência de oxigênio. Assim sendo, abre-se um campo enorme para o setor de energias alternativas, principalmente para o biogás.

Embora o biogás passe a ser uma grande alternativa para estabilização de 100% da matéria orgânica gerada no País, o histórico brasileiro com este tipo de tecnologia não é nada estimulante. Muitas decepções e pouquíssimo sucesso na implantação de projetos de biogás nas décadas de 70 e 80 impediram o avanço da pesquisa e de investimentos para este tipo de tecnologia renovável no Brasil [2]. Muitos são os aspectos que determinaram o fracasso dos biodigestores construídos nessa época. Dentre os principais fatores responsáveis pelo insucesso estão: a falta de controle da temperatura e da agitação dos resíduos nos biodigestores, a escassez de mão de obra especializada, a falta de capacitação continuada, a assistência técnica inexistente e a carência de materiais adequados para a construção dos biodigestores. Somam-se a estes fatores as barreiras de mercado identificadas em estudo realizado pelas empresas Akut e Rotária do Brasil em 2015, contratadas pelo Probiogas, programa este, que foi conduzido pela Companhia Alemã para a Cooperação Internacional (GIZ) [3]. Dentre as principais causas apontadas pelos empresários para que o setor de biogás não se desenvolva no Brasil aparecem:

- Alto investimento para aquisição da tecnologia do exterior;
- Volume de mercado ainda pequeno;
- Altos impostos e altas taxas de impostos para importação;
- Altos custos de manutenção, sobretudo para equipamentos nacionais que ainda não possuem a maturidade de performance para projetos de plantas de biogás;
- Falta de entendimento do mercado livre de energia;
- Diferentes regras de autoconsumo em cada Estado Brasileiro;
- Monopólio por parte das estatais sobre os gasodutos de gás natural;

- Dentre outros, a falta de financiamento específico para plantas de biogás e biometano;

Uma alternativa que pode finalmente resolver os problemas dos fatores relacionados ao insucesso do biogás no Brasil é a importação da tecnologia hoje empregada na Europa. Já se sabe que a implantação destas plantas no Brasil, é economicamente viável [4]. Por isso é preciso estudar alternativas para alimentação dos biodigestores com substratos que sejam os mais adequados e econômicos possíveis.

O trabalho foi realizado para investigar os diferentes possíveis modelos de negócio para a geração de energia a partir do biogás no Rio Grande do Sul. Após a revisão bibliográfica foi feita a coleta de dados a campo, com produtores rurais, sobre a produção de silagem de milho e cereais, no Rio Grande do Sul, e produtores de biogás, sobre a produção de biogás, na Alemanha, que utilizam os mesmos substratos analisados neste trabalho. Os dados coletados foram analisados e utilizados em simulações de diferentes cenários para a produção de biogás com a finalidade de gerar energia elétrica. Com os resultados obtidos das simulações foram feitos os cálculos de viabilidade econômica para cada um dos cenários estudados. A partir daí é possível criar modelos de negócio para a geração de energia elétrica a partir do biogás.

2. OBJETIVOS

Devido a esta evidente oportunidade de negócio proporcionada pela PNRS, que obriga a estabilização da matéria orgânica antes de sua destinação final, existe uma grande preocupação com relação a geração de resíduos da produção animal. Sérios problemas com relação ao seu correto tratamento e disposição estão causando preocupação às empresas integradoras de aves, suínos e bovinos.

No Rio Grande do Sul há uma imensa área agrícola ociosa, disponível para produção, mas ao mesmo tempo faltam alternativas para o produtor rural encontrar uma cultura rentável para rotacionar com o plantio da soja e para o cultivo de inverno. Por isso, visando proporcionar alternativas para o aumento de renda na área rural do Rio Grande do Sul, este trabalho estudou modelos de negócio, que viabilizam a implantação e o funcionamento de plantas de Biogás para geração de energia elétrica a partir de plantas energéticas (milho e cereias de inverno) e esterco animal de suínos e bovinos.

O objetivo é mostrar que o investimento em plantas de biogás proporciona:

- (i) O aumento da renda do produtor rural, através da utilização de plantas energéticas e de esterco de suínos e bovinos, para produção de biogás.
- (ii) Redução de custos das empresas eletrointensivas,
- (iii) Destinação correta para os resíduos orgânicos da produção animal,
- (iv) O aumento significativo do produto interno bruto do Estado do Rio Grande do Sul e
- (v) O aumento da arrecadação de ICMS através da geração de energia renovável.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Degradação anaeróbia em meio líquido

É sabido que a matéria orgânica é passível de decomposição por micro-organismos, independentemente de o meio conter ou não oxigênio. Com a decomposição, micro-organismos transformam as substâncias mais complexas em produtos mais simples que, posteriormente, são reintegrados aos ciclos de vida de outros organismos encontrados no nosso planeta. Com a degradação dos tecidos, substâncias e moléculas complexas em substâncias simples, tem-se como uma das consequências a geração de gases. Se o processo ocorre com microorganismos anaeróbios, há a geração de gases combustíveis – o assim chamado biogás. A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros importantes na sua gênese.

Tabela 1: Parâmetros selecionados para o processo de formação do biogás

Parâmetros	Hidrólise / Acidificação	Metanização
Temperatura	25 – 35°C	Mesófilo: 32 – 42°C Termófilo: 50 – 58°C
Valor do Ph	5,2 – 6,3	6,7 -7,5
Potencial Redox	- 300mV até + 400mV	< - 250 mV
Teor de sólidos	< 40% substância seca	< 30% substância seca
Relação C / N	10- 45	20 -30
Necessidade em Nutrientes C : N : P : S	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
Micronutrientes	Nenhuma exigência	Ni, Co, Mo, Se

Fonte: adaptado de [5, 6].

As condições ideais de fermentação indicam uma variação do pH de 5,2 a 7,5 e um potencial redox variando de valores inferiores a -250 mV até +400 mV [4, 5] – fato que preocupa projetistas destas instalações, pois elas podem afetar o material constituinte do reator e as contra-medidas aumentam os custos de investimento.

Pode-se afirmar, portanto que, de maneira geral, a degradação anaeróbia apresenta peculiaridades relativas ao processo de decomposição que são difíceis de serem controladas quando não há uma tecnologia apropriada disponível. Por isso, projetos desenvolvidos para a decomposição de resíduos orgânicos sem a presença de oxigênio são sempre complexos [7].

As fases da fermentação anaeróbia são bem conhecidas. O processo para a formação do biogás apresenta quatro etapas distintas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, como mostra a Figura 1 [5, 7, 8].

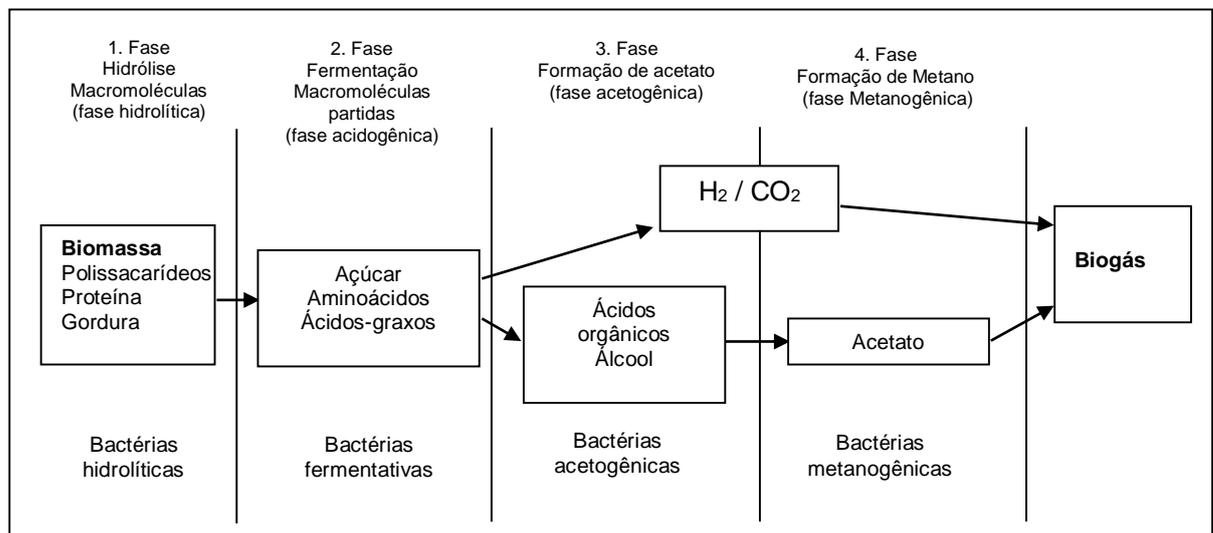


Figura 1: Fases do processo de degradação anaeróbia.
Fonte: adaptado de [5].

Hidrólise – o sistema, nesta primeira fase, é dominado por bactérias que fazem a quebra de polímeros tais como proteínas, gorduras e celulose em monômeros (como ácidos graxos e aminoácidos). Estas bactérias hidrolíticas promovem este trabalho através de suas enzimas extracelulares [9].

Acidogênese – nesta fase, os monômeros são atacados pelas bactérias fermentativas, degradando-os em ácidos orgânicos e álcoois, bem como gás carbônico e hidrogênio. Os produtos da fermentação serão influenciados pela concentração do hidrogênio formado. Quanto maior for a pressão parcial do hidrogênio, menor será a formação de ácido acético. Haverá mineralização das ligações orgânicas de nitrogênio e enxofre em amônia (NH₃) e ácido sulfídrico (H₂S).

Contudo, se isto acontecer em concentrações elevadas, poderá ocorrer inibição da formação de metano [9].

Acetogênese – nesta terceira fase, os ácidos orgânicos e álcoois formados anteriormente irão formar ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Esta fase é a última antes do início da metanização. Aqui também há uma forte dependência da pressão parcial do hidrogênio [9].

Metanogênese – a quarta e última fase acontece em condição estritamente anaeróbia. Uma parte das bactérias metanogênicas transforma o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano, enquanto a outra forma metano a partir do acetato; cerca de 70% do metano formado provém da degradação do acetato [7]. O biogás é formado principalmente por CH_4 (de 50% a 70%) e CO_2 (de 30 a 50%) [6] – mas também pode conter uma pequena parte de outros gases.

3.1.1. Constituição e qualidade do biogás

A qualidade do biogás está diretamente ligada aos teores apresentados por seus gases constituintes. Após a formação, o biogás apresenta a seguinte constituição: metano, dióxido de carbono, água, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e o sulfeto de hidrogênio. A composição média pode variar entre os seguintes limites: para o metano (CH_4), de 50% a 75% vol., para o dióxido de carbono (CO_2) de 25% a 45% vol., para a água (H_2O) de 2% a 7% vol., para o sulfeto de hidrogênio (H_2S) de 20 a 20.000 ppm, para o nitrogênio (N_2) < 2% vol., para o oxigênio (O_2) < 2% vol. e para o hidrogênio (H_2) < 1% vol. [11].

Por causa da sua influência no poder calorífico inferior, o principal gás constituinte do biogás é o metano; quanto maior o seu teor, maior será a energia contida no biogás. Os demais constituintes têm influência direta sobre o custo de manutenção e operação de uma planta de biogás. O maior cuidado, tanto para a geração de energia elétrica como para produção de biometano, deve estar concentrado na limpeza do biogás. Ele deve ser livre de H_2S , H_2O , N_2 , O_2 e siloxano.

O que determina a maior ou menor concentração destes constituintes é o tipo de substrato utilizado nos biogeradores. O siloxano, por exemplo, é um gás associado aos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) – restrito, assim, aos aterros sanitários.

3.2. Geração de energia: biogás x biomassa

Na Alemanha pelo fato de a geração de energia limpa ter sido altamente subsidiada houve a necessidade de definir claramente qual tipo de biomassa seria reconhecida como fonte de matéria prima para a geração de energia elétrica. Por isso, em 21 de junho de 2001 foi baixada uma portaria denominada de BiomasseV [10], onde, no parágrafo 2, a biomassa é definida como sendo “um elemento portador de energia oriundo da matéria orgânica de plantas e animais. Aqui pertencem também a fitomassa e zoomassa resultante de produtos e subprodutos, sobras e resíduos, cujo teor de energia tem origem vegetal ou animal.”

No parágrafo 3, para evitar que os subsídios pudessem ser utilizados também para geração de energia a partir de fontes de biomassa que não contribuem para o desenvolvimento sustentável, foram proibidos de utilização, dentre outros, combustíveis fósseis, turfa, RSU sem separação, madeira velha com componentes tóxicos, papel, papelão, caixas de papelão, lodo de esgoto, tecidos, gás de aterro e gás de esgoto.

Quando se busca dados sobre a geração de energia a partir do biogás no Brasil, percebe-se que o biogás está enquadrado dentro do conceito de ‘biomassa’. Nas informações contidas no Big Data ANEEL (BIG – Banco de Informações de Geração), as fontes utilizadas no Brasil são subdivididas, conforme sua origem, em: Fóssil, Biomassa, Nuclear, Hídrica, Eólica, Solar e Undi-Elétrica (cinética da água). Por sua vez, a Biomassa está subdividida em: floresta (gás de alto forno, lenha, resíduos florestais, licor negro, carvão vegetal), resíduos sólidos urbanos (biogás e carvão), resíduos animais (biogás), biocombustíveis líquidos (etanol, óleos vegetais), agroindustriais (bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, biogás-AGR). Para acessar as informações sobre biogás é preciso acessar os dados contidos em

biomassa e depois em floresta ou resíduos sólidos urbanos e até mesmo em agroindústrias, para então poder visualizá-los.

Ainda analisando os dados relativos à produção de energia no BIG da ANEEL, percebe-se que todas as fontes de origem da biomassa são utilizadas diretamente em processos de queima que utilizam esta fonte para a geração de calor. Somente no biogás existe a utilização da biomassa para a fermentação anaeróbia. É a única que não queima a matéria orgânica. Por isso, seria pertinente classificar a fonte utilizada de forma diferenciada da biomassa para queima, principalmente para efeito de se obter linhas de financiamentos para projetos de biogás, pois o biogás não é gerado apenas a partir de resíduos animais e do processamento de alimentos, mas também a partir de plantas energéticas.

3.2.1. Processos de Transformação

Existem várias fontes de energia biogênicas. Estas fontes precisam passar por um processo de transformação para podermos aproveitá-las para a geração de energia; os processos de transformação podem ser divididos conforme a Figura 2 [11].

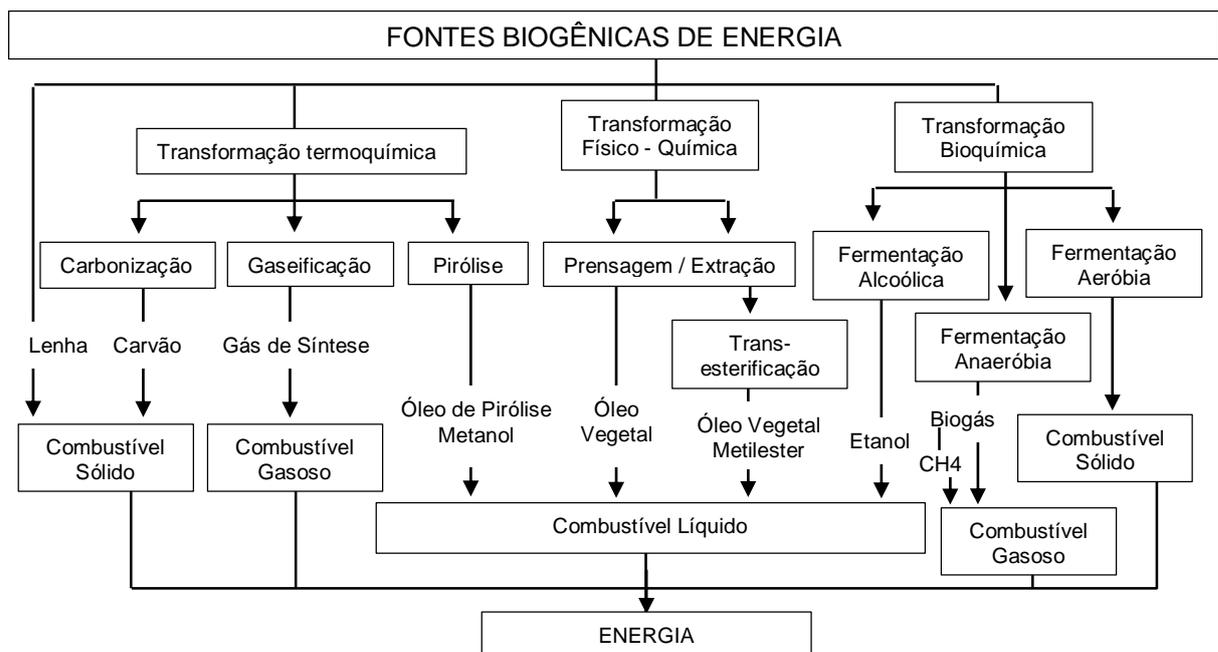


Figura 2: Possibilidades de ganho de energia de matéria prima biogênica (fonte: Kaltschmitt & Reinhardt 1997, modificado).

As possibilidades de transformação se diferenciam em função da biomassa e do tipo de produto/energia a ser utilizado. Na transformação termoquímica, o calor é o meio empregado para obtenção do produto final onde a madeira, dentre outros, é o mais comumente utilizado. Já na transformação mecânica, também denominada de físico química, o produto final pode ser o óleo vegetal e/ou biodiesel. Na transformação bioquímica, os combustíveis mais conhecidos são o etanol e o biogás. Já a compostagem, obtida da fermentação aeróbia, é pouco empregada para a geração de energia convencional através de sua queima.

3.3. Potencial de produção de biogás e biometano

O biogás, constituído de: CH₄, CO₂, H₂S, N, H, O (com o metano e o dióxido de carbono somados resultando em mais de 95% da sua constituição), é formado a partir da fermentação da matéria orgânica; importante ressaltar que, ao final deste processo biológico, a matéria orgânica estará estabilizada. Graças a esse fato, este resíduo pode ser disposto no meio ambiente de forma segura.

Para que possamos estimar a produção de biogás é preciso primeiramente definirmos o conceito de substrato. Para os profissionais que atuam no setor de Biogás, substrato é todo o material orgânico capaz de ser utilizado em um biodigestor para a produção de biogás. Aqui é importante destacar que, se utilizássemos o termo 'biomassa' ao invés de 'substrato', estaríamos assumindo a premissa de que a madeira poderia produzir biogás – o que não acontece. Já material de poda é considerado 'substrato'.

O potencial de produção de uma planta de biogás, portanto, depende do tipo de substrato que ela utiliza. Para estimá-lo é necessário saber o quanto de matéria orgânica o substrato possui, pois grande parte de sua constituição é água. É possível estimar em laboratório o teor de matéria orgânica seca e, em um teste de fermentação, o quanto deste sólido volatiliza. Portanto, a produção de biogás está diretamente relacionada à quantidade de sólidos voláteis que cada substrato possui e à presença ou não de inibidores do processo biológico, bem como a sua concentração. Um

trabalho realizado com amostras de 405 silagens de 43 tipos diferentes de plantas ensiladas por mais de 90 dias comprova isto [12]. Os componentes que mais afetam a produção de metano são: o nitrogênio total e o teor de fibra, respectivamente. Por causa disso, o tipo de cultura energética a ser escolhida para produção do biogás deve ser feito em função de suas características e constituição relativas a estes componentes, que impactam na produção de metano.

A EMBRAPA Suínos e Aves, Concórdia, SC, sugere o seguinte método [13] para a determinação do potencial de produção de biogás a partir de um determinado tipo de substrato:

Sólidos Totais (ST): secagem a 105 °C até massa constante.

Sólidos Voláteis (SV): diferença obtida entre os sólidos totais e sólidos fixos (SF) após calcinação a 550 °C até massa constante.

Produção Específica de Biogás (PEB) e Produção Específica de Metano (PEM): ensaio cinético anaeróbio mesofílico, expresso em volume normalizado de gás em relação à massa de sólidos voláteis da amostra (com base nas normas DIN 38414-8, VDI 4630, ISO 11734 e / ou ASTM E2170-01).

Na Alemanha, ST é representado como sendo matéria seca (MS) e o SV é representado como sendo a matéria orgânica seca (MoS).

A diferença do potencial de formação de biogás encontrada nos diferentes tipos de substratos depende diretamente de sua constituição. Em conformidade com os teores de proteína digestível (PB), gordura digestível (extrato etéreo: EE), Carboidratos digestíveis (fibra bruta (FB) + extratos não nitrogenados (ENN)), matéria mineral (MM), haverá maior ou menor produção de biogás e metano. Na Tabela 2 [14] pode-se verificar a produção específica de biogás e a respectiva produção de metano dos grupos de substâncias citados anteriormente.

Tabela 2: Produção de biogás e metano conforme o grupo de substância

Substância	Produção de Biogás l/Kg SV (MoS)	Teor de Metano % em volume
Proteína digestível (PB)	700	71
Gordura digestível (EE)	1.250	68
Carboidratos digestíveis (FB + ENN)	790	50

Fonte: [14]

Os resíduos orgânicos com alto teor de lignina possuem uma fermentação bastante lenta [15]. Por isso, materiais lenhosos não são aconselháveis para a produção de biogás.

Os tipos de substratos a serem utilizados podem ter sua origem na agricultura, produção animal, produção de alimentos, descarte de lixo orgânico (RSU), entre outros.

Tabela 3: Potencial de produção de biogás por tipo de substrato

Substrato	MS (%)	Biogás Nm ³ /t MF	CH ₄ Nm ³ /t MF
Esterco Líquido Suíno	6	28	17
Esterco Líquido Bovino	10	25	14
Esterco de Aves	40	140	90
Silagem de Milho	33	200	106
Silagem de Gramíneas	35	180	98

MS: Matéria Seca; MF: Matéria Fresca

Fonte: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

Como mostra a Tabela 3, existem referenciais que permitem o cálculo do potencial de biogás por tipo de substrato. Para os projetos se utilizam dados, analisados em laboratório, do(s) substrato(s) que será(ão) utilizado(s) na planta de biogás. Mas é possível afirmar-se com segurança que o potencial de produção de biogás e biometano do Brasil é maior do que a necessidade do mercado, em termos de energia consumida hoje. O Brasil tem condições de produzir 100% de suas necessidades em energia elétrica, biocombustível e energia térmica para a indústria, e de forma distribuída, através do biogás gerado a partir de plantas energéticas.

Com dados da Tabela 4 é possível formar uma ideia da quantidade de energia que se pode gerar através da agricultura com apenas 1 milhão de hectares.

Tabela 4: Quantidade estimada de bioenergia produzida por ano conforme a produtividade da silagem de milho

1 milhão de hectares	Produtividade (silagem Milho)	GWh/h	m ³ /dia de CH ₄
1 safra	40 t/ha ano	1,98	12.776.652
1 safra	46 t/ha ano	2,28	14.693.150
Safra + Safrinha/cultura inverno	70 t/ha ano	3,52	22.361.634

Fonte: Autor.

De acordo com os dados do IBGE, de 1992 a 2108, houve uma redução gradual da área plantada de milho em todo o Brasil. Em virtude disto, o Brasil possui condições de produzir, no mínimo, estes mesmos 10 milhões de hectares, que deixaram de serem plantados, com silagem de milho para produção de biogás, se assim o desejar, devido a necessidade de rotação de cultura com a soja. Há maquinário suficiente para o plantio e colheita. Se for feito um planejamento será possível chegar a 30 milhões de hectares, dedicados a produção de biogás para energia elétrica, sem que seja necessário abrir qualquer área nova de terra para o plantio. Este fato é extremamente importante, pois permitiria que os investimentos previstos no plano nacional de energia, até 2030, em hidrelétricas na Amazônia (em função do seu potencial para instalação de hidrelétricas) não sejam mais necessários (PNE 2030) [16].

A partir do biogás é possível produzir: energia térmica, energia elétrica, biometano, dimetil éter, grafeno, etileno. Do etileno verde é possível produzir: LDPE, LLDPE, HDPE, óxido de etileno, EDC, etilbenzeno, alfa olefinas, acetato de vinila, entre outros. Plantas de biogás combinadas com equipamentos de eletrólise podem produzir O₂ e CH₄ a partir de CO₂ e H. Com este sistema também é possível o armazenamento do excesso de energia da rede na forma de gás.

3.4. Tecnologia para produção de biometano

Para a produção de biometano é necessário um projeto adequado de planta de biogás. Após a definição dos tipos de substratos a serem utilizados, da quantidade de biogás que será produzido por hora, do teor de metano que este biogás irá produzir, de se estimar a quantidade de H₂S que estes substratos irão gerar, é possível fazer a

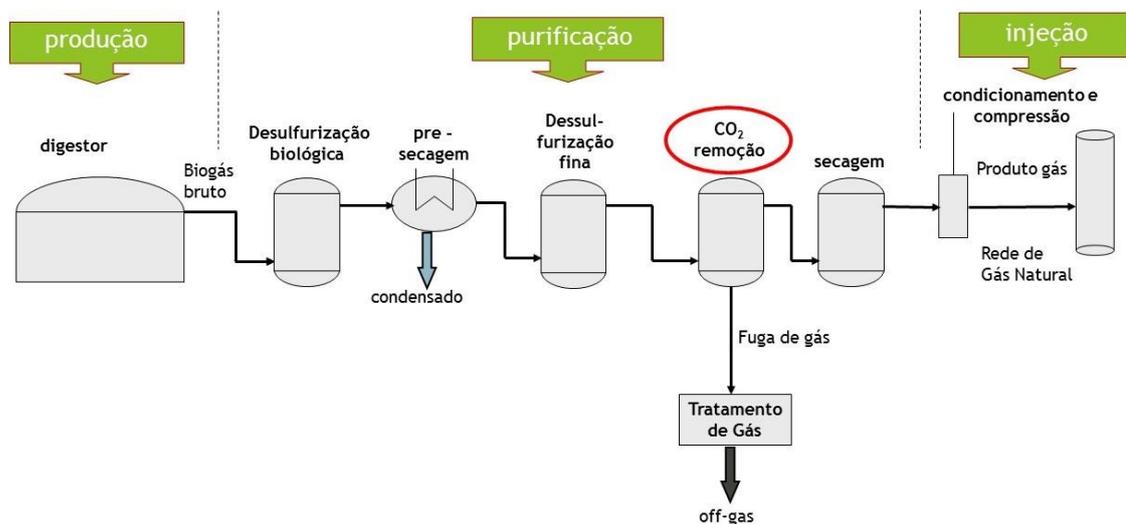
escolha e dimensionar o tipo de sistema de purificação (separação de CO₂) mais apropriado para o tipo de biogás a ser produzido no projeto.

Existem vários sistemas de purificação [17], sendo que as tecnologias mais conhecidas são:

- Adsorção: Sistema PSA (*pressure swing adsorption*)
- Absorção:
 - Absorção física (lavagem de água);
 - Absorção química (lavagem de amina)
- Filtragem: Separação por membranas
- Processo criogênico

Para que a purificação ocorra em conformidade com a norma da ANP, existem algumas exigências no processo a ser implantado, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3: Exigências para purificação do Biogás.



Fonte: [18].

Os critérios para a escolha da tecnologia mais apropriada são: necessidade ou não de pré-purificação, nível de controle, perda de metano, qualidade do metano

produzido (% de CH₄), pressão utilizada, necessidade de energia elétrica, necessidade de calor, necessidade de utilização de produtos químicos.

A maioria destas tecnologias ainda é importada.

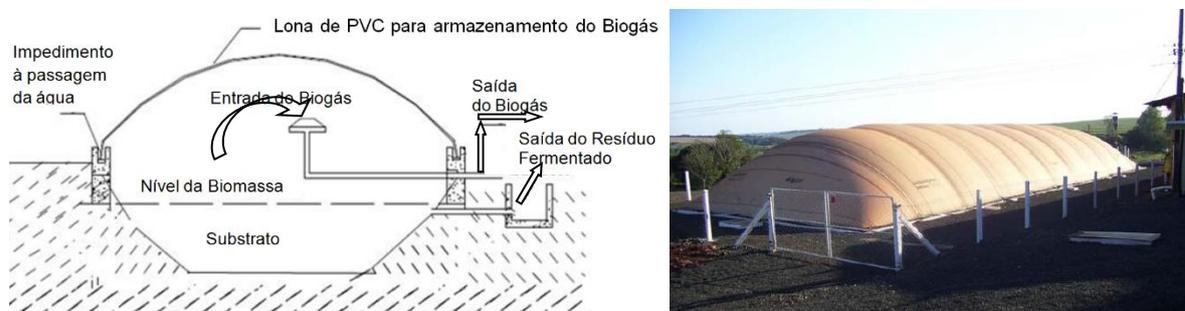
3.5. Situação atual da tecnologia para produção de biogás no Brasil

Quando se discute a possibilidade da implantação de um projeto de biogás, o principal fator que todas as empresas e investidores analisam é o econômico. Os dois componentes que mais impactam no orçamento são: materiais para a construção do reator de fermentação anaeróbio e os componentes da tecnologia envolvida para o seu funcionamento. Se considerarmos que a tecnologia atual para o monitoramento e controle da usina já apresenta uma boa competitividade com relação aos preços e os materiais para a construção já possuem custos definidos, o aspecto que precisa ser mais bem estudado e avaliado é o que tem relação direta com a digestão anaeróbia. É preciso saber sobre o potencial de produção de biogás que cada substrato possui, e com qual tecnologia é possível extrair o máximo de seu potencial.

3.5.1 Modelo Canadense

Atualmente o biodigestor mais utilizado no Brasil é do tipo Canadense, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4: Biodigestor de lona PVC, modelo Canadense.



Fonte: [19] DBFZ, 2011.

ITAIPU possui um grande projeto com agricultores e produtores de suínos, na região de sua influência, baseado neste modelo de biodigestor. Uma das maiores

empresas do ramo do agronegócio, em produção animal, também investiu muito neste sistema para produção de biogás nas propriedades de seus integrados de suínos, na década de 1990. Sua limitação tecnológica para manter os processos biológicos ativos durante o ano inteiro, somado ao problema de assoreamento do sistema, que faz com que o tempo de retenção hidráulico (TRH) diminua com o tempo, foram os fatores que impediram uma maior disseminação desta alternativa para estabilização da matéria orgânica e produção de biogás. A diminuição do TRH causa problemas para o descarte do digestato, que passa da condição de biofertilizante para efluente ou resíduo orgânico não estabilizado.

Este sistema é muito utilizado para produção de biogás a partir de esterco suíno, mas a sua maior limitação reside no fato dele poder trabalhar com substrato contendo no máximo 3% de matéria seca.

Existem empresas trabalhando para resolver as questões do controle do processo biológico, do excesso de H₂S e do assoreamento da lagoa.

3.5.2 Sistema Plug Flow

O sistema Plug Flow, apresentado na figura 5, é um sistema não muito difundido, que utiliza substratos com até 45% de matéria seca, sendo apropriado para substratos pastosos.

Figura 5: Sistema Plug Flow.



Fonte: DBFZ, 2011.

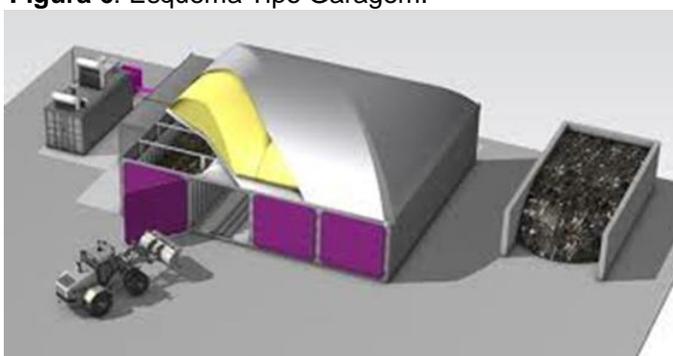
Possui como desvantagem o alto custo de manutenção, tornando-se apropriado apenas para uma pequena de produção de biogás. Para a manutenção do sistema que empurra o substrato é necessário o esvaziamento do biodigestor. Tem

como vantagem possuir a maior quantidade de matéria orgânica por volume de biodigestor.

3.5.3 Sistema tipo Garagem – Fermentação a Seco

A Figura 6 representa o sistema tipo Garagem, que é apropriado para fermentação de resíduos orgânicos de RSU, onde a separação dos resíduos não é perfeita e a matéria orgânica está misturada com plásticos e outros materiais inertes, que não fermentam. A matéria orgânica, após a biodigestão, necessita de uma pós-fermentação aeróbia, chamada de compostagem.

Figura 6: Esquema Tipo Garagem.



Fonte: DBFZ, 2011.

A sua principal vantagem é justamente poder ser utilizado com resíduos orgânicos de RSU – caso do Brasil, onde a falta de separação do lixo domiciliar dificulta a utilização de outros tipos de tecnologia. Aparentemente este sistema poderia ser capaz de concretizar a implantação no Brasil da política nacional de resíduos sólidos (PNRS).

Por fim, pode-se dizer que este sistema trabalha com substratos possíveis de serem empilhados.

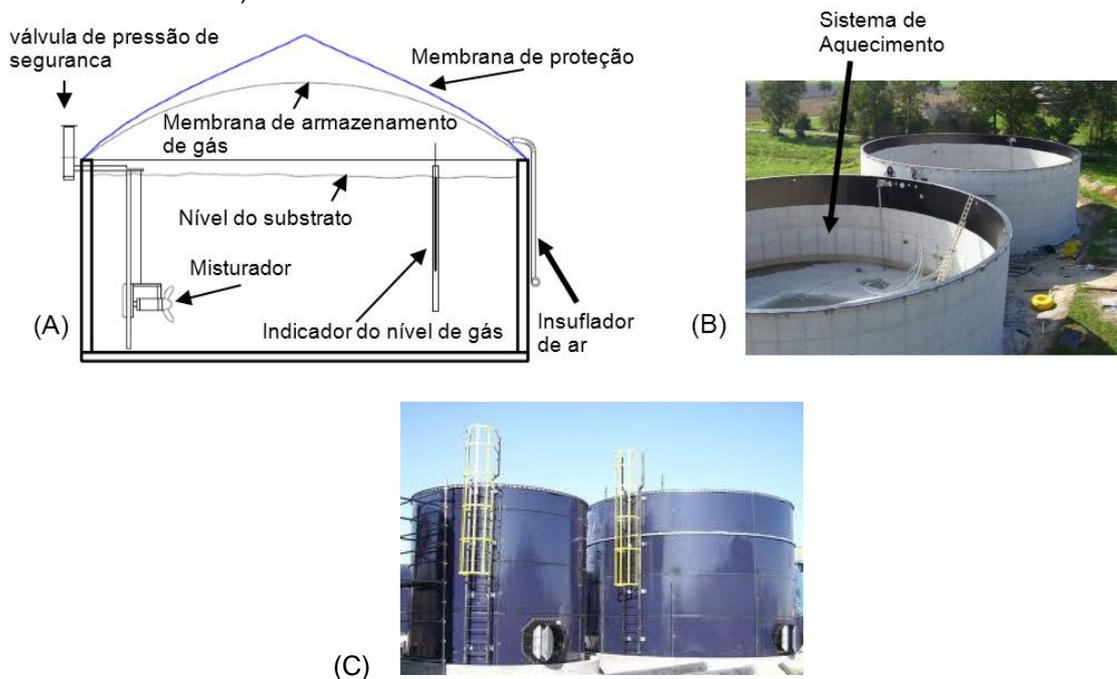
3.5.4 Tecnologia de Fermentação Líquida (CSTR)

Este sistema, que hoje representa em torno de 90% de todas as plantas de biogás existentes, representa a tecnologia conhecida como de alimentação contínua e agitação dos biodigestores. Em inglês é denominada de *Continuous Stirred Tank*

Reactor (CSTR). O material dos tanques de fermentação dessas plantas de biogás, mais implementados na Alemanha, Europa e o restante do mundo, são construídos ou de concreto ou de chapas de aço vitrificadas pelo processo “Glass-Fused-to-Steel”.

Essa forte disseminação através do mundo só foi possível graças à estrutura rígida de seus tanques, permitindo que todos os equipamentos, canos, sistemas de bombas, sensores, e demais equipamentos possam ser firmemente acoplados às suas paredes, como mostra a Figura 7.

Figura 7: (A) Esquema da estrutura e componentes do tanque de fermentação do reator CSTR, (B) Tanques de concreto (em construção). (C) Tanques de aço (Glass-Fused-To-Steel).



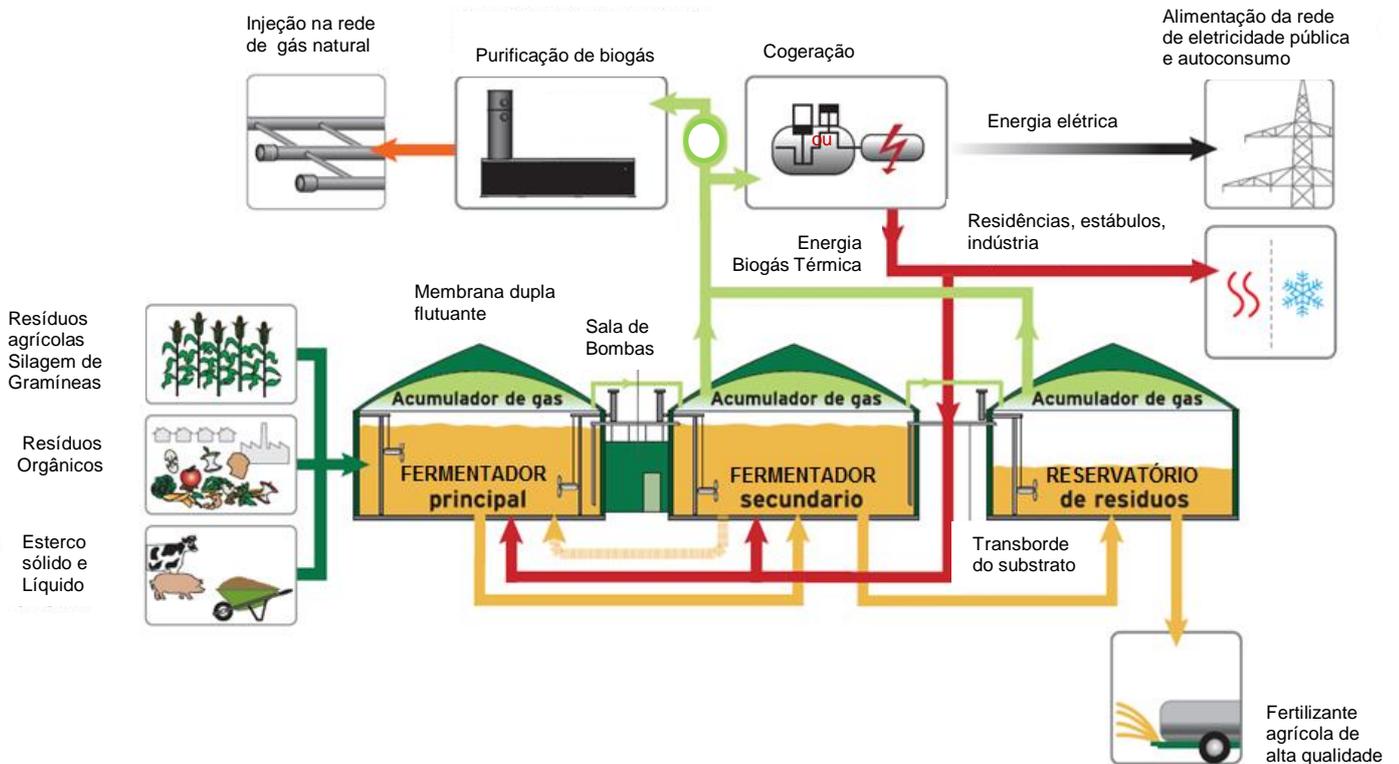
Fonte: figuras (A) e (B) cedidas pela empresa MT-Energie, Zeven, Alemanha e (C) pela empresa PERMASTORE (fabricante de reatores), Inglaterra.

A planta de biogás pode ser concebida com somente um tanque de fermentação anaeróbia ou com dois tanques de fermentação, sendo que, neste caso, um é denominado de principal e o outro de secundário.

Nos dois casos é preciso haver um tanque adicional (ou lagoa), para armazenar o adubo líquido que é gerado após a degradação da matéria orgânica. A Figura 8 mostra o fluxo esquemático de materiais de uma usina CSTR com três

tanques (principal, secundário e reservatório). No fermentador principal ocorre 80% da produção de Biogás e no secundário em torno de 18%.

Figura 8: Esquema de uma planta de biogás com duas etapas de fermentação anaeróbia.



Fonte: figuras cedidas pela empresa MT-Energie, Zeven, Alemanha.

No terceiro tanque, que serve de reservatório, pode existir uma produção residual de 2% de biogás. Para facilitar o manejo e aumentar a capacidade de armazenamento do biogás coloca-se um teto de membrana dupla nos três tanques. Este teto de membrana dupla permite que ele seja aberto e fechado de forma bastante rápida – o que favorece e agiliza a manutenção dos equipamentos. Antes de abri-la é possível repassar o biogás da membrana de armazenamento de gás para os outros dois tanques, evitando-se desta forma a perda do biogás durante a revisão dos equipamentos. Outra vantagem da membrana é que ela evita explosões. Se a pressão no tanque subir de forma demasiada, a membrana se solta automaticamente liberando o gás.

Todos os tanques possuem sistema de aquecimento nas paredes para manter a temperatura mesofílica de 41 °C. O sistema de bombeamento permite o manejo do substrato com apenas uma bomba. As plantas de biogás funcionam de forma automática, monitoradas por uma equipe especializada. O biogás pode então ser utilizado para geração de energia elétrica e térmica. Ele também pode ser purificado para fornecimento direto na rede de gás natural ou comercializado para postos de combustíveis que revendem gás natural.

3.6. Tipos de Substratos

Como já citado anteriormente, os substratos ideais não podem ser lenhosos nem possuir muita lignina. Os mais utilizados em plantas de biogás podem ter a sua origem relacionada a um processo produtivo, no qual ocorre a geração de resíduos orgânicos. Por fim eles podem ser produzidos de forma específica para a geração de biogás. Podemos dividi-los em quatro grupos, conforme a tabela 5.

Tabela 5: Divisão dos principais tipos de substratos para a produção de biogás

<p>Plantas Energéticas Milho (Silagem, grãos) Cereais (trigo, centeio, silagem, grãos) Gramíneas, trevo Sorgo Beterraba Resíduos de destilação (vinhaça, polpa de beterraba, etc.) Resíduos da produção de biodiesel (POME, torta de filtro, glicerol, etc)</p>	<p>Resíduos de produção de alimentos Polpa de beterraba sacarina Produção de amido (batata, milho, arroz) Produção de suco de frutas (cascas, torta de filtro, etc.) Soro de leite e outros resíduos lácteos Resíduos de panificação (massa, pão, etc.) Resíduos de matadouro (linha verde e vermelha) Resíduos da produção de peixe</p>
<p>Resíduos Agrícolas e produção Animal Esterco (gado, porcos, poedeiras) Cama (Gado, aves) Palha (milho, cereais, soja, etc) Biomassa oriunda de podas e cortes de grama Chorume de silagem</p>	<p>Resíduos Sólidos Orgânicos Resíduos de mercearia (alimentos expirados) Restos de comida (restaurantes, fornecedores de alimentos, CEASA, etc.) Resíduos de caixas de óleo e gordura Fração Orgânica de Resíduos Municipais (RSU orgânico) Da produção de couro Resíduos farmacêuticos Lodo de águas residuais primárias e esgoto Resíduos de Supermercados</p>

Fonte: [20]

Plantas energéticas são as plantas cultivadas exclusivamente para obtenção de energia [22]. A biomassa destas plantas pode ser utilizada para geração de calor, através de sua queima, bem como para produção de biocombustível como biodiesel, etanol, biogás e biometano. Para a produção de biogás e biometano, o milho é a planta mais utilizada.

O setor de alimentos é um grande gerador de resíduos orgânicos. No grupo de resíduos da produção de alimentos aparecem as indústrias de produção de carne seguida pela de processamento de grãos e de leite como tendo os maiores potenciais de aproveitamento de resíduos.

No grupo de resíduos agrícolas, os resíduos da produção animal de suínos, bovinos de leite e gado confinado e aves, são os mais utilizados em plantas de biogás.

Já os resíduos sólidos orgânicos com maior potencial de aproveitamento na geração de biogás são os resíduos de supermercado, gorduras, resíduos de restaurantes e de centrais de abastecimento de alimentos (CEASA).

3.6.1. Substratos Agrícolas e suas principais características

Para escolha do melhor substrato a ser utilizado na produção de biogás é preciso investigar suas características. Para que se possa analisar um substrato é necessário saber o seu nome; origem (agrícola, aquática, florestal, etc.); tipo de substrato (dedicado, secundário, resíduo); seus constituintes (carboidratos, lipídios, lignocelulose, fibras, etc.); o teor de matéria seca (MS) ou de sólidos totais (ST); o teor de matéria orgânica seca (MoS) ou de sólidos voláteis (SV) e sua relação carbono-nitrogênio (C/N) [21].

As principais questões que devem ser feitas para a tomada de decisão sobre qual substrato utilizar são [21]:

- Qual a estimativa de produção de biogás em Nm³/t de matéria seca?

- O substrato é apropriado para a digestão anaeróbia?
- Qual o teor de nutrientes do biofertilizante produzido após a sua digestão anaeróbia e se o mesmo é apropriado para o mercado existente?
- O substrato possui boa acessibilidade e logística para ser empregado na produção de biogás?
- As quantidades de biogás e biofertilizante são suficientes para tornar a planta viável economicamente?
- A tecnologia e a infraestrutura necessária para a planta de biogás permite a plena estabilização da matéria orgânica e a venda da energia produzida?
- As perspectivas de mercado para o biofertilizante, venda de energia elétrica e/ou biometano serão mantidas durante o tempo de vida do projeto?
- A opinião pública é favorável a implantação do projeto?

Com relação às vantagens e desvantagens dos substratos agrícolas é interessante destacar as características apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6: Características dos substratos agrícolas

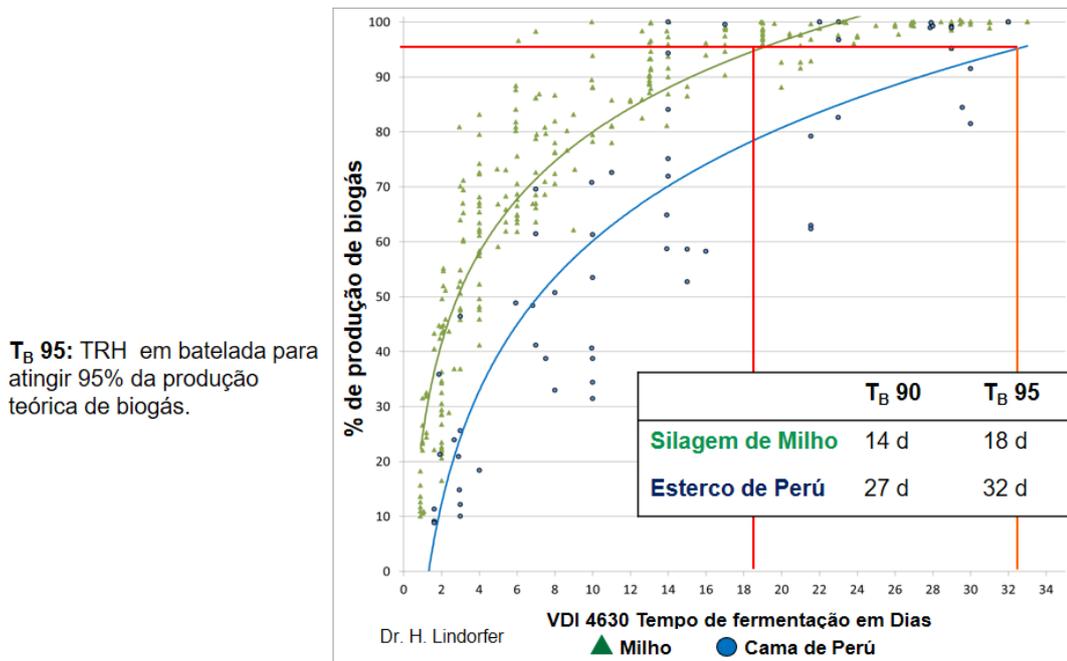
Tipo de Substrato	Vantagens	Desvantagens
'Cama' *	Baixo custo	- Alto teor de fibra - Degradação lenta - Baixo potencial de produção de biogás
Esterco Líquido	- Alta disponibilidade - Baixo custo	- Baixo rendimento energético - Alto teor de água - Possíveis inibidores: Cu, Zn, antibióticos, desinfetantes
Palha e Palha de milho	- Baixo custo	- Degradação lenta - Baixo teor de água - Demanda oligoelementos - Pré-tratamento necessário
Plantas Energéticas	- Alto teor energético - Estabilidade na armazenagem (silagem)	- Em parte com alto teor de fibra - Demanda oligoelementos

Fonte: [20]. *Material que serve de forração do piso em galinheiros e estábulos

Um dos fatores mais importantes em um projeto para construção de uma planta de biogás é o tempo de retenção hidráulico (TRH) que o substrato deve permanecer dentro dos biodigestores até a completa estabilização da matéria

orgânica. O TRH varia de acordo com o tipo de substrato; na Figura 9 é possível comparar o TRH da silagem de milho com o da 'cama' de peru.

Figura 9: Tempo de retenção necessário em ensaio (batelada) para uma degradação aceitável



Fonte: [20]

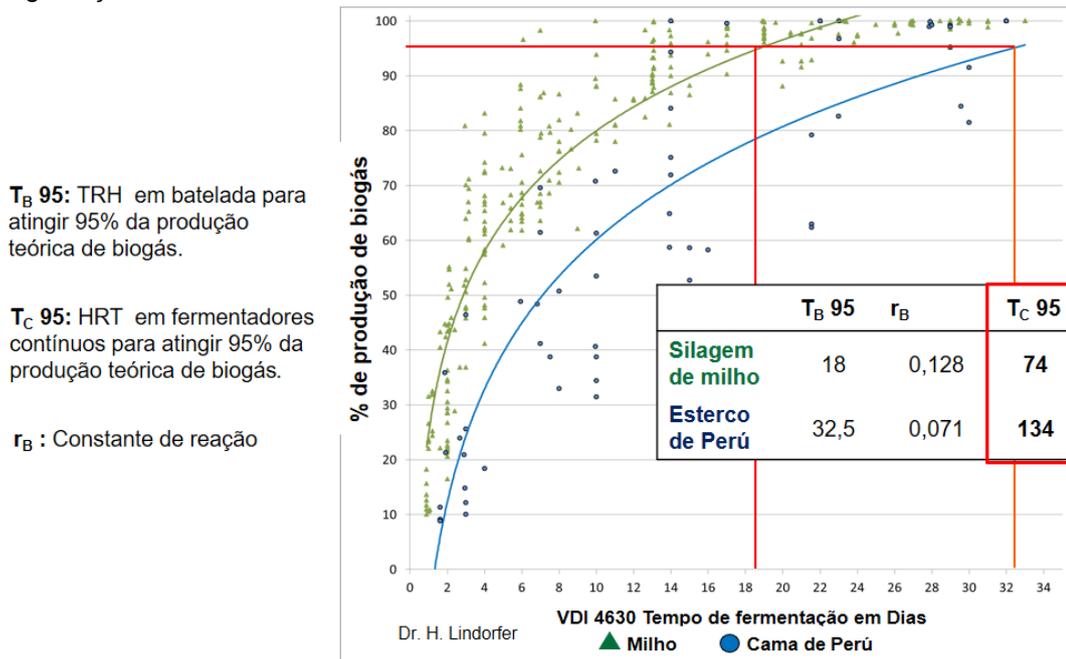
O TRH é o fator que determina o tamanho que um biodigestor deve ter para a produção de biogás. Em experimento de batelada, para a silagem de milho atingir 90% de produção teórica de biogás (T_B 90), são necessários 14 dias. O esterco de peru precisa de 27 dias para atingir os mesmos 90% de produção teórica de biogás. Para obtenção de 95% de produção teórica de biogás a silagem de milho necessita 18 dias e o esterco de peru 32 dias.

Para que a silagem de milho atinja 95% da produção teórica de biogás (T_C 95), em reator contínuo, são necessários 74 dias dentro dos fermentadores. Para o esterco de peru são necessários 134 dias para atingir os mesmo 95% de produção do biogás. Estando ciente de que existe uma diferença de substrato para substrato, é muito importante contar com esta informação para a tomada de decisão na escolha dos melhores tipos de matéria orgânica a ser empregado no projeto. Quanto maior o TRH necessário para a produção de biogás, maior será o investimento na construção dos

fermentadores, pois ele será proporcional ao tamanho do reator; volumes menores são possíveis para substratos com menor tempo de retenção hidráulico (TRH).

Na Figura 10 é possível comparar a produção teórica de biogás de um experimento em batelada com outro realizado em fermentadores de alimentação contínua (CSTR).

Figura 10: Tempo de retenção necessário em ensaio (T_B 95) e em fermentador contínuo (T_C 95) para uma degradação aceitável



Fonte: [20].

Outra característica importante na escolha do substrato é a quantidade de energia contida no biogás produzido. Ela varia de acordo com a quantidade de normal metros cúbicos de biogás produzido por tonelada de matéria seca (Nm^3/t MS) e o seu teor de metano (CH_4).

A silagem de milho aparece como sendo o substrato que mais concentra energia por matéria fresca. Com 50 t/dia deste substrato é possível rodar uma planta de biogás com capacidade instalada de 1 MWh. Se a produtividade da silagem de milho for de 46t/ha, com 397 ha é possível ter substrato suficiente para que esta planta de biogás produza 1 MW_{méd} de energia elétrica durante um ano inteiro.

Na Tabela 7 pode-se comparar a quantidade necessária de substrato por dia a ser alimentado nos tanques fermentadores, para a obtenção de 1 MWh de energia elétrica.

Tabela 7: Comparação de Substratos Agrícolas para a geração de 1 MWh.

Substrato	Produção de Biogás L/Kg MoS	Teor de MS (%MS)	Milho Equivalente	Produção 1 MWh (t/dia)
Silagem de Milho	650	33	1,0	50
Silagem de Gramíneas	560	27	1,7	85
Silagem de Cereais	540	33	1,3	65
Palha de Milho	300-400	50	1,4	70
Esterco de Aves	400	49	1,8	90
Esterco de Gado	330	19	4,9	245

Fonte: [12].

Em relação ao esterco de gado, a silagem de milho concentra cinco vezes mais energia quando a comparação for por matéria fresca. A silagem de cereais é uma alternativa para o Sul do Brasil, onde o agricultor não consegue viabilidade econômica nas culturas de trigo, aveia – dentre outras culturas de inverno.

3.6.2. Plantas Energéticas

Existem mais de 40 culturas agrícolas que podem ser utilizadas como plantas energéticas [12]. Dentre estas, destacam-se as seguintes: milho (silagem), sorgo forrageiro, centeio, triticale, trigo, aveia e gramíneas em geral. É preciso ter a atenção de priorizar culturas anuais e não as perenes, pois desta forma o agricultor pode obter renda plantando outras culturas alternadamente como, por exemplo, a soja, feijão, batata, arroz entre outras, que são destinadas para a alimentação humana.

O milho se destaca como sendo a planta energética com maior produção de energia por hectare, seguida pelo sorgo. Os cereais, centeio, trigo, aveia e triticale se destacam por serem uma excelente alternativa para produção de silagem no inverno visando a produção de energia.

Na Tabela 8 podemos visualizar o potencial de produção agrícola, produção de metano e a conseqüente geração de energia elétrica, por área, em hectares, bem como vantagens e desvantagens das principais plantas energéticas.

Tabela 8: Potencial de Plantas Energéticas para geração de energia

	Milho Silagem	Sorghum bicolor	Centeio, Trigo, Aveia, Triticale	Gramíneas	Sorghum sudanense
Produção / ha	40-70 t MF/ha	60 t MF/ha	30-50 t MF/ha	30-50 t MF/ha	45 t MF/ha
Produção de CH ₄	110 m ³ /t MF	80 m ³ /t MF	110 m ³ /t MF	106 m ³ /t FM	78 m ³ /t MF
Ganho, energia / ha	47.000 kWh/ha	42.200 kWh/ha	38.460 kWh/ha	37.900 kWh/ha	30.800 kWh/ha
	PRODUÇÃO DE ENERGIA				
Vantagens	Fácil armazenagem, Alto conteúdo energético, fácil degradação	Resistente à seca	Alta tolerância em relação à qualidade do solo e clima, alto teor de energia	Alta tolerância à qualidade do solo e clima, Alto rendimento energético, ev. perene	Resistente à seca
Desvantagens	Sensível contra períodos secos	Baixo teor de matéria seca, dificuldade na armazenagem.	O tempo ótimo de colheita é eventualmente muito curto, alto teor de fibra	Alto teor de fibra, armazenagem mais difícil	Baixo teor de matéria seca, dificuldade na armazenagem.

Fonte: [12]; EMBRAPA.

Atualmente o agricultor do Sul do Brasil não tem nenhuma opção de cultura de inverno para geração de renda. Os preços baixos pagos ao agricultor inviabilizam o plantio de trigo para produção de grãos. O sorgo é uma excelente alternativa quando existe o problema de períodos de estiagem na região onde se pretende produzir o substrato para produção de biogás.

3.7. Parâmetros importantes do processo biológico.

Para que o processo biológico ocorra de forma estável devemos controlar alguns parâmetros que estão diretamente relacionados com a produção do biogás. Para se fazer um controle efetivo da produção de biogás é preciso monitorar as condições do meio, no interior do biodigestor, e as condições operacionais da planta de biogás.

Condições do Meio:

Oxigênio: O oxigênio é um elemento que pode inibir a metanogênese, se estiver em concentração superior a 0,1 mg/l no biodigestor. Mas, em concentrações adequadas, pode estimular a dessulfurização biológica e com isso diminuir os custos para a remoção de enxofre (H₂S). A maioria (90%) das plantas alemãs utiliza a injeção de ar (dessulfurização biológica) como forma de oxidar o H₂S para o enxofre elementar. Uma desvantagem deste sistema, se não for monitorado, devido a flutuação constante da concentração de H₂S, é a dosagem imprecisa do ar, que pode causar excesso de gás inerte (N₂) e remanescentes de O₂ no caso de overdose. Neste caso, os custos da limpeza do gás para a produção do biometano pode aumentar – se este for o objetivo como produto final –, e até mesmo inibir a formação de biometano [23].

Temperatura: Os biodigestores podem ser operados em diferentes níveis de temperatura. Psicrófilicos são aqueles que utilizam temperaturas ao redor de 25 °C, Mesofílicos aqueles cuja temperatura varia de 36 °C a 45 °C e termofílicos operam com temperaturas ao redor de 55 °C [24, 25]. Com o aumento da temperatura ocorre um aumento da digestão do substrato pelos microrganismos. Porém, na condição termofílica o controle do processo é muito difícil. A forma mais usual de operação é o mesofílico [26,27].

Valor do pH: Durante o processo de fermentação diferentes microrganismos atuam na degradação da matéria orgânica. As bactérias hidrolíticas e acidogênicas atuam de forma ativa em um pH variando de 5,2 a 6,3, por outro lado as bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas preferem o pH neutro variando no máximo entre 6,5 e 8 [5, 24, 25].

Disponibilidade de Nutrientes: O carbono e o nitrogênio são nutrientes mais importantes para o equilíbrio do processo biológico. Uma relação C/N adequada fica entre 20 a 30/1 [25]. Se a concentração de carbono for muito elevada, a atividade biológica diminui. O contrário também instabiliza o processo, no caso de haver um

excesso de amônia (NH_3), pois pode eliminar toda a população microbiana dentro do biodigestor [24].

Na biodigestão de silagem de milho, como substrato único, o equilíbrio da concentração de micronutrientes (ou microelementos) é muito importante para que a produção de biogás ocorra sem problemas. Um estudo [20] mostra que o níquel e cobalto são extremamente importantes para que o processo biológico ocorra normalmente. Especialmente o níquel, em uma taxa de carregamento de 2,6 g de MoS / l / dia, com concentrações abaixo de 0,1 mg/Kg de massa fresca e cobalto abaixo de 0,02 mg/Kg de matéria fresca aumentam a acumulação de ácidos orgânicos e causam um forte decréscimo do valor de pH com o conseqüente decréscimo da atividade metanogênica. Com os níveis de níquel e cobalto ao redor de 0,6 e 0,05 mg/Kg de matéria fresca, respectivamente, a fermentação ocorre de forma estável até uma taxa de carregamento orgânica de 4,3 g MoS / l / dia.

Inibidores

Os inibidores mais comumente presentes na biodigestão anaeróbia incluem amônia, sulfeto, íons de metais leves, metais pesados e orgânicos [26]. A presença de certos íons como Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} foram identificados como sendo antagonistas à inibição da amônia, um fenômeno no qual a toxicidade de um íon decresce em função da presença do outro. Já a inibição por sulfeto ocorre quando bactérias sulfato redutoras (SRB) realizam a redução do sulfato (SO_4^{2-}) para sulfeto (H_2S). Esta inibição ocorre em dois estágios. Uma delas se deve à competição por substratos orgânicos e inorgânicos das bactérias sulfato redutoras, que suprime a produção de metano, devido a completa conversão de acetato em CO_2 e HCO_3^- . A outra forma de inibição consiste da toxicidade do H_2S sobre vários grupos de bactérias.

Ácidos graxos voláteis e nitrogênio amoniacal total precisam estar em equilíbrio para que a formação de metano ocorra normalmente. O excesso de um ou de outro pode inibir a produção de biogás. Excesso de ácidos graxos voláteis

combinado com baixo valor de pH exercem forte inibição do processo metanogênico [25].

Condições Operacionais:

- Carga orgânica volumétrica e tempo de retenção hidráulico (TRH) no biodigestor: a quantidade de matéria orgânica por volume (m^3) de tanque e o tempo que o substrato permanece no seu interior influenciam a produção de biogás. Um excesso de carga orgânica volumétrica pode causar a interrupção do processo biológico, pelo acúmulo de ácido. O tempo de retenção hidráulico é o tempo que o substrato permanece dentro do biodigestor. Dependendo do tipo de resíduo ou planta energética ele deve permanecer mais ou menos tempo. A biodigestão anaeróbia é afetada por componentes, tais como: palha, poda de árvores, materiais inorgânicos como areia, vidro, metais ou componentes poliméricos como plásticos [25, 27]. Em biodigestores de alimentação contínua e agitação o TRH pode variar de um mínimo de 20 dias até 135 dias ou mais, dependendo do substrato.

- Produtividade de metano em relação ao volume do biodigestor: a quantidade de metano produzida por volume de tanque é um parâmetro que dá noção sobre o aspecto econômico de retorno do capital investido. Quanto maior a produtividade por volume de tanque mais rápido será o retorno do capital investido.

- Taxa de degradação com base na matéria orgânica seca: a matéria orgânica seca (MoS), também expressa em sólidos voláteis (SV), indica a quantidade de matéria orgânica disponível para a degradação. Tanto a quantidade de SV como o tamanho da partícula do substrato (diâmetro) influenciam na taxa de degradação. Quanto menor for a partícula, maior será a taxa de degradação. Já a degradação da matéria orgânica é influenciada pelos seus constituintes (matéria mineral, fibra bruta, proteína, lipídios, carboidratos, lignina). Quanto maior for o teor de lignina, mais lenta será a sua degradação.

- Agitação e Viscosidade: a agitação é importante para que a bactéria possa ter contato com o substrato que vai sendo adicionado a cada espaço de tempo pré-determinado [25]. Outro aspecto relacionado à agitação é a temperatura, que deve ser homogênea em todo volume do biodigestor. A viscosidade pode influenciar na temperatura do biodigestor, fazendo com que esta aumente se o substrato for muito viscoso. Outras influências de um substrato mais viscoso: um é sobre a manutenção dos equipamentos, que podem ter um desgaste mais acelerado (pás dos agitadores), outro é sobre o maior gasto energético no bombeamento.

3.8. Problemas relacionados à silagem

Um dos problemas da biodigestão com plantas energéticas está relacionado aos macros e micronutrientes. Eles exercem função importante na digestão anaeróbia, funcionando como estimuladores/aceleradores na produção de biogás. Em relação aos reagentes químicos, que demandam mais energia, eles possuem ainda a vantagem de serem ecologicamente corretos. Este estímulo é muito mais significativo na digestão anaeróbia de plantas energéticas, resíduos de agricultura e fração orgânica de RSU, que possuem deficiência destes elementos. Os microrganismos necessitam de micronutrientes não só para o seu crescimento, mas também para o suporte de atividades enzimáticas, reações químicas e coprecipitação durante o processo de digestão anaeróbia [27]. Por isso, na utilização de silagem de milho como único substrato, a adição de microelementos é essencial [20].

A colheita da planta de milho para silagem deve ser bem-feita. O corte, se possível deve ter uma média de 1,0 cm a 1,5 cm de comprimento. Isto possibilita um bom armazenamento, que deve acontecer na ausência de oxigênio. Para isto é preciso que o silo permita que os tratores possam compactar silagem, de forma a expulsar todo o oxigênio existente no monte. O teor de matéria seca (MS) deve estar em torno de 33% e 35%. Se houver presença de oxigênio associado à baixa umidade, isso possibilita grande atividade respiratória, que causa o aumento da temperatura interna do silo favorecendo o aparecimento de fungos e mofos [28].

Caso haja aparecimento de fungos e mofos sobre a silagem, Figura 11, é preciso evitar que estes sejam carregados para dentro dos biodigestores.

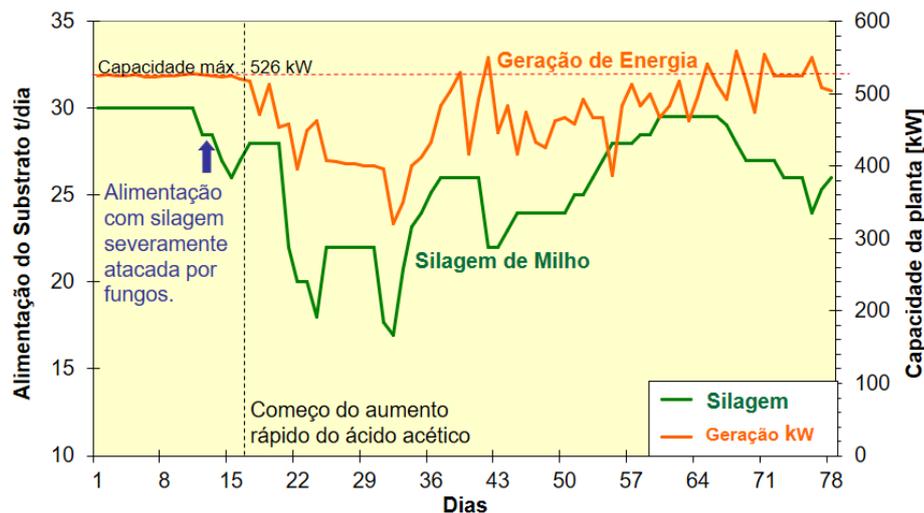
Figura 11: Aspecto de fungos crescendo em silagem de milho



Fonte: Fotos cedidas por Schaumann Bioenergy, Dr. H. Lindorfer.

Estes fungos produzem micotoxinas que impactam grandemente a fermentação anaeróbia, reduzindo a produção de biogás e consequentemente da geração de energia e/ou produção de biometano. Na Figura 12 é possível visualizar o prejuízo que estas micotoxinas causam ao processo biológico. Logo após a alimentação com silagem severamente atacada por fungos há uma forte redução da geração de energia.

Figura 12: Efeitos da inibição de micotoxinas em aplicações de escala na prática



Fonte: [29]

A exclusão do ar é fundamental para o sucesso da armazenagem e preservação do potencial de produção de biogás da silagem. Em condições

desfavoráveis de armazenamento, aditivos aplicados à silagem podem evitar perdas do seu potencial energético [30].

3.9. Biofertilizantes

Após a estabilização da matéria orgânica, através da digestão anaeróbia dentro dos biodigestores, o digestato, produto final da biodigestão, está pronto para ser utilizado como biofertilizante. A composição de NPK e micronutrientes varia conforme a constituição do substrato utilizado. Esta composição também é influenciada pelo tipo e fertilidade do solo onde a planta energética foi produzida. Na Tabela 9 podemos comparar três cenários. Somente plantas energéticas e plantas energéticas + 30% de esterco em duas plantas de biogás distintas (Pinnenberg e Elsdorf na Alemanha).

Tabela 9: Digestato – Valor do Fertilizante

Composição	Somente Plantas Energéticas	Plantas Energéticas + 30% de esterco	
	Pinnenberg	Pinnenberg	Elsdorf
Matéria Seca (MS)	8,5%	6,5%	5,9%
Matéria orgânica Seca (MoS ou SV)	6,3%	4,8%	4,4%
Total N	6,2 Kg/m ³	5,4 Kg/m ³	4,20 Kg/m ³
NH₄-N	2,9 Kg/m ³	2,6 Kg/m ³	3,30 Kg/m ³
P₂O₅	1,9 Kg/m ³	1,8 Kg/m ³	1,01 Kg/m ³
K₂O	5,1 Kg/m ³	3,9 Kg/m ³	4,08 Kg/m ³
N – P – K	6 – 2 – 5	5 – 2 – 4	4 – 1 – 4

Fonte: Autor.

O fato de os macros e micronutrientes não serem voláteis faz com que todos estes elementos, contidos na silagem de milho, permaneçam no digestato ao final do processo de biodigestão. Com isso, torna-se possível adubar o solo para produção de uma mesma quantidade de planta novamente, o que torna a produção de biogás a partir de plantas energéticas sustentável, sem a necessidade de adubação química a partir da segunda safra.

Na comparação de adubação de NPK com digestato, um experimento realizado em dois tipos de solo diferentes, um solo mais pobre e outro convencional, com boa fertilidade, demonstrou que o digestato tem um desempenho melhor em

solos mais pobres do que a adubação convencional NPK. Isso acontece devido a melhoria da qualidade do solo com o passar dos anos, pois a adubação orgânica aumenta o teor de carbono no solo, retém mais água e aumenta a aeração do solo, melhorando a sua fertilidade, possibilitando assim o aumento da produtividade ano após ano [31].

Quando se compara a adição de esterco de gado com digestato, o resultado é sempre favorável ao digestato, pois ele possui características que influenciam positivamente o solo. Esta dúvida sempre existiu entre os agricultores, na Alemanha e no Brasil, pois há uma “crença” de que o digestato pode afetar a microbiota e a fertilidade do solo, pois ele contém mais nitrogênio mineral (N) e menos carbono orgânico (C) do que os insumos não digeridos (por exemplo, dejetos de animais in natura e/ou restos de culturas não decompostos). Para dirimir esta dúvida foi realizado um experimento onde se utilizou (1) água, (2) dejetos de gado cru, (3) dejetos de gado / silagem de milho digeridos anaerobicamente em planta de biogás, (4) dejetos de gado / grama-trevo também anaerobicamente digeridos e (5) adubação verde de grama-trevo (fresco), para aplicação ao solo em taxas normalmente utilizadas pelos agricultores [32]. O resultado deste experimento mostrou que a fertilização com materiais anaerobicamente digeridos aumentou a concentração de NO_3 cerca de 30 a 40% em comparação à aplicação do esterco de gado cru.

A adubação verde de trevo mais gramíneas contribuiu com quatro vezes mais C orgânico degradável do que os outros materiais, causando um aumento da biomassa microbiana que consumiram do solo o N mineral e provavelmente também o O_2 . Em consequência disso, a adubação verde com trevo mais gramínea, adicionado ao solo, causou um aumento de 10 vezes dos gases de efeito estufa pelas emissões de CO_2 e N_2O , em comparação com qualquer um dos outros tratamentos durante os 9 dias [32].

Com relação à composição da comunidade microbiana, o adubo verde trevo/gramíneas induziu as maiores mudanças nas medidas de diversidade microbiana em comparação com os controles, onde a matéria seca e os dois materiais

anaerobicamente digeridos (dejetos / s. milho, trevo / gramíneas) apenas induziram mudanças menores e transitórias.

Este estudo [32] mostra a contribuição que a tecnologia de biogás pode oferecer em termos de mitigação global das emissões de CO₂, aumento da substituição da adubação nitrogenada sintética e favorecimento da reutilização de nutrientes através de sua reciclagem. Pois, muitos dos nutrientes são escassos (ex.: P) e cotados em dólar, devido à necessidade de importação. O maior ganho está no aumento da produtividade do solo e redução de custos na produção agrícola.

Na Tabela 10 é possível visualizar os valores obtidos deste experimento [32] que compara dejetos de bovinos cru com adubação verde de gramínea/trevo e fertilizantes orgânicos de plantas de biogás (digestato).

Tabela 10: Teores de N total, N-amônio, nitrato-N, C orgânico total e C orgânico dissolvido em três fertilizantes à base de lama, bem como N total e C em cortes de gramíneas-trevo usadas como adubo verde; as variáveis são dadas por kg de material fresco aplicado e por g de solo seco nas unidades experimentais

Fertilizante	Teores do Fertilizante (mg / Kg de material)			
	Dejetos de Bovinos Cru	Digestato Dej.Bov.+S. Milho	Digestato Dej.Bov./Gr.+Trevo	Adub. Verde
N Total	1648	2290	2356	6348
NH₄-N	746	1018	1051	n.a.
NO₃-N	0,47	0,68	0,93	n.a.
C org. Total	18159	18266	17640	94813
C org. Diss. Fr. Líquida	3227	1910	1930	n.a.
Fertilizante	Teores do Fertilizante (µg / g de solo seco)			
	Dejetos de Bovinos Cru	Digestato Dej.Bov.+S. Milho	Digestato Dej.Bov./Gr.+Trevo	Adub. Verde
N Total	112	185	187	140
NH₄-N	51	82	83	n.a.
NO₃-N	0,04	0,06	0,07	n.a.
C org. Total	1238	1472	1402	2086
C org. Diss. Fr. Líquida	220	154	153	n.a.

Fonte: [32]

4. CENÁRIOS

Os resultados obtidos para os diferentes cenários são baseados em dados obtidos de plantas de biogás em funcionamento na Alemanha, porém, os custos relativos à produção de plantas energéticas são oriundos de instituições como EMBRAPA, EMATER e de produtores rurais do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso.

4.1. Metodologia

Os dados, que permitiram realizar os cálculos de viabilidade econômica das plantas de biogás utilizando plantas energéticas foram baseados, em parte, em valores médios de produção de biogás obtidos durante os anos de 2010 e 2014, quando o autor deste trabalho trabalhou em uma empresa de construção de plantas de biogás, em Zeven, na Alemanha. A empresa possuía um banco de dados de mais de 2.000 plantas de biogás e operava uma planta de biogás a partir de silagem de milho ao lado de sua sede administrativa. Outras fontes de dados são: uma planta de biogás, em Pinnenberg, vizinha a Hamburgo, que opera, desde 2011, somente com silagem de milho, e outra, em Elsdorf, que utiliza silagem de milho e esterco bovino.

Os preços dos equipamentos para construção de plantas de biogás foram obtidos através da empresa Eco Erneuerbare Energien GmbH, Rottemburg/Wüme, Alemanha e ECOTERRA-BIO, Santa Cruz do Sul, RS, parceira da empresa alemã para projetos Turn-Key no Brasil.

As tabelas de custo de produção de silagem de milho e aveia foram obtidas de empresas agrícolas, produtores de leite, produtores de semente, além da EMATER e EMBRAPA. Estes custos variam fortemente em função da qualidade do solo, teor

de matéria orgânica do solo, custos logísticos para aquisição dos insumos agrícolas, qualidade dos equipamentos para produção, entre outros.

4.1.1. Dados de produção de biogás

Uma das fontes de dados de produção de biogás utilizadas para estimar a viabilidade econômica da planta de biogás a partir de plantas energéticas foi obtida através de uma média de produção de plantas de biogás na Alemanha, que utilizam plantas energéticas como silagem de milho e cereais (centeio, trigo e aveia) como substrato para produção de energia elétrica e biometano, Tabela 11.

Tabela 11: Dados médios de plantas de biogás na Alemanha

COMPOSIÇÃO	Silagem de Milho	Silagem de Cereais
Matéria Seca (MS)	33%	32%
Matéria orgânica Seca MoS / MS	95%	93%
Teor de Metano	53%	53%
N-Total (% na MS)	1,4%	1,6%
P ₂ O ₅ (% na MS)	0,6%	0,6%
K ₂ O (% na MS)	1,6%	1,1%
Matéria Orgânica (MS / m ³)	314 Kg	298 Kg
m ³ de Biogás / tonelada Matéria Fresca	226 m ³ /t	196 m ³ /t
m ³ de Metano / tonelada Matéria Fresca	120 m ³ /t	104 m ³ /t
% de CO ₂	45,5%	45,5%

Fonte: Dados médios de mais de 2.000 plantas de biogás assistidas, na forma de prestação de serviço de manutenção, pela empresa MT – Energie.

Composição e biodegradabilidade são questões chaves para a produção de metano a partir de plantas energéticas e dejetos de animais. Proteína bruta, gordura bruta, fibra bruta, lignina, celulose, hemicelulose, amido e açúcar são os componentes que influenciam fortemente a formação de metano [33].

A silagem de milho é a que apresenta maior potencial para produção de energia dentre todas as plantas energéticas. Na Tabela 12, é possível visualizar a composição de diferentes variedades híbridas de milho. O percentual e a disponibilidade de substâncias contidas na silagem para a produção de metano é influenciada pela variedade, cultivo, fertilidade do solo e estágio de maturidade da

planta na hora da colheita. Foi possível perceber que a relação C/N, em destaque na Tabela 12 com a cor amarela, tem forte influência sobre a produção de CH₄. Quanto mais próximo da relação 30/1 (C/N), maior é a conversão para produção de metano e o potencial máximo é atingido.

Tabela 12: Composição de nutrientes das amostras: XP = Proteína Bruta; XL = Gordura Bruta; XF = Fibra Bruta; XA = Cinzas; ADL = Lignina; Cel = Celulose; Hem = Hemicelulose; C/N = C:N; Produção de Biogás e Metano em m³/t Sólidos Voláteis (273 K, 1,013 bar)

Híbrido Milho	XP	XL	XF	XA	ADL	Cel	Hem	C/N	Biogás m ³ /t SV	Metano m ³ /t SV	%CH ₄
PR38F70	9,2	1,7	23,7	5,8	7,1	33,6	30,4	42,3	544	312	57,35
PR38H20	8,7	2,2	30,2	5,3	6,6	35,4	25,4	35,7	535	300	56,07
NK THERMO	7,7	2,1	22,7	6,4	7,7	28,4	27,6	33,3	455	251	55,16
NK CISKO	7,9	1,9	20,6	6,1	6,9	29,8	30,2	40,2	515	290	56,31
PR37D25	9,8	2,6	19,5	5,9	8,8	30,3	30,3	37,7	526	306	58,17
PR37F73	6,7	2,4	27,7	6,5	7,3	33,8	27,8	32,2	603	349	57,88
PR37M34	7,3	1,8	24,6	5,4	7,5	29,2	26,5	29,8	603	339	56,22
PIXXIA	8,5	2,4	31,5	7,2	6,9	24,6	26,7	30,8	602	345	57,31
NKPAKO	6,8	2,0	28,7	6,8	8,4	20,3	30,1	31,5	507	281	55,42
RAXXIA	7,8	1,9	19,8	7,6	6,6	22,2	28,2	36,6	546	309	56,59
PR36K67	7,6	2,5	20,3	5,3	8,5	24,3	30,4	30,8	572	331	57,87
POXXIM	9,8	2,2	23,2	7,3	6,1	27,8	29,9	31,2	527	291	55,22
TIXXUS	7,6	1,8	29,4	7,0	7,8	23,3	28,6	38,1	545	308	56,51
CODISTAR	8,9	1,9	20,3	6,8	6,4	22,6	24,4	33,5	559	330	59,03
PR34N43	7,3	1,7	22,2	6,2	4,2	21,2	27,7	34,1	521	294	56,43

Fonte: [33]

Na Tabela 13 são apresentados dados sobre a produção de biomassa por diferentes partes da planta de milho.

Tabela 13: Produção de Biomassa por diferentes partes da planta

Porção da Planta	Classe da FAO	Produtividade t/ha	Percentual da Matéria Seca %	Produtividade da Matéria Seca t/ha	Metano m ³ /ha
Planta Inteira	600	80,54	37,00	29,80	10.212
	700	83,98	35,90	30,15	10.605
Corte da planta à 75 cm	600	45,60	47,15	21,50	9.523
	700	60,99	45,25	23,60	9.784
Somente Espiga	600	22,48	61,40	13,80	7.961
	700	20,33	61,25	12,45	7.707
Somente a Planta Sem a Espiga	600	48,66	31,75	15,45	3.328
	700	58,18	30,25	17,60	3.554

Fonte: [34].

Quando se faz o corte da silagem em diferentes partes da planta, com o objetivo de se avaliar o potencial de produção de biogás de cada uma delas, é possível perceber que há uma grande diferença de potencial de produção entre: colher a planta inteira para silagem ou colher somente a palha, sem a espiga [34].

A espiga é a parte da planta de milho, que concentra a maior parte do potencial de geração de metano. Em seguida vem a planta colhida a uma altura de 75 cm do chão. A planta inteira, obviamente, é a que mais produz metano. Quando visualizamos a quantidade de metano produzida pela planta sem a espiga, é possível perceber a baixa produtividade desta fração. Por isso, quando a distância da lavoura até o local de armazenamento da silagem for grande, é possível avaliar a possibilidade de se colher somente a espiga ou de se cortar a planta a uma altura maior, próxima da espiga, a 75 cm de altura, para reduzir o custo do transporte.

4.1.2. CAPEX e OPEX.

Os custos analisados, para o cálculo de viabilidade econômica de uma planta de biogás a partir de plantas energéticas, foram, CAPEX: construção de um pré-tanque de 7 m de diâmetro por 4 m de altura e mais um tanque de fermentação de 28 m de diâmetro por 8 m de altura, ambos de concreto; área para armazenamento da silagem com piso de concreto e muros de contenção entre as câmaras de armazenagem, cuja área varia em função da quantidade de silagem necessária para seis meses; um motor de 1.067 kW de potência; tecnologia de alimentação da planta; tubulações, agitadores e tecnologia de bombeamento; sistema de controle da planta de biogás; custos adicionais da construção (construção da área de silagem, terraplanagem, conexões elétricas e licenciamento – dentre outros); queimador e container de transporte de gás; seguro e lagoa para armazenagem do biofertilizante; OPEX: manutenção do motor; suporte biológico; nutrientes minerais; custo hora de três funcionários; custo de operação para alimentação do substrato; custo de autoconsumo de energia do sistema; juros do financiamento (Programa ABC); financiamento de 10 anos; manutenção da planta de biogás; custo do substrato

(conforme planilha de custo para a produção de 1 ha de milho e/ou de cereais, para silagem); custo do separador do biofertilizante, taxas e administração.

O CAPEX varia, um pouco, de acordo com o tipo de substrato a ser utilizado em função da variação do tamanho da área destinada ao armazenamento da silagem e da quantidade da silagem a ser produzida no primeiro ano. O valor do CAPEX sem a área da silagem e o investimento na produção das culturas energéticas é de R\$9.930.950,00. Para o cálculo da viabilidade econômica de cada cenário o CAPEX foi ajustado para cada caso, considerando a adição de custo relativo à produção do substrato e da construção da área da silagem.

O OPEX varia em cada cenário em função dos custos variáveis de produção das culturas energéticas. O custo fixo é o mesmo, variando minimamente em função do custo de manutenção do motor.

4.2. Análise de Cenários de Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica de uma planta de biogás, no meio rural, foi analisada para os seguintes cenários:

- Somente com a utilização de silagem de milho (SM) – Cenário 1.
- Somente com a utilização de silagem de cereais (SC) – Cenário 2.
- Com SM e SC – Cenário 3.
- Dejeito de Suínos (DS) – Cenário 4.
- Dejeito de Bovinos (DB) – Cenário 5.

4.2.1. Cenário 1: Silagem de Milho

Para a determinação do cálculo de viabilidade de uma planta de biogás, de 1 MW de potência instalada, que utiliza o monosubstrato de silagem de milho, com uma produtividade de 40 t/ha, foram considerados os dados da Tabela 14.

Tabela 14: Dados de produção do Cenário 1 – Produtividade de 40 t/ha de silagem de milho

Total de ha	500	ha
Produtividade da Silagem de Milho	40	t/ha
Silagem de Milho	20.000	t/a.a.
Potência Elétrica Teórica	999	kW
Potência de Queima Teórica	2.347	kW
Produção de Biogás	4.198.392	m ³ / a.a.
Produção de Biogás	479	m ³ /h
teor de Metano	51,0	%
Produção de Metano	244	m ³ /h
Capacidade anual	8.012	h
total de digestato produzido	6.574	t / 6 meses
total de substrato (digestato) adicionado	18.600	m ³ /ano
quantidade total digestato produzido ao final	13.148	m ³ /ano
área utilizada para a silagem (6 meses)	3.859	m ²
Custo de produção silagem	R\$ 1.995,63	/ha
Geração anual de energia elétrica a partir do biogás	8.752.501	kWh/p.a.
Consumo de energia da linha de fermentação.	437.625	kWh / a.a. autoconsumo
Consumo de energia do Motor e perdas do transformador	175.050	kWh / a.a. autoconsumo
Total gerado para venda Energia Elétrica	8.139.826	kWh / a.a.

Cálculo para obtenção da quantidade média de produção de biogás:

$$\text{Silagem de Milho} - 20.000 \text{ t/ano} \div 365 \text{ dias} = 50,96 \text{ t/dia}^* \text{ (SM)} \quad (1)$$

$$* \text{Considerando } 7\% \text{ de perda da silagem no armazenamento.} \quad (2)$$

$$50,96 \text{ t/dia (SM)} \times 33\% \text{ MS} \times 95\% \text{ MoS} = 15,976 \text{ t/dia MoS}$$

Considerando a geração de biogás como sendo:

$$720 \text{ m}^3/\text{t MoS} \times 15,976 \text{ t/dia MoS} = 11.502 \text{ m}^3/\text{dia} \quad (3)$$

Considerando um Motor de 1,131 MW de potência e eficiência (ef.) de 41,0%, temos:

$$11.502 \text{ m}^3/\text{dia} \times 51\% \text{ CH}_4 = 5.866 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \quad (4)$$

$$5.866 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \times 9,97 \text{ kW} / \text{m}^3 \text{ CH}_4 \times 41,0\% \text{ ef.} = 23.978 \text{ kWh} / \text{dia} \quad (5)$$

$$23.978 \div 24\text{h} = 999 \text{ kW de Potência Teórica} \quad (6)$$

Para o cálculo da viabilidade econômica foram utilizadas as condições de financiamento do programa ABC (BNDES) para 3 CPF de pessoas físicas, cujo financiamento máximo por CPF é de R\$5.000.000,00. O capital próprio considerado é de 20% e prazo de 10 anos com 1 de carência. Os juros do financiamento são de 6% ao ano.

Conforme os dados apresentados na Tabela 14, o custo de produção da silagem é de R\$1.995,00 por hectare. O preço de venda da energia é de R\$520,00 por MWh. O modelo de negócio segue ao de autoconsumo, de acordo com as regras das resoluções 482 e 687 da ANEEL.

O fluxo de caixa anual, para um CAPEX de R\$ 10.816.807,90, está descrito na Tabela 15.

Tabela 15: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 1

	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Dados	1	2	3	4	5
RBV	705.451,58	4.232.709,48	4.232.709,48	4.232.709,48	4.232.709,48
CV	997.817,00	997.817,00	699.687,00	699.687,00	699.687,00
CF*	593.492,48	1.940.923,94	2.171.239,82	1.855.642,47	2.166.564,25
DPC		842.942,50	842.942,50	842.942,50	842.942,50
CO (CF+CV)	1.591.309,48	2.938.740,94	2.870.926,82	2.555.329,47	2.866.251,25
RBA I.R.*	-885.857,90	1.293.968,55	1.361.782,66	1.677.380,01	1.366.458,24
RBA I.R.	-885.857,90	451.026,05	518.840,16	834.437,51	523.515,74
(25%) I.L.	-	-	129.710,04	208.609,38	130.878,93
(9%) C.S.L.L.	-	-	46.695,61	75.099,38	47.116,42
L.L.A.I.R.	-885.857,90	1.293.968,55	1.185.377,01	1.393.671,26	1.188.462,89

Continuação:

	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Dados	6	7	8	9	10
RBV	4.232.709,48	4.232.709,48	4.232.709,48	4.232.709,48	4.232.709,48
CV	699.687,00	699.687,00	699.687,00	699.687,00	699.687,00
CF*	1.766.575,80	1.929.272,41	1.687.270,75	2.869.266,08	1.507.102,28
DPC	842.942,50	842.942,50	842.942,50	842.942,50	842.942,50
CO (CF+CV)	2.466.262,80	2.628.959,41	2.386.957,75	3.568.953,08	2.206.789,28
RBA I.R.*	1.766.446,68	1.603.750,07	1.845.751,74	663.756,40	2.025.920,20
RBA I.R.	923.504,18	760.807,57	1.002.809,24	-179.186,10	1.182.977,70
(25%) I.L.	230.876,04	190.201,89	250.702,31	-44.796,52	295.744,43
(9%) C.S.L.L.	83.115,38	68.472,68	90.252,83	-16.126,75	106.467,99
L.L.A.I.R.	1.452.455,26	1.345.075,50	1.504.796,60	724.679,68	1.623.707,78

Abreviaturas: RBV – Receita Bruta de Vendas; CV – Custo Variável; CF* - Custo Fixo sem Depreciação; DPC – Depreciação; CO – Custo Operacional; RBA I.R.* - Receita Bruta Antes do Imposto de Renda sem Depreciação; RBA I.R. – Receita Bruta Antes do Imposto de Renda com Depreciação; I.L. – Imposto sobre o Lucro; C.S.L.L. – Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido; L.L.A.I.R. – Lucro Líquido Antes do Imposto de Renda.

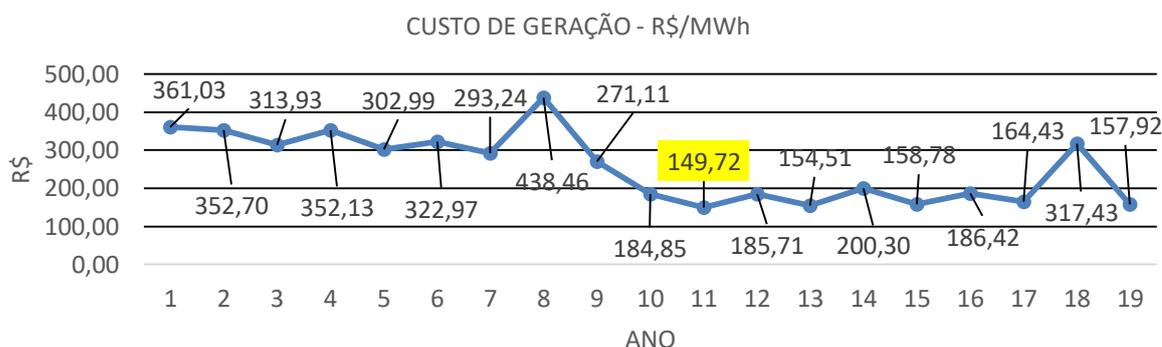
No cálculo dos indicadores econômicos não foi considerada a inflação anual.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) para os 10 primeiros anos ficou em 26,87% e para 20 anos em 31,05%.

Se considerarmos o primeiro ano, no qual foi construída a planta de biogás, como sendo o ano “zero”, o retorno sobre o investimento (ROI) acontece no décimo mês do terceiro ano (34 meses).

O custo de geração da energia elétrica pode ser visto na Figura 13.

Figura 13: Custo de Geração de 1 MWh de Energia Elétrica a partir do Biogás (40t/ha) – Cenário 1.



Após o pagamento do financiamento, no 11º ano é possível constatar que o custo para geração de 1 MWh cai para R\$ 149,72.

Se considerarmos uma produtividade maior por hectare, com o mesmo gasto para implantação, colheita e armazenamento da silagem, então obteremos os valores apresentados na Tabela 16:

Tabela 16: Viabilidade Econômica em função da Produtividade da Silagem de Milho

Cenário	Silagem t/ha	Área ha	RB	OPEX	TIR (Anos)		ROI (Meses)
					10	20	
1	40	500	R\$ 4.232.709,48	R\$ 1.499.147,39	40,42%	42,57%	20,8
	46	435		R\$ 1.419.238,48	43,09%	44,97%	18,8
	52	385		R\$ 1.357.770,09	45,16%	46,85%	17,4

RB: Receita Bruta; OPEX: Custo Operacional; TIR: Taxa Interna de Retorno; ROI: Retorno do Investimento

4.2.2. Cenário 2: Silagem de Cereais

Para a determinação do cálculo de viabilidade de uma planta de biogás de 1 MW de potência instalada, que utiliza o monosubstrato de silagem de cereais, com uma produtividade de 30 t/ha, foram considerados os dados da Tabela 17.

Tabela 17: Dados de produção do Cenário 2 – Produtividade de 30 t/ha de silagem de cereais

Total de ha	737	ha
Produtividade da Silagem de Cereais	30	t/ha
Silagem de Cereais	22.110	t/a.a.
Potência Elétrica Teórica	999	kW
Potência de Queima Teórica	2.338	kW
Produção de Biogás	4.038.765	m ³ / a.a.
Produção de Biogás	461	m ³ /h
teor de Metano	53	%
Produção de Metano	244	m ³ /h
Capacidade anual	7.736	h
total de digestato produzido	7.736	t / 6 meses
total de substrato (digestato) adicionado	20.562	m ³ /ano
quantidade total digestato produzido ao final	15.419	m ³ /ano
área utilizada para a silagem (6 meses)	4.266	m ²
Custo de produção silagem	R\$2.344,54	/ha
Geração anual de energia elétrica a partir do biogás	8.749.907	kWh/p.a.
Consumo de energia da linha de fermentação.	437.495	kWh / a.a. autoconsumo
Consumo de energia do CHP e perdas do transformador	174.998	kWh / a.a. autoconsumo
Total gerado para venda Energia Elétrica	8.137.414	kWh / a.a.

Cálculo para obtenção da quantidade média de produção de biogás a partir de silagem de cereais (trigo ou aveia ou centeio).

$$\text{Silagem de Cereais} - 22.1100 \text{ t/ano} \div 365 \text{ dias} = 56,34 \text{ t/dia}^* \text{ (SC)} \quad (1)$$

*Considerando uma perda de silagem de 7% na armazenagem.

$$56,34 \text{ t/dia (SC)} \times 32\% \text{ MS} \times 93\% \text{ MoS} = 16,765 \text{ t/dia MoS} \quad (2)$$

$$660 \text{ m}^3/\text{t MoS} \times 16,341 \text{ t/dia MoS} = 11.065 \text{ m}^3/\text{dia} \quad (3)$$

Considerando um Motor de 1,131 MW de potência e eficiência (ef.) de 41,0%, temos:

$$11.065 \text{ m}^3/\text{dia} \times 53\% \text{ CH}_4 = 5.864,5 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \quad (4)$$

$$5.864,5 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \times 9,97 \text{ kW} / \text{m}^3 \text{ CH}_4 \times 41\% \text{ ef.} = 23.972 \text{ kWh} / \text{dia} \quad (5)$$

$$23.972 \div 24\text{h} = 999 \text{ kW de Potência Teórica} \quad (6)$$

Para o cálculo da viabilidade econômica os dados considerados são do programa ABC (BNDES). O capital próprio considerado é de 20% e prazo de 10 anos com 1 de carência. Os juros do financiamento são de 6% ao ano.

Conforme os dados apresentados na Tabela 17, o custo de produção da silagem, considerado, é de R\$ 2.344,54 por hectare. O preço de venda da energia é de R\$520,00 por MWh. O modelo de negócio segue o de autoconsumo, de acordo com as regras das resoluções 482 e 687 da ANEEL.

O fluxo de caixa anual, para um CAPEX ajustado de R\$ 11.907.735,31, pode ser considerado conforme os valores apresentados na Tabela 18.

O custo maior de investimento se deve ao custo maior de produção do cereal. O valor do Euro é igual a R\$ 4,2000. O custo fixo médio sem a prestação de juros e amortização, para os 10 primeiros anos, é igual R\$ 764.705,26. O OPEX (CF+CV) médio, para o mesmo período é de R\$ 2.263.339,27.

A partir do segundo ano de cultivo já é possível aproveitar o biofertilizante produzido pela planta de biogás.

Tabela 18: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 2

Dados	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
RBV	705.242,64	4.231.455,84	4.231.455,84	4.231.455,84	4.231.455,84
CV	1.727.922,90	1.727.922,90	1.469.972,90	1.469.972,90	1.469.972,90
CF*	640.956,25	2.073.866,45	2.298.908,58	1.978.037,48	2.283.685,50
DPC		845.995,00	845.995,00	845.995,00	845.995,00
CO (CF+CV)	2.368.879,15	3.801.789,35	3.768.881,48	3.448.010,38	3.753.658,40
RBA I.R.*	-1.663.636,51	429.666,49	462.574,36	783.445,46	477.797,44
RBA I.R.	-1.663.636,51	-416.328,51	-383.420,64	-62.549,54	-368.197,56
(25%) I.L.	-	-	-95.855,16	-15.637,38	-92.049,39
(9%) C.S.L.L.	-	-	-34.507,86	-5.629,46	-33.137,78
L.L.A.I.R.	-1.663.636,51	429.666,49	592.937,38	804.712,31	602.984,61

Continuação:

	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Dados	6	7	8	9	10
RBV	4.231.455,84	4.231.455,84	4.231.455,84	4.231.455,84	4.231.455,84
CV	1.469.972,90	1.469.972,90	1.469.972,90	1.469.972,90	1.469.972,90
CF*	1.878.423,31	2.035.846,16	1.788.570,75	2.965.292,33	1.597.854,78
DPC	845.995,00	845.995,00	845.995,00	845.995,00	845.995,00
CO (CF+CV)	3.348.396,21	3.505.819,06	3.258.543,64	4.435.265,23	3.067.827,67
RBA I.R.*	883.059,63	725.636,78	972.912,19	-203.809,39	1.163.628,17
RBA I.R.	37.064,63	-120.358,22	126.917,19	-1.049.804,39	317.633,17
(25%) I.L.	9.266,16	-30.089,56	31.729,30	-262.451,10	79.408,29
(9%) C.S.L.L.	3.335,82	-10.832,24	11.422,55	-94.482,39	28.586,98
L.L.A.I.R.	870.457,66	766.558,57	929.760,35	153.124,10	1.055.632,89

Abreviaturas: RBV – Receita Bruta de Vendas; CV – Custo Variável; CF* - Custo Fixo sem Depreciação; DPC – Depreciação; CO – Custo Operacional; RBA I.R.* - Receita Bruta Antes do Imposto de Renda sem Depreciação; RBA I.R. – Receita Bruta Antes do Imposto de Renda com Depreciação; I.L. – Imposto sobre o Lucro; C.S.L.L. – Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido; L.L.A.I.R. – Lucro Líquido Antes do Imposto de Renda.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) para os 10 primeiros anos ficou em 18,32% e para 20 anos em 24,74%.

Na Tabela 19 temos os números referentes a viabilidade econômica em função da produtividade dos cereais para a produção de silagem.

Tabela 19: Viabilidade Econômica em função da Produtividade da Silagem de Cereais.

Cenário	Silagem t/ha	Área ha	RB	OPEX	TIR (Anos)		ROI (Meses)
					10	20	
2	30	737	R\$ 4.231.455,84	R\$ 2.263.339,27	18,32%	24,74%	46,6
	35	632		R\$ 2.051.602,43	24,86%	29,55%	34,6
	40	553		R\$ 1.892.799,80	29,60%	33,31%	29,3

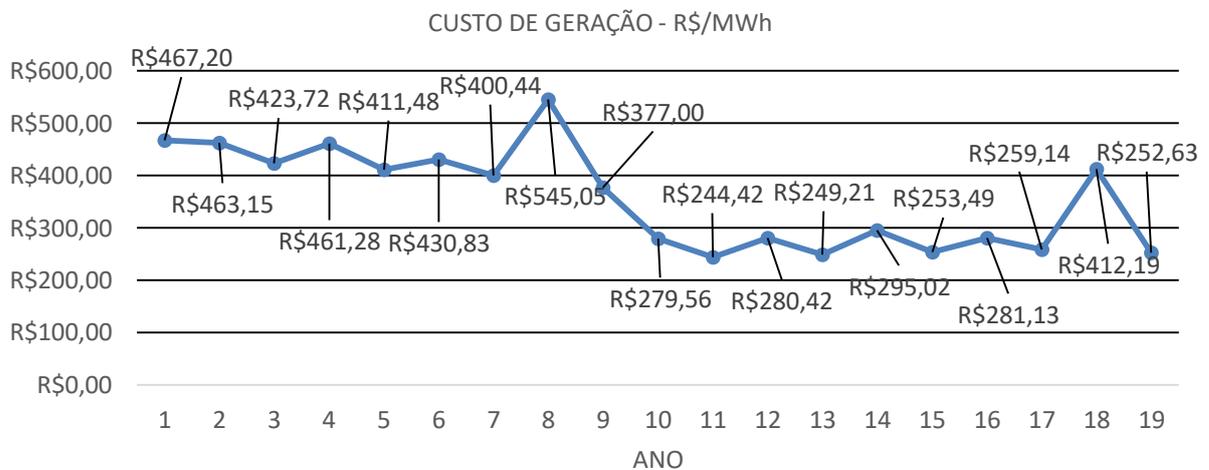
RB: Receita Bruta; OPEX: Custo Operacional; TIR: Taxa Interna de Retorno; ROI: Retorno do Investimento

Se considerarmos o primeiro ano, no qual foi construída a planta de biogás, como sendo o ano “zero”, o retorno sobre o investimento (ROI) acontece no décimo mês do quarto ano (46,6 meses). Para uma produtividade de 35 t/ha a TIR já se torna muito interessante, pois ultrapassa os 20%, ficando em 24,86%, e o ROI de 34,6 meses. Para 40 t/ha a TIR encosta nos 30%, fechando em 29,60%, e o ROI inferior a 4 anos, totalizando 29,3 meses para o retorno do capital investido.

O custo de geração da energia elétrica para uma produtividade de 30 t/ha de SC pode ser visto no Figura 14. Após a quitação do financiamento, o custo de geração de cada 1 MWh de energia elétrica, no décimo primeiro ano, é R\$ 244,42.

É fácil perceber que o custo diminui ano após ano, o que não acontece quando a energia elétrica é comprada da concessionária de eletrificação rural ou urbana.

Figura 14: Custo de Geração de 1 MWh de Energia Elétrica a partir do Biogás (30t/ha SC), Cenário 2.



4.2.3. Cenário 3: Silagem de Milho (SM) e Silagem de Cereais (SC)

Os dados utilizados são referentes a utilização de 12.000 t de SM e 8.300 t de SC, onde são necessários 300 hectares de milho com uma produtividade de 40 t/ha e 277 hectares de cereais (trigo ou aveia ou centeio), no inverno, com produtividade de 30 t/ha. Na Tabela 20 é possível visualizar os dados utilizados para o cálculo da geração de energia elétrica e da viabilidade econômica.

Tabela 20: Dados de produção do Cenário 3 – Produtividade de 40 t/ha de SM e 30 t/ha de SC.

SM total de ha	300 ha
Produtividade da Silagem de Milho	40 t/ha
Silagem de Milho	12.000 t/a.a.
SC total de ha	295 ha
Produtividade da Silagem de Cereais	30 t/ha
Silagem de Cereais	8.850 t/a.a.
Potência Elétrica Teórica	999 kW

Continuação:

Potência de Queima Teórica	2.344	kW
Produção de Biogás	4.035.170	m ³ / a.a.
Produção de Biogás	461	m ³ /h
teor de Metano	51,8	%
Produção de Metano	239	m ³ /h
Capacidade anual	7.740	h
total de digestato produzido	7.030	t/6 meses
total de substrato (digestato) adicionado	19.391	m ³ /ano
quantidade total digestato	14.060	m ³ /ano
área utilizada para a silagem	4.023	m ²
Custo de produção silagem SM	R\$ 2.000,00	/ha
Custo de produção silagem SC	R\$ 2.345,12	/ha
Geração anual de energia elétrica a partir do biogás	8.753.838	kWh/p.a.
Consumo de energia da linha de fermentação.	437.692	kWh / a.a. – consumo
Consumo de energia do CHP e perdas do transformador	175.077	kWh / a.a. - consumo
Total gerado para venda Energia Elétrica	8.141.069	kWh / a.a.

Cálculo para obtenção da quantidade média de produção de biogás a partir de silagem de milho e de cereais (trigo ou aveia ou centeio).

$$\text{Silagem de Cereais} - 8.850 \text{ t/ano} \div 365 \text{ dias} = 22,55 \text{ t/dia}^* \text{ (SC)} \quad (1)$$

$$\text{Silagem de Milho} - 12.000 \text{ t/ano} \div 365 = 30,58 \text{ t/dia}^* \text{ (SC)} \quad (2)$$

*Considerando 7% de perda da silagem no armazenamento.

$$22,55 \text{ t/dia (SC)} \times 32\% \text{ MS} \times 93\% \text{ MoS} = 6,711 \text{ t/dia MoS} \quad (3)$$

$$30,58 \text{ t/dia (SM)} \times 33\% \text{ MS} \times 95\% \text{ MoS} = 9,585 \text{ t/dia MoS} \quad (4)$$

$$660 \text{ m}^3/\text{t MoS} \times 6,294 \text{ t/dia MoS} = 4.429 \text{ m}^3/\text{dia (SC)} \quad (5)$$

$$720 \text{ m}^3/\text{t MoS} \times 9,585 \text{ t/dia MoS} = 6.901 \text{ m}^3/\text{dia (SM)} \quad (6)$$

Considerando um Motor de 1,131 MW de potência e eficiência (ef.) de 41,0% e os teores de CH₄ da SM e SC como sendo 51% e 53% respectivamente, temos:

$$4.429 \text{ m}^3/\text{dia} \times 53\% \text{ CH}_4 = 2.347,4 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \text{ (SC)} \quad (7)$$

$$6.901 \times 51\% \text{ CH}_4 = 3.519,7 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \text{ (SM)} \quad (8)$$

$$2.347,4 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \text{ (SC)} + 3.519,7 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \text{ (SM)} = 5.867 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \quad (9)$$

$$5.867 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \times 9,97 \text{ kW} / \text{m}^3 \text{ CH}_4 \times 41,0\% \text{ ef.} = 23.982 \text{ kWh} / \text{dia} \quad (10)$$

$$23.982 \div 24\text{h} = 999 \text{ kW de Potência Teórica} \quad (11)$$

Para o cálculo da viabilidade econômica, os dados considerados são do programa ABC (BNDES). O capital próprio é de 20% e prazo de 10 anos com 1 de carência. Os juros do financiamento são de 6% ao ano.

Conforme os dados apresentados na Tabela 20, o custo de produção da silagem de cereais é de R\$ 2.345,12 por hectare e o da silagem de milho R\$ 2.000,00 por hectare. O preço de venda da energia é de R\$ 520,00 por MWh. O modelo de negócio segue ao de autoconsumo de acordo com as regras das resoluções 482 e 687 da ANEEL.

O fluxo de caixa anual, para um CAPEX ajustado de R\$ 11.151.351,49, considerado para obtenção da TIR e ROI, aparece na Tabela 21.

O maior custo de investimento em relação ao cenário 1 se deve ao maior custo de produção do cereal. O valor do Euro é igual a R\$ 4,20. O custo fixo médio, sem a prestação de juros e amortização, nos dez primeiros anos, é igual R\$ 764.705,26. O OPEX (CF+CV) médio, para o mesmo período de tempo, é de R\$ 1.805.735,22.

A partir do segundo ano de cultivo já é possível aproveitar o biofertilizante produzido pela planta de biogás. A Tabela 21 apresenta a análise do fluxo de caixa.

Tabela 21: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 3.

	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Dados	1	2	3	4	5
RBV	705.559,48	4.233.356,87	4.233.356,87	4.233.356,87	4.233.356,87
CV	1.291.810,40	1.291.810,40	1.009.682,40	1.009.682,40	1.009.682,40
CF*	609.550,57	1.985.901,47	2.214.433,12	1.897.051,53	2.206.189,08
DPC		844.172,50	844.172,50	844.172,50	844.172,50
CO (CF+CV)	1.901.360,97	3.277.711,87	3.224.115,52	2.906.733,93	3.215.871,48
RBA I.R.*	-1.195.801,49	955.645,01	1.009.241,36	1.326.622,94	1.017.485,40
RBA I.R.	-1.195.801,49	111.472,51	165.068,86	482.450,44	173.312,90
(25%) I.L.	-	-	41.267,21	120.612,61	43.328,22
(9%) C.S.L.L.	-	-	14.856,20	43.420,54	15.598,16
L.L.A.I.R.	-1.195.801,49	955.645,01	953.117,94	1.162.589,79	958.559,01

Continuação:

	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Dados	6	7	8	9	10
RBV	4.233.356,87	4.233.356,87	4.233.356,87	4.233.356,87	4.233.356,87
CV	1.009.682,40	1.009.682,40	1.009.682,40	1.009.682,40	1.009.682,40
CF*	1.804.416,40	1.965.328,78	1.721.542,88	2.901.753,98	1.537.805,95
DPC	844.172,50	844.172,50	844.172,50	844.172,50	844.172,50
CO (CF+CV)	2.814.098,80	2.975.011,18	2.731.225,28	3.911.436,38	2.547.488,35
RBA I.R.*	1.419.258,07	1.258.345,69	1.502.131,59	321.920,49	1.685.868,52
RBA I.R.	575.085,57	414.173,19	657.959,09	-522.252,01	841.696,02
(25%) I.L.	143.771,39	103.543,30	164.489,77	-130.563,00	210.424,01
(9%) C.S.L.L.	51.757,70	37.275,59	59.216,32	-47.002,68	75.752,64
L.L.A.I.R.	1.223.728,98	1.117.526,81	1.278.425,50	499.486,17	1.399.691,87

Abreviaturas: RBV – Receita Bruta de Vendas; CV – Custo Variável; CF* - Custo Fixo sem Depreciação; DPC – Depreciação; CO – Custo Operacional; RBA I.R.* - Receita Bruta Antes do Imposto de Renda sem Depreciação; RBA I.R. – Receita Bruta Antes do Imposto de Renda com Depreciação; I.L. – Imposto sobre o Lucro; C.S.L.L. – Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido; L.L.A.I.R. – Lucro Líquido Antes do Imposto de Renda.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) para os 10 primeiros anos ficou em 32,17% e para 20 anos em 35,44%.

Se considerarmos o primeiro ano, onde é feita a construção da planta de biogás, como sendo o ano “zero”, o retorno sobre o investimento (ROI) se dá segundo os valores apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Viabilidade Econômica em função da Produtividade da SM e SC.

Cenário	Silagem t/ha		Área ha		RB	OPEX	TIR (Anos)		ROI (Meses)
	SM	SC	SM	SC			10	20	
3	40	30	300	295	R\$4.233.356,87	R\$1.805.735,22	32,17%	35,44%	37,5
	46	35	261	253		R\$1.662.494,88	36,47%	39,10%	35,8
	52	40	231	221		R\$1.553.958,45	39,72%	41,94%	33,4

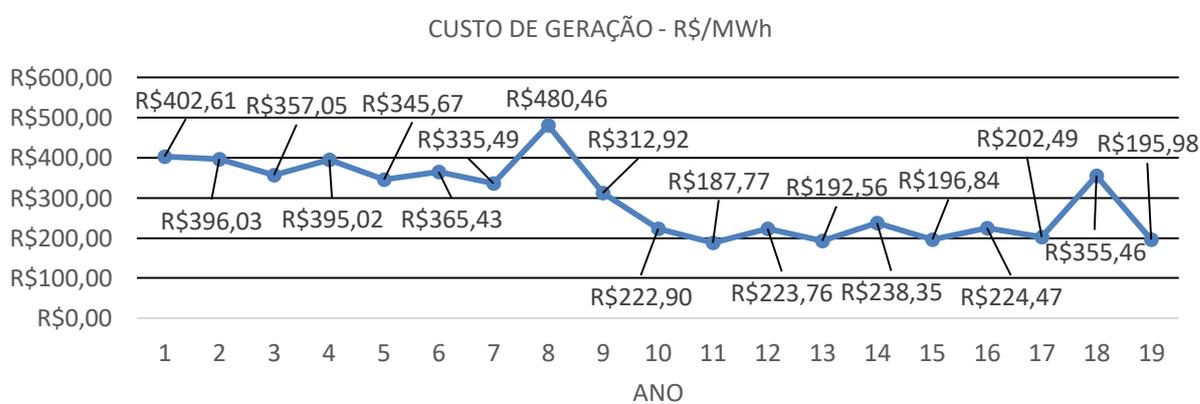
RB: Receita Bruta; OPEX: Custo Operacional; TIR: Taxa Interna de Retorno; ROI: Retorno do Investimento

Para uma produtividade de 30 t/ha de SC e 40 t/ha de SM a TIR (10 anos) é muito interessante, pois ultrapassa os 30%, ficando em 32,17%, e o ROI acontece em 37,5 meses. Para 35 t/ha de SC e 46 t/ha de SM a TIR (10 anos) é superior a 35%, fechando em 36,47%, e o ROI inferior a 3 anos, totalizando 35,8 meses para o retorno

do capital investido. Para a produtividade de 52 t/ha de SM e 40 t/ha de SC a TIR (10 anos) é de 39,72% e o ROI aos 33,4 meses.

O custo de geração da energia elétrica para as produtividades de 40 t/ha de SM e 30 t/ha de SC pode ser visto no Figura 15. Após a quitação do financiamento o custo de geração de cada 1 MWh de energia elétrica é, em média, R\$ 224,19.

Figura 15: Custo de Geração de 1 MWh de Energia Elétrica a partir do Biogás – Cenário 3 (40 t/ha de SM e 30 t/ha de SC).



4.2.4. Cenário 4: Dejeito Suíno (DS)

A referência para este cenário provém dos dados gerados pela EMBRAPA Suínos e Aves de Concórdia, Santa Catarina. Na Tabela 23 temos os dados de produção diária de dejetos dos suínos nas diferentes fases produtivas. Na primeira coluna é possível visualizar o número de animais necessários para produção de 280.000 t/ano de dejetos com 2% de matéria seca, suficientes para produção de 4.000 MWh/ano de energia elétrica para a venda.

Tabela 23: Produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos Suínos

Nº de Suínos	500kW	Kg/dia	Esterco+Urina	Litros/dia
40.000	Engorda	2,30	4,90	7,00
17.500	Porcas Gestação	3,60	11,00	16,00
10.370	Lactação + Leitões	6,40	18,00	27,00
31.111	Cachaço	3,00	6,00	9,00
200.000	Leitões Creche	0,35	0,95	1,40

Fonte: Adaptado de [35].

Na Tabela 24 estão os dados considerados para o cálculo de viabilidade econômica da planta de biogás com dejetos suínos.

Tabela 24: Dados de produção do Cenário 4 para uma planta de 500 kWh de capacidade instalada.

Para um total de Esterco a 2% de Matéria Seca	280.000	t/a.a.
Para um total de Esterco a 10% de Matéria Seca	55.000	t/a.a.
Potência Elétrica Teórica	481	kW (Motor 600 kW)
Potência de Queima Teórica	980	kW
Produção de Biogás	1.848.000	m ³ / a.a.
Produção de Biogás	211	m ³ /h
teor de Metano	60,0%	
Produção de Metano	127	m ³ /h
total de digestato produzido	26.405	t/6 meses
total de substrato (digestato) adicionado	55.000	m ³ /ano
quantidade total digestato	52.810	m ³ /ano
Geração anual de energia elétrica a partir do biogás	4.211.854	kWh/p.a.
Consumo de energia da linha de fermentação.	126.356	kWh / a.a. – consumo
Consumo de energia do CHP e perdas do transformador	84.237	kWh / a.a. – consumo
Total gerado para venda Energia Elétrica	4.001.261	kWh/p.a.

A concentração do esterco suíno para 10% de matéria seca é feito em um pré-tanque decantador, de onde o dejetos sai para o biodigestor. O bombeamento é feito a partir do fundo deste pré-tanque. O biodigestor possui as dimensões: de 28 m de diâmetro por 8 m de altura.

O cálculo para obtenção da quantidade média de produção de biogás a partir de dejetos suínos com 10% de matéria seca é o seguinte:

$$\text{Dejetos suínos com 10\% MS} - 55.000 \text{ t/ano} \div 365 \text{ dias} = 150,68 \text{ t/dia DS} \quad (1)$$

$$150,68 \text{ t/dia (DS)} \times 10\% \text{ MS} \times 80\% \text{ MoS} = 12,055 \text{ t/dia MoS} \quad (2)$$

$$420 \text{ m}^3/\text{t MoS} \times 12,055 \text{ t/dia MoS} = 5.063 \text{ m}^3/\text{dia Biogás} \quad (3)$$

Considerando um Motor de 527 kW de potência e eficiência (ef.) de 38% e o teor de CH₄ sendo de 60%, temos:

$$5.063 \text{ m}^3/\text{dia} \times 60\% \text{ CH}_4 = 3.037,8 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \quad (4)$$

$$3.037,8 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \times 9,98 \text{ kW} / \text{m}^3 \text{ CH}_4 \times 38\% \text{ ef.} = 11.520,55 \text{ kWh} / \text{dia} \quad (5)$$

$$11.520,55 \div 24h = 480 \text{ kW de Potência Teórica} \quad (6)$$

Para o cálculo do valor de venda do adubo orgânico produzido pela planta de biogás, com esterco suíno, é preciso fazer análise de NPK do digestato líquido ou do digestato seco. De posse destes dados é possível comparar os preços referentes ao nitrogênio (N) com o valor da tonelada da Uréia (45% de N), o fósforo (P) com o superfosfato triplo (44% de P_2O_5) e o potássio (K) com o cloreto de potássio (60% de K_2O).

Tabela 25: Teores de nitrogênio, fósforo e potássio em função do teor de matéria seca (MS) em dejetos suínos.

MS (%)	N	P_2O_5	K_2O
0,50	1,13	0,67	0,80
1,17	1,60	1,14	1,00
2,09	2,21	1,75	1,25
3,00	2,83	2,37	1,50
3,91	3,44	2,99	1,75
5,05	4,21	3,75	2,06

Fonte: [36]

Para o cálculo da receita com a venda de adubo orgânico foram considerados os valores, apresentados na Tabela 26, em percentuais para determinação da quantidade de NPK existente no biofertilizante (digestato).

Tabela 26: Valores de N, P_2O_5 e K_2O no biofertilizante (digestato 10% de MS).

	m^3	N	P_2O_5	K_2O
Quantidade Kg/m^3	52.810	8,33	5,73	6,25
Disponibilidade		60%	90%	90%
Adubo efetivo em Kg/m^3 de digestato		5,00	5,16	5,62

Fonte: Dados médios coletados de plantas de biogás na Alemanha, 2010 a 2014.

Para o cálculo da viabilidade econômica os dados considerados são do programa ABC (BNDES). O capital próprio é de 20% e prazo de 10 anos com 1 de carência. Os juros do financiamento são de 6% ao ano.

O fluxo de caixa anual, para um CAPEX ajustado de R\$ 8.125.567,58, pode ser visto na Tabela 27. A TIR e o ROI foram calculados com base nestes dados.

Tabela 27: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 4.

	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Dados	1	2	3	4	5
RBV	346.776,05	4.630.896,28	4.630.896,28	4.630.896,28	4.630.896,28
CV	-	-	-	-	-
CF*	500.243,63	1.774.885,74	1.733.958,88	1.695.489,71	1.657.117,88
DPC		653.500,00	653.500,00	653.500,00	653.500,00
CO (CF+CV)	500.243,63	1.774.885,74	1.733.958,88	1.695.489,71	1.657.117,88
RBA I.R.*	-153.467,58	2.856.010,54	2.896.937,40	2.935.406,57	2.973.778,39
RBA I.R.	-153.467,58	2.202.510,54	2.243.437,40	2.281.906,57	2.320.278,39
(25%) I.L.	-	550.627,63	560.859,35	570.476,64	580.069,60
(9%) C.S.L.L.	-	198.225,95	201.909,37	205.371,59	208.825,06
L.L.A.I.R.	-153.467,58	2.107.156,95	2.134.168,68	2.159.558,33	2.184.883,74

Continuação:

	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Dados	6	7	8	9	10
RBV	4.630.896,28	4.630.896,28	4.630.896,28	4.630.896,28	4.630.896,28
CV	-	-	-	-	-
CF*	1.618.845,35	1.580.674,09	1.545.240,33	1.510.043,65	1.475.091,17
DPC	653.500,00	653.500,00	653.500,00	653.500,00	653.500,00
CO (CF+CV)	1.618.845,35	1.580.674,09	1.545.240,33	1.510.043,65	1.475.091,17
RBA I.R.*	3.012.050,93	3.050.222,19	3.085.655,95	3.120.852,62	3.155.805,11
RBA I.R.	2.358.550,93	2.396.722,19	2.432.155,95	2.467.352,62	2.502.305,11
(25%) I.L.	589.637,73	599.180,55	608.038,99	616.838,16	625.576,28
(9%) C.S.L.L.	212.269,58	215.705,00	218.894,04	222.061,74	225.207,46
L.L.A.I.R.	2.210.143,61	2.235.336,65	2.258.722,92	2.281.952,73	2.305.021,37

Abreviaturas: RBV – Receita Bruta de Vendas; CV – Custo Variável; CF* - Custo Fixo sem Depreciação; DPC – Depreciação; CO – Custo Operacional; RBA I.R.* - Receita Bruta Antes do Imposto de Renda sem Depreciação; RBA I.R. – Receita Bruta Antes do Imposto de Renda com Depreciação; I.L. – Imposto sobre o Lucro; C.S.L.L. – Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido; L.L.A.I.R. – Lucro Líquido Antes do Imposto de Renda.

A TIR de 10 anos é de 74,84% e para 20 anos de 75,26%. O retorno sobre o investimento de R\$1.625.113,52 (20% do CAPEX ajustado) acontece no nono mês do ano 1.

Na Figura 16 é possível ver a evolução do custo de geração da energia elétrica produzida pela planta de biogás, que utiliza o dejetos suíno como substrato.

Figura 16: Evolução do custo de geração de 1MWh utilizando dejetos suíno



O destaque fica para os valores de geração da energia elétrica após o pagamento do financiamento. A média fica abaixo de R\$200,00 / MWh.

4.2.5. Cenário 5: Dejetos Bovino (DB)

Existe uma forte tendência no Brasil com relação ao aumento do número de produtores de bovinos de corte em confinamento. A melhor forma de aumentar o lucro sobre o ganho de peso dos animais é aproveitar o esterco produzido durante a engorda dos animais para a geração de energia elétrica. Na Tabela 28 estão os dados considerados para o cálculo de viabilidade econômica da planta de biogás com dejetos de bovinos de corte em confinamento. Esta planta está dimensionada para 1.300 bovinos de corte, que estercam em média 30 Kg/dia durante 90 dias de confinamento, em terminação.

Tabela 28: Dados de produção do Cenário 5 para uma planta de 250 kWh de capacidade instalada.

Total de Dejetos Bovinos (MS 25%)	14.235 t/a.a.
Potência Elétrica Teórica	228 kW (motor 250 kW)
Potência de Queima Teórica	550 kW
Produção de Biogás	1.138.800 kWh
Produção de Biogás	130 m ³ / a.a.
teor de Metano	55,0 %
Produção de Metano	72 m ³ /h

Continuação	
Capacidade anual	7.993 m ³ /h
total de digestato produzido	13.407 t/6 meses
total final de digestato produzido	28.235 m ³ /ano
quantidade total digestato	26.813 m ³ /ano
Geração anual de energia elétrica a partir do biogás	1.998.275 kWh/p.a.
Consumo de energia da linha de fermentação.	59.948 kWh / a.a. – consumo
Consumo de energia do CHP e perdas do transformador	39.966 kWh / a.a. – consumo
Total gerado para venda Energia Elétrica	1.898.361 kWh/p.a.

A concentração do esterco bovino é em torno de 25% de matéria seca. O bombeamento é feito diretamente para um pré-tanque, que dosa a entrada do dejetos para o biodigestor com um teor de matéria seca de 10%. O Biodigestor possui dimensões de 23 m de diâmetro por 8 m de altura.

O cálculo para obtenção da quantidade média de produção de biogás a partir de dejetos bovinos com 25% de matéria seca é o seguinte:

$$\text{Dejetos bovino com 25\% MS} - 14.235 \text{ t/ano} \div 365 \text{ dias} = 39 \text{ t/dia DS} \quad (1)$$

$$39 \text{ t/dia (DB)} \times 25\% \text{ MS} \times 80\% \text{ MoS} = 7,80 \text{ t/dia MoS} \quad (2)$$

$$400 \text{ m}^3/\text{t MoS} \times 7,80 \text{ t/dia MoS} = 3.120 \text{ m}^3/\text{dia Biogás} \quad (3)$$

Considerando um Motor de 250 kW de potência e eficiência (ef.) de 32% e o teor de CH₄ sendo de 55%, temos:

$$3.120 \text{ m}^3/\text{dia} \times 55\% \text{ CH}_4 = 1.716,00 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \quad (4)$$

$$1.716 \text{ m}^3/\text{dia CH}_4 \times 9,98 \text{ kW} / \text{m}^3 \text{ CH}_4 \times 32\% \text{ ef.} = 5.480,21 \text{ kWh} / \text{dia} \quad (5)$$

$$5.480,21 \div 24\text{h} = 228,34 \text{ kW de Potência Teórica} \quad (6)$$

Para o cálculo do valor de venda do adubo orgânico produzido pela planta de biogás, com esterco bovino, é preciso fazer análise de NPK do digestato líquido ou do digestato seco. De posse destes dados é possível comparar os preços referentes ao nitrogênio (N) com o valor da tonelada da Uréia (45% de N), o fósforo (P) com o superfosfato triplo (44% de P₂O₅) e o potássio (K) com o cloreto de potássio (60% de K₂O).

Para o cálculo da receita com a venda de adubo orgânico foram considerados os valores, apresentados na Tabela 29, em percentuais para determinação da quantidade de NPK existente no biofertilizante (digestato).

Tabela 29: Valores de N, P₂O₅ e K₂O no biofertilizante (digestato 10% de MS).

	m ³	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Quantidade Kg/m³	34.163	2,13	1,67	2,92
Disponibilidade		60%	90%	90%
Adubo efetivo em Kg/m³ de digestato		1,28	1,50	2,63

Fonte: Dados médios coletados de plantas de biogás na Alemanha, MT-Energie.

Para o cálculo da viabilidade econômica, os dados considerados são do programa ABC (BNDES). O capital próprio é de 20% e prazo de 10 anos com 1 de carência. Os juros do financiamento são de 6% ao ano.

O fluxo de caixa anual, para um CAPEX ajustado de R\$ 4.444.112,50, aparece na Tabela 30. A TIR e o ROI foram calculados com base nestes dados.

Tabela 30: Análise do Fluxo de Caixa – Cenário 4.

Dados	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
RBV	164.524,67	1.539.141,43	1.539.141,43	1.539.141,43	1.539.141,43
CV					
CF*	248.399,11	811.592,76	788.724,99	797.965,38	744.724,84
DPC		329.162,50	329.162,50	329.162,50	329.162,50
CO (CF+CV)	248.399,11	811.592,76	788.724,99	797.965,38	744.724,84
RBA I.R.*	-83.874,44	727.548,67	750.416,44	741.176,05	794.416,59
RBA I.R.	-83.874,44	398.386,17	421.253,94	412.013,55	465.254,09
(25%) I.L.	-	99.596,54	105.313,49	103.003,39	116.313,52
(9%) C.S.L.L.	-	35.854,76	37.912,86	37.081,22	41.872,87
L.L.A.I.R.	-83.874,44	592.097,37	607.190,10	601.091,44	636.230,20

Continuação:

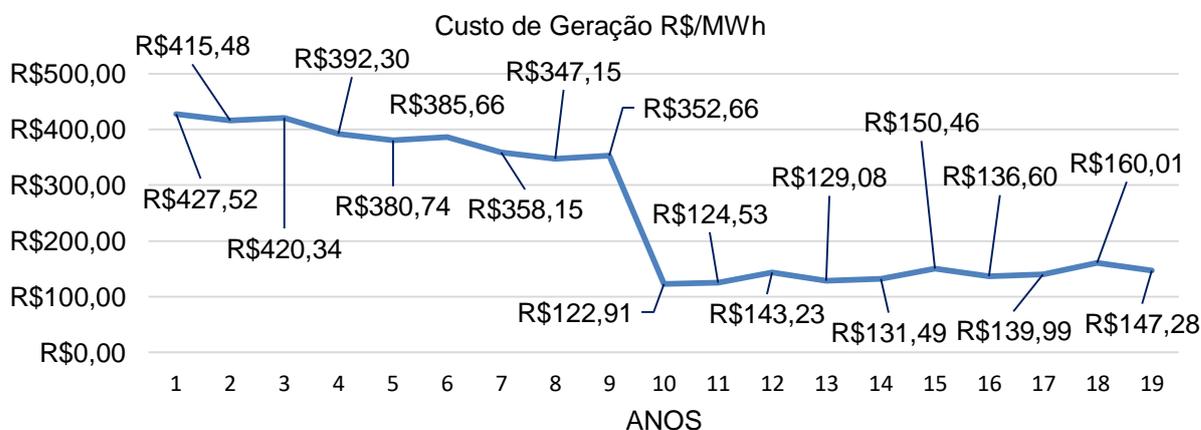
	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Dados	6	7	8	9	10
RBV	1.539.141,43	1.539.141,43	1.539.141,43	1.539.141,43	1.539.141,43
CV	-	-	-	-	-
CF*	722.775,98	732.119,52	679.896,12	659.012,13	669.469,99
DPC	329.162,50	329.162,50	329.162,50	329.162,50	329.162,50
CO (CF+CV)	722.775,98	732.119,52	679.896,12	659.012,13	669.469,99
RBA I.R.*	816.365,45	807.021,91	859.245,31	880.129,30	869.671,44
RBA I.R.	487.202,95	477.859,41	530.082,81	550.966,80	540.508,94
(25%) I.L.	121.800,74	119.464,85	132.520,70	137.741,70	135.127,24
(9%) C.S.L.L.	43.848,27	43.007,35	47.707,45	49.587,01	48.645,80
L.L.A.I.R.	650.716,44	644.549,71	679.017,15	692.800,59	685.898,40

Abreviaturas: RBV – Receita Bruta de Vendas; CV – Custo Variável; CF* - Custo Fixo sem Depreciação; DPC – Depreciação; CO – Custo Operacional; RBA I.R.* - Receita Bruta Antes do Imposto de Renda sem Depreciação; RBA I.R. – Receita Bruta Antes do Imposto de Renda com Depreciação; I.L. – Imposto sobre o Lucro; C.S.L.L. – Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido; L.L.A.I.R. – Lucro Líquido Antes do Imposto de Renda.

A TIR de 10 anos é de 61,91% e para 20 anos de 63,06%. O retorno sobre o investimento de R\$ 972.696,94 (21,89% do CAPEX ajustado) acontece no sétimo mês do ano 2.

Calculando o custo de geração da energia elétrica, ano a ano, para a quantidade de 39 t/dia de DB, podemos elaborar a Figura 17. Após a quitação do financiamento, o custo de geração de cada 1 MWh de energia elétrica é, em média, igual a R\$138,56.

Figura 17: Custo de Geração de 0,250 MWh de Energia Elétrica a partir do Biogás – Cenário 5.



5. DISCUSSÃO

Uma análise comparativa sobre os cenários apresentados anteriormente, com a finalidade de saber qual seria o melhor, só é possível sobre a perspectiva do investidor. Todos os cenários estudados são possíveis de serem replicados, mas dizer que um produtor de animais possa investir na geração de energia a partir de plantas energéticas não seria possível sem antes saber se este possui terra suficiente para produção da silagem. O mesmo se pode dizer de um agricultor, que possui terras disponíveis, para produção de plantas energéticas, mas não possui mercado para produção animal. Portanto, o melhor cenário é aquele que é possível de ser feito levando-se em consideração as características da propriedade e do potencial investidor:

- O investidor é agricultor, produtor de animais ou investidor privado (arrendatário)?
- O agricultor tem terras suficientes para produção de plantas energéticas para produção de biogás?
- O produtor de animais tem quantidade suficiente de esterco animal para produção de biogás?
- O produtor de animais ou o agricultor possuem características empreendedoras, que o possibilite de participar de um investimento em uma planta de biogás de forma cooperativa ou em formato de condomínio rural?

Existem várias premissas, que devem ser satisfeitas antes de saber qual o melhor cenário para investir em uma planta de biogás. Por isso, não é possível afirmar com convicção, que haja um cenário único ou um cenário que seja o melhor de todos para o investimento em uma planta de biogás. A partir do conhecimento dos resultados

apresentados em cada cenário o investidor pode avaliar se é melhor investir em uma planta de biogás ou em outra fonte de energia renovável.

Por isso, para que os resultados deste trabalho sejam melhor entendidos, é preciso compara-los com outras fontes de energia, sejam elas biocombustíveis ou fontes de energia elétrica renováveis e até mesmo sobre o que acontece com relação as emissões de gases de efeito estufa. As fontes mais conhecidas e presentes no mercado brasileiro são:

- Biocombustíveis:
 - Biodiesel, e
 - Etanol: de cana, milho e de cereais

- Fontes renováveis de energia elétrica:
 - Geradores eólicos,
 - Placas solares,
 - Hidrelétricas (CGH) e
 - Pequenas centrais hidráulicas (PCH).

Pelo fato de os cenários serem todos sobre geração de energia elétrica, a comparação entre plantas de biometano com a produção de etanol e biodiesel será discutida de forma mais superficial.

5.1. Biodiesel versus Biometano

O Rio Grande do Sul possui nove usinas de biodiesel, que utilizam a soja e gordura animal para a produção do biocombustível. O preço pago ao produtor rural de soja é o preço de mercado. Portanto, não contribui em aumento de renda para o agricultor. A possibilidade de o agricultor investir em uma estrutura para produção de biodiesel é muito remota. Por isso, o biometano, neste caso, é a melhor alternativa. Como o biometano é produzido por plantas que entram em rotação de cultura com a soja, o investimento em planta de biogás é extremamente favorável. As plantas

energéticas não competem com a soja. Neste caso há um aumento da geração de renda com a produção de biometano. No cenário 1 se fizermos o cálculo para saber quanto de biometano seria produzido por hectare chegaremos a quantidade de 4.282 m³. O biometano pode ser vendido pelo valor de R\$ 2,40 a R\$ 3,00/m³. O seu concorrente é o diesel e o gás natural. Pode também substituir o GLP.

5.2. Biometano versus etanol

5.2.1. Biometano de Milho x Etanol de Cana-de-Açúcar

A produtividade média da cana no Brasil, na safra 2018/2019, foi de 72.234 Kg/ha [36]. A média Norte/Nordeste ficou em 54,02 t/ha e na região Centro/Sul foi de 74,32 t/ha. A produtividade das usinas de etanol foi de 52,66 l/t de cana [37]. Na Tabela 31, em função das produtividades mínimas e máximas da cana de açúcar (54,02 t/ha a 74,32 t/ha) e da silagem de milho (40 t/ha a 52 t/ha), é possível perceber que o milho, em 105 dias, produz por hectare, em média, 2,66 vezes mais energia do que a cana, em 365 dias

Tabela 31: Produtividade do etanol a partir de cana e de biometano a partir de milho.

Biocombustível	Produtividade	Km rodados / ha	
Etanol	2.844 a 3.913 L / ha	7 Km / L	19.980 a 27.391 Km
Biometano	4.282 a 5.561 m ³ / ha	13 Km / m ³	55.666 a 72.293 Km

Uma observação importante deve ser feita aqui: “No caso do milho é possível produzir alimento no restante de 260 dias do ano”. Na cana isto não ocorre, quando se produz etanol. Outro aspecto é que se o produtor rural optar pela produção de biometano, ele mesmo poderá ser o dono da planta de biometano. No caso da cana o produtor rural depende da usina de etanol, que normalmente arrenda a sua propriedade para a produção da cana-de-açúcar.

Mas o produtor ainda pode optar por produzir energia elétrica a partir da silagem de milho. Com isso ele terá um lucro por hectare muito maior do que produzindo cana para a usina de etanol.

5.2.2. Biometano de Cereais x Etanol de Cereais

Na comparação entre biometano e etanol, utilizando cereais para a sua produção, o biometano é muito mais rentável para o agricultor.

O pesquisador da Embrapa Trigo, Alfredo do Nascimento Junior, destaca a cultivar de triticales BRS Saturno entre os cereais de inverno aprovados para a produção de etanol. Esta cultivar pode apresentar até 60% de amido em seus grãos e, com isso, produzir 350 litros de etanol por tonelada de grãos. O triticales suporta solos de baixa fertilidade com alto potencial de rendimento de grãos e que pode ultrapassar 6 toneladas por hectare [37].

O pesquisador comenta, que o conteúdo médio de amido conversível e açúcar em alguns grãos típicos é: cevada 50%; milho 66%; aveia 50%; centeio 59%; sorgo 67% e trigo 65%. A produtividade de álcool depende de quão completa é a conversão do amido, mas normalmente é de 260 a 380 litros por tonelada.

Utilizando o triticales desenvolvido pela Embrapa Trigo, cuja produção pode chegar a 4 toneladas de grãos/ha, é possível produzir cerca de 1,4 mil litros de etanol/ha. Uma lavoura de sorgo sacarino, segundo estudos da Embrapa Milho e Sorgo, apresenta rendimento de 50 toneladas de matéria verde capaz de produzir entre 2 mil a 2,5 mil litros de etanol/ha [37].

Na comparação de Biometano x Etanol a partir de cereais temos o seguinte:

Tabela 32: Produtividade do etanol e de biometano a partir de cereais.

Biocombustível	Produtividade	Km rodados / ha	
Etanol	1.400 L / ha	7 Km / L	9.800 Km
Biometano	2.900 m ³ / ha	13 Km / m ³	37.700 Km

Com o mesmo cereal é possível produzir 3,85 vezes mais energia por hectare se a opção for pela produção de biometano.

A planta de biometano pode ser feita pelo próprio produtor. Na planta de etanol o investidor normalmente paga, ao produtor, o preço de mercado pelo grão. Neste

caso não há aumento de renda para o agricultor em relação ao mercado de commodities. E se a opção for produzir energia elétrica, a rentabilidade é muito maior do que a proporcionada pela produção de etanol. O agricultor está sem alternativa para aumento de renda durante o inverno. A produção de energia com cereias é a melhor alternativa.

5.2.3. Biometano de Milho x Etanol de Milho

No milho a diferença é ainda maior pró biometano. Considerando a produtividade do milho, no Brasil, a produção de etanol e biometano varia conforme os dados apresentados na Tabela 33. A quantidade de energia produzida pelo biometano a partir da silagem de milho é 4,13 vezes maior do que a gerada pelo etanol a partir da mesma planta.

Tabela 33: Produtividade do etanol e de biometano a partir de milho.

Biocombustível	Produtividade	Km rodados / ha	
Etanol	2.000 a 2.500 L / ha	7 Km / L	14.000 a 17.500 Km
Biometano	4.282 a 5.561 m ³ / ha	13 Km / m ³	55.666 a 72.293 Km

Outra diferença importantíssima é o fato de as gramíneas (silagem de milho e cereais), para a produção do biometano, serem colhidas 30 dias antes da colheita dos grãos utilizados para produção de etanol. Colher 30 dias antes gera mais economia e segurança para o produtor, que normalmente, nos cereais (trigo, triticale, cevada) tem um período muito curto para a colheita.

A geração de energia elétrica também é muito mais vantajosa do que produzir etanol a partir de cereais e de milho.

5.3. Energia Elétrica: Fontes Renováveis x Biogás

A Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, que alterou a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, regulamenta a geração distribuída (GD) no Brasil [38]. Há muita discussão sobre a permanência ou não dos benefícios concedidos para as fontes renováveis de energia, que produzem energia

elétrica para o autoconsumo. O fato é, que existem diferenças entre as fontes de energia alternativa, dentre elas o biogás e a solar fotovoltaica, que impactam fortemente sobre a rede de distribuição, seja ela de forma positiva ou negativa.

Algumas premissas sobre a geração distribuída, divulgadas pela ANEEL, não são verdadeiras. Uma delas é a de que a rede do Sistema Integrado Nacional (SIN) funcionaria como uma bateria, onde a energia gerada pelas placas fotovoltaicas pode ser armazenada, quando injetada na rede. Isto não acontece. Se esta energia não for consumida no momento em que esteja circulando na rede de distribuição, ela será perdida. Por sua vez, o biogás tem características iguais ao de uma fonte de geração térmica. Sua energia é produzida de forma constante e previsível. Por isso, podemos dividir as fontes de energia elétrica em dois grupos, fontes de energia previsíveis e fontes de energia imprevisíveis.

Fontes de energia de base (previsíveis):

- Biogás: Fonte de energia gerada a partir de qualquer tipo de matéria orgânica não lenhosa.
- Queima de Biomassa: Fonte de energia gerada a partir da queima de biomassa de origem lenhosa ou de resíduos de processos agroindustriais.

Fontes de energia intermitente (imprevisíveis):

- Eólica: fonte de energia gerada pelo vento.
- Solar Fotovoltaica: fonte de energia gerada pelo sol.
- Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH): fonte de energia gerada pela água.

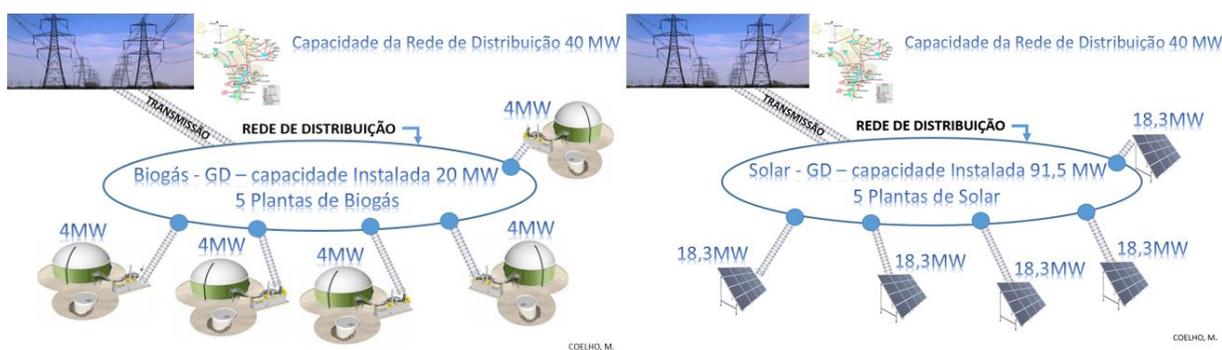
Na Tabela 34 é possível observar o quanto de capacidade instalada de eólico e solar participam da geração distribuída (GD). Basta observar, que na matriz de geração de energia elétrica do Brasil [39], em julho de 2018, havia uma capacidade instalada equivalente a 160.645 MW, Tabela 34, e que deste total somente 408 MW participam da GD. O que chama atenção é o fato de a geração eólica com 13,15 GW de capacidade instalada não participar da GD e, que a energia solar, em sua grande parte (1,3 GW), também não faz parte da geração distribuída.

Tabela 34: Capacidade instalada de geração de energia elétrica eólica e solar do Brasil

Fonte	Julho 2017	Julho 2018			Evolução da Capacidade Instalada Jun 2018 / Jun 2017
	Capacidade Instalada (MW)	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW)	% Capacidade Instalada	
Eólica (não GD)	10.903	536	13.135	8,2%	20,5%
Eólica GD	10	57	10	0,0%	1,3%
Eólico	10.913	593	13.145	8,2%	20,5%
Solar (não GD)	145	2.251	1.307	0,8%	801,7%
Solar GD	100	33.426	321	0,2%	222,1%
Solar	245	35.677	1.628	1,0%	565,6%
Total sem GD	11.048	2.787	14.442	8,9%	30,7%
Total em GD	110	33.483	331	0,2%	200,9%
Matriz Elétrica Brasileira					
Total sem GD	153.678	7.202	160.237	99,7%	4,3%
Total em GD	143	33.630	408	0,3%	185,1%
Total - Brasil	153.822	40.832	160.645	100%	4,4%

Fonte: [39]. GD: Geração Distribuída.

Isto se deve ao fato de serem energias de fontes intermitentes. Se fossem conectadas diretamente, em grande volume de geração, nas redes de distribuição, o impacto seria extremamente negativo. Para que este efeito das intermitentes sobre a GD se torne mais evidente e possível de entender, na Figura 18 é feita a comparação de plantas de biogás com usinas de placas solares fotovoltaicas em GD, no meio rural.

Figura 18: Biogás x Solar Fotovoltaica em Geração Distribuída, com capacidade de rede de 40 MWh.

Fonte: Autor.

Neste exemplo hipotético, onde a rede de distribuição possui a capacidade máxima de distribuição de 40 MWh, consideramos haver cinco agroindústrias interessadas em gerar sua própria energia para o autoconsumo. Cada uma delas possui um consumo médio de 3,66 MWh/h. Se todas as agroindústrias optarem pelo sistema de geração solar fotovoltaico, a capacidade instalada de cada usina terá que

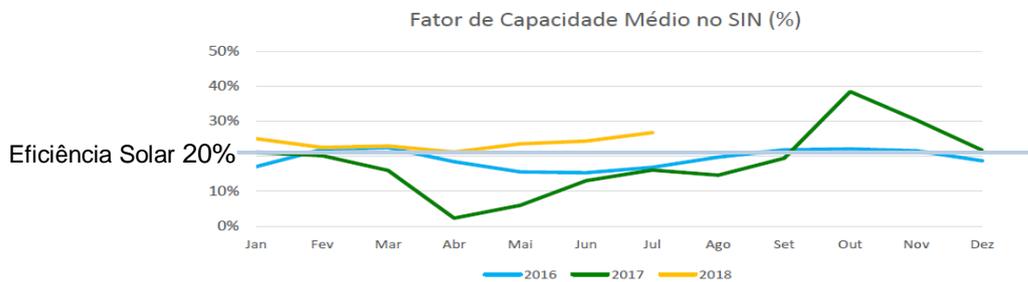
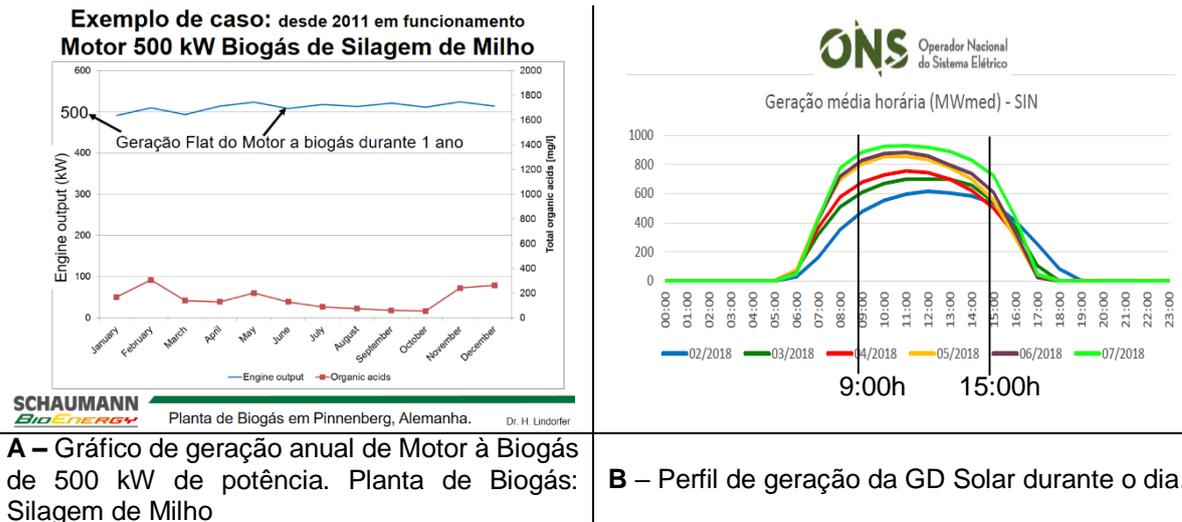
ser de 18,3 MWh, pois sua eficiência na geração de energia elétrica é de apenas 20%. Se a opção for por pantas de biogás, cada agroindústria poderá investir em usinas com capacidade instalada de apenas 4 MW.

Para compreender melhor por que a energia solar não é apropriada para a zona rural, e o exemplo do sistema apresentado na Figura 18 ilustra bem isto, é preciso conhecer as características de geração de energia elétrica que ela possui. Como diz o Prof. Dr.-Ing Harald Schwartz da Universidade de Cottbus, Alemanha: “Em um Sistema Elétrico de Potência não circula eletricidade, circulam contratos de compra e venda de energia elétrica”. Isto é importantíssimo salientar, pois o sistema de distribuição não funciona como uma bateria. É impossível armazenar energia na rede de distribuição. Por isso, o que for gerado obrigatoriamente deverá ser consumido, caso contrário a energia é perdida e o prejuízo passa a ser de todos os consumidores de energia elétrica.

Para entender por que são necessárias cinco usinas de 18,3 MW de potência para o fornecimento de 3,66 MWh médios de energia elétrica, para cada uma das agroindústrias, é preciso saber que a eficiência da geração de energia elétrica de placas solares medidas no sistema interligado nacional (SIN) é de apenas 20%. Por isso, para poder gerar 3,66 MWh médios durante o ano, é necessária uma capacidade instalada de cinco vezes a necessidade de consumo por hora. O agravante para a falta de adequação de geração de energia elétrica em zona rural é o fato de a energia solar ser gerada, quase que 100%, entre 9 h da manhã e 15 h da tarde. Por isso, em nosso exemplo na Figura 18, há uma geração de energia elétrica cinco vezes superior ao necessário, das 9 h às 15 h. Neste período as cinco usinas solares fornecem 91,5 MWh/h para a rede de distribuição. São 51,5 MWh perdidos a cada hora que passa, das 9 h as 15 h, pois a rede de distribuição, neste caso, suporta somente 40 MWh circulando em seu sistema elétrico de potência. Devido a este fato, usinas solares podem ser conectadas à rede de distribuição até no máximo 20% da capacidade que esta rede tem de fazer circular energia por seu fio. Todo o excedente é perdido, o que causa prejuízo para todos os consumidores. Na Figura 19 é possível ver que a energia

produzida pelo biogás é previsível e constante e que a solar concentra a maior produção no período das 9h às 15h. Por isso, sua eficiência é baixa, em torno de 20%.

Figura 19: Comparação entre GD de Biogás e Solar Fotovoltaico com o histórico da eficiência da GD Solar e o seu perfil de geração de energia elétrica durante o dia. **A** – Gráfico de geração anual de Motor à Biogás de 500 kW de potência. Planta de Biogás: Silagem de Milho. **B** – Perfil de geração da GD Solar durante o dia. **C** – Fator de capacidade médio do SIN (%). Eficiência média de geração das Usinas Solares.



C – Fator de capacidade médio do SIN (%). Eficiência média de geração das Usinas Solares.

Fonte: ONS - Histórico da eficiência média de geração em periodicidade mensal nos anos de 2016, 2017 e 2018. O fator de capacidade é calculado como a relação entre geração média mensal e a potência instalada a cada mês.

Por isso, a melhor opção para geração em autoconsumo no meio rural são usinas de biogás. Sua geração é contínua e confiável, durante 24 h do dia e os 365 dias do ano. Além disso não necessita de Smart Grid para o seu gerenciamento o que torna a GD muito mais econômica do ponto de vista de manutenção e controle da rede.

5.4. Emissões de CO₂: Fontes Renováveis x Biogás

Muito se fala em mudança climática, gases de efeito estufa e os malefícios, que o uso desenfreado dos combustíveis fósseis podem causar ao meio ambiente e à população mundial, mas pouco se faz para combater as causas destas emissões. O Brasil investe cada vez mais no pré-sal, a China e os EUA não reduzem suas emissões e a Europa desde de 2009 não consegue mais descarbonizar sua matriz energética.

Para exemplificar melhor a importância do biogás, para a descarbonização do planeta, é preciso entender o que aconteceu na Alemanha no período de 1990 a 2019. A Tabela 35 mostra os números relacionados à capacidade instalada da matriz elétrica da Alemanha em 2018, bem como também o total gerado em 12 meses.

Tabela 35: Capacidade Instalada para geração de energia elétrica na Alemanha, 2018.

Fonte	Eficiência*	Capacidade Instalada		Gerado		
				Total	Média / h	
Hidrelétricas	40,19%	4,80 GW	2,26%	16,9 TWh	2,60%	1,93 GWh
RSU Orgânico				6,3 TWh	1,21%	0,72 GWh
Outras fontes (fóssil)	42,73%	5,45 GW	2,56%	20,4 TWh	3,20%	2,33 GWh
Biomassa**	67,40%	7,74 GW	3,64%	45,7 TWh	7,10%	5,22 GWh
Nuclear	91,25%	9,52 GW	4,48%	76,1 TWh	11,80%	8,69 GWh
Linhito	78,62%	21,20 GW	9,97%	146 TWh	22,70%	16,67 GWh
Carvão	39,96%	23,71 GW	11,15%	83 TWh	12,90%	9,47 GWh
Óleo Mineral	13,80%	4,30 GW	2,02%	5,2 TWh	0,80%	0,59 GWh
Gás	32,24%	29,39 GW	13,82%	83 TWh	12,90%	9,47 GWh
Eólico Onshore	21,66%	53,15 GW	24,99%	100,86 TWh	15,66%	11,51 GWh
Eólico Offshore	21,65%	6,56 GW	3,08%	12,44 TWh	1,93%	1,42 GWh
Solar	11,27%	46,90 GW	22,05%	46,3 TWh	7,20%	5,29 GWh
Total		207,27 GW	100,00%		100,00%	73,31 GWh
Eólico + Solar		106,61 GW	50,12%			
Energia Renovável		119,15 GW	56,01%	228,5 TWh	35,60%	
Energia Fóssil		84,05 GW	39,51%	337,6 TWh	52,60%	
Total				642,4 TWh	100,00%	

* Eficiência: É relativo a capacidade instalada e não a eficiência na geração de energia elétrica. Ex.: Na Alemanha o linhito tem uma eficiência elétrica de 39,3%, o carvão 45,9%, o gás natural 49,2%, óleo mineral 43%.**Do total de energia gerada pela biomassa, 29.450 GWh foram gerados pelo biogás, o que representa uma geração média de 3,36 GWh/méd [36].

Fonte: [40] Umweltbundesamt, eigene Berechnungen auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz, Stand 07/2018 und Tabelle Bruttostromerzeugung, Stand 12/2018

Por muito tempo a Alemanha vem investindo em fontes renováveis de energia, inclusive Biogás. Mas o investimento maciço, em renováveis, foi concentrado em energia solar e eólica.

Em 2018, na Alemanha, a matriz elétrica contava com 50,12% de capacidade instalada de solar e eólica, juntas. A solar representava 22,05%, do total da capacidade instalada para geração de energia elétrica, e a eólica 28,07%. Vale ressaltar que a biomassa era 3,64% da capacidade instalada e, com este percentual reduzido de participação, produziu quase a mesma quantidade de energia elétrica que a solar (22,05%). A biomassa, em 12 meses, produziu 45.700 GWh e a solar 46.300 GWh. A capacidade instalada da solar era 6,05 vezes maior do que a de biomassa. Já a eólica com 7,71 vezes maior capacidade instalada, produziu somente 2,47 vezes mais energia elétrica em um ano, do que a biomassa. Analisando estes dados devemos também pensar o que acontece com as emissões de CO₂.

Na Tabela 36 os números sobre as emissões de CO₂ do setor de energia da Alemanha, não tem variação, permanecendo praticamente com as mesmas quantidades de emissões ano a ano, do ano de 2009 ao ano de 2017. Nos setores da indústria e da agricultura há um pequeno aumento. É fácil perceber que o grande vilão das emissões dos gases de efeito estufa é o setor de energia, e onde houve o maior investimento na tentativa de reduzi-los.

Tabela 36: Emissões em 1.000 t equivalentes de CO₂ por Setor da economia Alemã.

Setor	1990	2009	2011	2013	2015	2017	CO ₂	CO ₂ -CH ₄ -N ₂ O
Energia	989.637	745.436	760.723	783.512	749.096	747.914	93,49%	84,5%
Indústria	59.700	40.897	46.390	45.359	43.772	47.128	5,89%	7,1%
Agricultura	3.184	2.590	2.636	2.699	3.071	2.924	0,37%	7,3%
Total	1.054.511					799.983	100,00%	100,0%

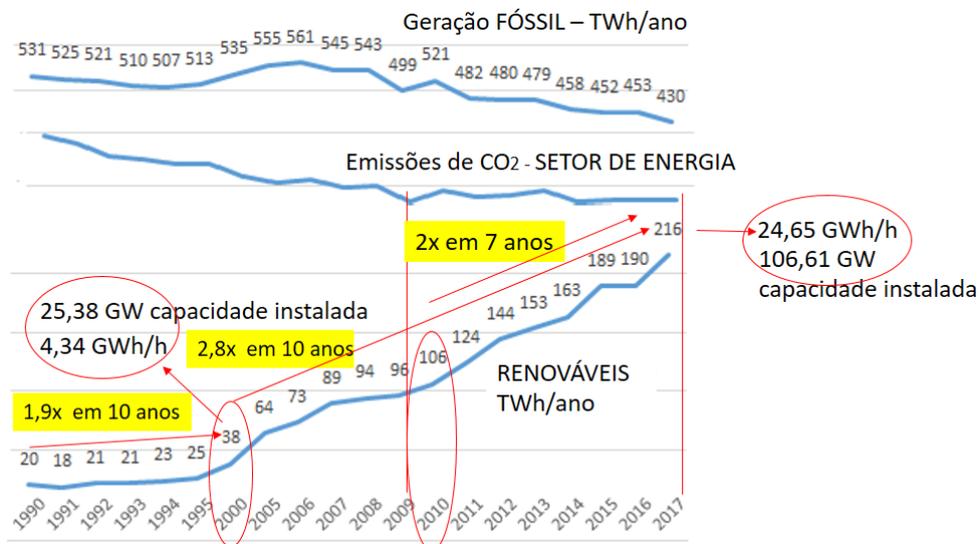
Fonte: [41].

A não diminuição das emissões se deve ao fato de que as energias de fontes intermitentes não substituem as fontes de energia fósseis. Solar e eólico tem a

desvantagem de produzir somente energia elétrica, e de forma imprevisível. Isto faz com que as usinas de geração de energia elétrica movidas a combustíveis fósseis permaneçam com sua capacidade instalada inalterada, não sendo possível retirá-las da matriz elétrica, pois fornecem energia de base para o sistema elétrico de potência. Outro aspecto importante, que as fontes eólica e solar não evitam, é a utilização do diesel e da gasolina no setor de transporte urbano e de cargas. A única fonte de energia capaz de produzir energia elétrica, energia térmica e combustível capaz de substituir as fontes fósseis é o biogás. Isto se confirma na prática ao analisarmos os dados contidos na Figura 20.

A Figura 20 mostra a evolução das emissões de CO₂ [41] e da geração de energia de fontes fósseis e renováveis [42] fazendo uma relação entre o quanto cresceu a geração de energia elétrica de fontes renováveis e a evolução das emissões de CO₂ do setor de energia. A política pública, alemã, para o aumento da geração de energia de fontes renováveis inicia em 1990.

Figura 20: Comparação entre a evolução da geração de energia renovável com a geração de energia fóssil e as emissões de CO₂ do setor de energia na Alemanha, 1990 a 2017.



Fonte: [41, 42].

Com os incentivos do governo alemão, os investimentos em fontes renováveis fazem com que haja um aumento da geração deste tipo de energia de quase duas

vezes, de 1990 a 2000. Em 2000 houve um novo impulso com novos incentivos para investimentos em fontes renováveis de energia. Do ano de 2000 a 2010, novamente, houve um grande incremento em função de políticas públicas voltadas para a geração de energia renovável. Este novo impulso quase triplicou a geração de energia de fontes renováveis. Depois deste período, de 2010 a 2017 esta geração duplica novamente.

Se formos analisar sobre o aspecto das emissões de CO₂, vemos que apesar de 2009 a 2017 haver um incremento na geração de energia renovável de 125%, este crescimento não influi em nada sobre as emissões. Elas permanecem inalteradas, não havendo redução nenhuma em função do crescimento da geração de energia renovável. A explicação está no fato, já comentado anteriormente, de que energia eólica e solar são fontes intermitentes e não podem substituir energia de origem fóssil.

Para melhor entender o fato de não haver alterações nas emissões devemos analisar o que aconteceu com a geração de energia das fontes fósseis e renováveis de 1990 até 2018.

Na Tabela 37 é possível visualizar o que foi gerado de energia elétrica, por origem de cada fonte, em 1990 e em 2018. Com isso se consegue saber quais energias tiveram a maior redução e o maior aumento na geração.

Tabela 37: Geração bruta de energia elétrica – variação entre 1990 e 2018.

	TWh 1990	TWh 2018	Variação entre 1990 e 2018				2018 GWh/h
			Total / ano	GWh/h méd			
linhito	171	146	-25 TWh	-2,85 GWh/h		16,67	
energia nuclear	153	76	-77 TWh	-8,79 GWh/h		8,68	11,86%
carvão	141	83	-58 TWh	-6,62 GWh/h		9,47	
gases	36	83	47 TWh	5,37 GWh/h		9,47	
óleos minerais	11	5	-6 TWh	-0,68 GWh/h		0,57	
Outras fontes de energia	19	19	0 TWh	0,00 GWh/h		2,17	
fóssil	378	336	-42 TWh	-4,79 GWh/h		38,36	52,42%
Energias renováveis	20	229	209 TWh	23,86 GWh/h		26,14	35,73%
Total	551	641	90 TWh	10,27 GWh/h		73,17	100%

Fonte: [42]

Mas o detalhe, que é importante ressaltar, é sobre o aumento de demanda por energia na Alemanha. De 1990 a 2018 o aumento da demanda foi de apenas 90 TWh. Isto representa um aumento no consumo médio de 10 GWh/méd no espaço de quase 30 anos. Devido a estagnação da redução das emissões a Alemanha tem aumentado a geração de energia através do gás natural, para diminuir a geração de outras fontes mais poluentes. Embora tenha havido um decréscimo acentuado na geração de energia nuclear, este tipo de geração não influencia nas emissões. Apesar das renováveis terem aumentado a sua geração em 209 TWh de 1990 a 2018, a redução da geração de fontes fósseis foi de apenas 42 TWh. Isto mostra que a renovável não substitui a fóssil, a não ser que seja uma energia de base como a do biogás.

Na Tabela 38 estão os números relativos a capacidade instalada de cada tipo de fonte de energia renovável de 2009 a 2018.

Tabela 38: Capacidade Instalada em MW na Alemanha – 2009 a 2018.

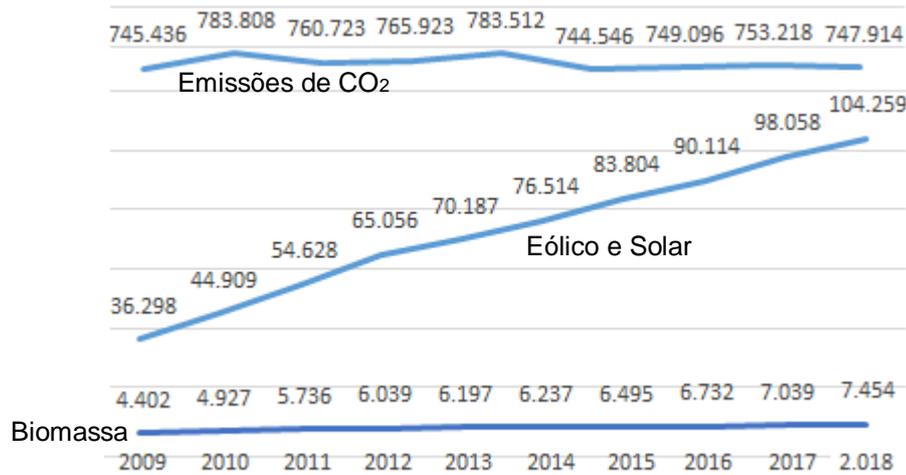
solar	Eólico On	Eólico Off	Total		Ano	Aumento	Total	Queima Biomassa		
			Eólico+Solar	Aumento				Liquida	Lenhosa	Biogás
10.566	25.697	35	36.298		2009		4.402	412	1.470	2.520
18.006	26.823	80	44.909	8.611	2010	525	4.927	410	1.502	3.015
25.916	28.524	188	54.628	18.330	2011	1.334	5.736	345	1.554	3.837
34.077	30.711	268	65.056	28.758	2012	1.637	6.039	277	1.558	4.204
36.710	32.969	508	70.187	33.889	2013	1.795	6.197	263	1.623	4.311
37.900	37.620	994	76.514	40.216	2014	1.835	6.237	232	1.589	4.416
39.224	41.297	3.283	83.804	47.506	2015	2.093	6.495	232	1.592	4.671
40.679	45.283	4.152	90.114	53.816	2016	2.330	6.732	231	1.600	4.901
42.339	50.292	5.427	98.058	61.760	2017	2.637	7.039	229	1.601	5.209
45.277	52.565	6.417	104.259	67.961	2018	3.052	7.454	230	1.604	5.620

Fonte: [42].

De 2009 a 2018 há um aumento da capacidade instalada de eólico e solar da ordem de 67.961 MW, vinte e duas vezes maior do que o crescimento da capacidade instalada da geração a biomassa. O aumento da capacidade instalada de fontes de energia a biomassa foi de apenas 3.052 MW, no mesmo período.

Na Figura 21 é possível visualizar o efeito que o aumento da capacidade instalada de eólico e solar exercem sobre as emissões de CO₂ no setor de energia.

Figura 21: Relação entre o aumento da capacidade instalada de solar, eólico e biomassa com as emissões de CO₂ do setor de energia.



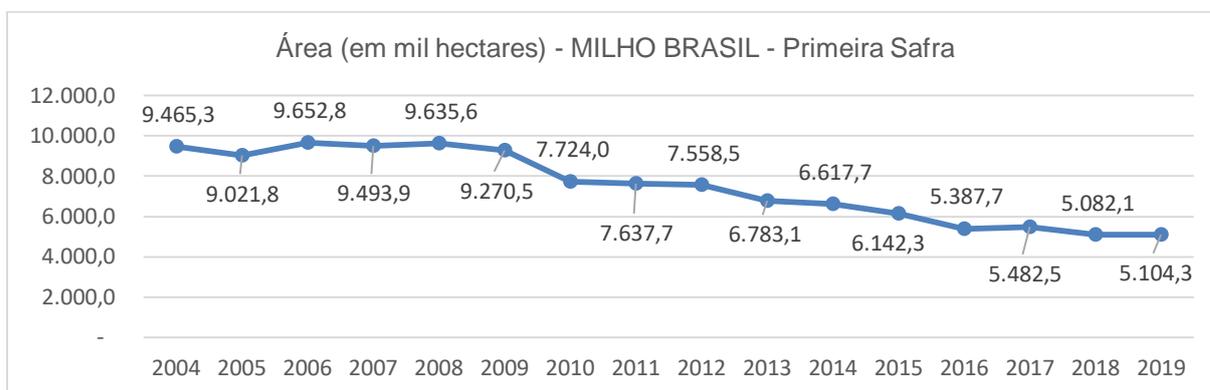
Fonte: [42].

O efeito é nulo, não havendo nenhuma redução das emissões de CO₂ em função do aumento da capacidade instalada das usinas fotovoltaicas e dos parques eólicos. Por isso, a única alternativa segura para diminuição das emissões de CO₂ é uma política pública que favoreça o desenvolvimento do setor de biogás, para geração de energia elétrica e biometano, com a finalidade de substituir as fontes fósseis de energia.

5.5. Ganhos em função dos Cenários: 1 a 5

A possibilidade de o agricultor ganhar muito mais dinheiro com a agricultura e a produção animal fica evidente quando comparamos o cenário atual do agronegócio com os modelos de negócio para produção de biogás a partir de plantas energéticas e resíduos da produção animal (cenários 1 a 5) apresentados neste trabalho.

Quando se analisa o histórico de produção de milho no Brasil, bem como também no Rio Grande do Sul, é possível perceber o desestímulo por parte do agricultor ocorrido no período de 2004 a 2019. Visualizando a Figura 22, a redução de área plantada é de mais de 4 milhões de hectares nos últimos 15 anos.

Figura 22: Área plantada de Milho (primeira Safra) no Brasil – 2004 a 2019.

Fonte: CONAB

No Rio Grande do Sul, a redução de área tem sido constante, ano a ano. Analisando os dados do IBGE (Anexo IV), o milho apresentou uma regularidade em tamanho de área plantada do ano de 1970 até o ano de 1991. Esta área variava de 1,5 a 1,7 milhões de hectares. Em 1992 houve o recorde de plantio de milho, que atingiu 2.009.320 ha. Após 1992 a área só decresceu de tamanho. Isto se deve ao fato de o retorno econômico ser inferior ao do que se consegue com o plantio da soja. De acordo com os dados da CONAB, Figura 23, é possível visualizar esta queda na área plantada, que representa no ano de 2019, 42% a menos em relação a 2004 e em relação a 1992 a redução chega a 62,47%.

Figura 23: Área plantada de Milho (primeira Safra) no Rio Grande do Sul – 2004 a 2019.

Fonte: CONAB

O desestímulo por parte do produtor, que gera esta redução de área é preocupante do ponto de vista sanitário. A rotação de cultura, proporcionada pelo milho após a soja, é necessária para a redução e prevenção de doenças nesta cultura.

Quanto menor for a rotação de cultura, maiores são os gastos com produtos fitossanitários para produção da oleaginosa.

Com o trigo acontece o mesmo fenômeno (Anexo V). A área plantada de trigo é inferior ao do milho. Em 2019 a área plantada foi de 739,4 mil hectares cultivados (Emater/RS-Ascar). O agricultor não tem alternativa de ganho de renda no inverno. Os preços praticados pelo mercado em relação ao grão de trigo não estimulam o agricultor a plantar. Outro agravante é o fato de a qualidade do nosso trigo não atingir o patamar desejado pelo mercado, o que acarreta preços baixos a serem pagos ao produtor.

Para reverter este quadro, a produção de biogás a partir da silagem de milho, no verão, e de cereais no inverno, passa a ser uma excelente alternativa para o agricultor aumentar a área plantada e, por consequência disto, elevar sua renda. Com produção de energia o produtor rural aumenta o seu ganho com as demais culturas, ao realizar a rotação de cultura.

Na Tabela 39 é possível a comparação entre os ganhos gerados pela produção de milho para grãos e, milho silagem para geração de energia elétrica, bem como de cereais (grãos e energia).

Tabela 39: Comparação entre os Cenários 1, 2 e 3 e a produção de grãos de milho e cereais.

Lucro Líquido em R\$ / hectare						Agricultura Convencional	
Biogás Energia Elétrica						Grãos	
SM (40 t / ha)		SC (30 t / ha)		SM (40 t/ha) + SC (30 t/ha)		Milho (100 sc)	Cereais (48 sc)
Anos 1 – 10	Anos 10 – 20	Anos 1 – 10	Anos 10 – 20	Anos 1 – 10	Anos 10 – 20		
2.370,75	3.487,41	532,00	1.600,00	3.185,48	3.034,00	800,00	- 40,00
a	a	a	a	a	a	a	a
3.247,41	5.669,14	1.432,00	2.142,40	4.261,00	6.038,30	1.500,00	248,00

SM: Silagem de Milho; SC: Silagem de Cereais. Considerando: Preço Sc (60Kg) de Milho: R\$ 26,00/Sc a R\$ 35,00/Sc. Custo de Produção do milho: R\$1.800,00 / ha; Preço Sc (60Kg) Trigo: R\$ 42,00/Sc a R\$ 48,00/Sc. Custo de Produção do Trigo: R\$ 2.056,00 / ha.

Na safra de trigo de 2018, para o agricultor que colheu a média de 2.970 Kg/ha, e teve um custo de produção de R\$2.056,40 (Anexo – III), o lucro foi de

R\$305,65/ha. Mas isso, somente se o PH for superior ou igual a 78. Na safra de 2018, o peso do hectolitro foi inferior a 78.

No caso do milho, na safra 2018 – 2019, a produtividade ficou em 120 sacos por hectare. Mesmo assim, a alternativa de produção de energia gera maior renda.

Nos casos de geração de energia a partir de esterco suíno, cenário 4, a TIR de 10 anos é de 74,84% e, para 20 anos de 75,26%. O retorno sobre o investimento de R\$ 1.625.113,52 (20% do CAPEX ajustado) acontece no nono mês do ano 1. E a partir de dejetos bovinos, no cenário 5, a TIR de 10 anos é de 61,91% e, para 20 anos de 63,06%. O retorno sobre o investimento de R\$ 972.696,94 (21,89% do CAPEX ajustado) acontece no sétimo mês do ano 2.

CONCLUSÃO

Este trabalho é pioneiro, a nível de Brasil, por avaliar a possibilidade da geração de energia elétrica a partir de plantas energéticas como o milho e cereais de inverno. De acordo com os dados levantados neste trabalho é possível aumentar a renda do produtor rural através da produção de energia elétrica utilizando silagens de milho, no verão, e de cereais no inverno, bem como também, através do emprego de esterco suíno e bovino em plantas de biogás. As empresas que adquirirem a energia renovável, produzida nas plantas de biogás, terão uma redução de custo no consumo de energia elétrica e maior previsibilidade de gasto, pois os reajustes de preço podem ser feitos pelo IPCA. Ao mesmo tempo ocorre uma destinação correta dos resíduos orgânicos produzidos nas propriedades de suínos e bovinos. Com a possibilidade de aumento da área de rotação de cultura e o fim da ociosidade de áreas agrícolas no período de inverno, haverá um maior volume de dinheiro girando nas propriedades rurais, que possibilitará um aumento significativo do produto interno bruto do Estado do Rio Grande do Sul e um aumento na arrecadação de ICMS proporcionado pela comercialização de energia renovável. Os resultados apresentados neste trabalho demonstram que o ganho com a geração de energia pode aumentar o lucro líquido por hectare em até 300%, quando comparado com a agricultura convencional. Os dados apresentados podem servir de base para o planejamento de políticas públicas, que visem promover o desenvolvimento econômico do Rio Grande do Sul e do Brasil e que, com certeza, beneficiarão a sociedade e o meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial [da] União (DOU)**, Brasília, p. 3 da Seção 1, de 3 de ago. 2010.
2. PALHARES, J.C.P. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro**. 2008. Artigo em Hypertexto. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2008_1/Biodigestao/index.htm Acesso em: 28/6/2012
3. BRASIL. Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha, **Zielmarktanalyse: Biogas Brasilien Energetische Nutzung von Abfällen und Abwässern, mit Profilen der Marktakteure**, Rio de Janeiro, p. 50-51, 02 dez. 2015.
4. COELHO, M. A. A.; SOUZA, J.; SCHAEFFER, L.; **Study on the economic viability of hi-tech biogas plants**. Revista Espacios. Vol. 35 n°(3) 2014. Pág. 02. Disponível em <http://www.revistaespacios.com/> Caracas – Venezuela, 03/2014.
5. KALTSCHMITT, M.; MERTEN, D.; WEILAND, P.; SCHULTE-SCHULZE BERNDT, A. **Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven**, VDI-Bericht 1620. Düsseldorf: VDI Verlag, 2001.
6. THEIßING, M. **Biogas Einspeisung und Systemintegration in bestehende Gasnetze**. FH JOANNEUM Gesellschaft mbH, Wien, 2006. p. 59.
7. LANDERTSHAMMER, S. Diplomarbeit *Alternative Treibstoffe* Eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse für das Dienstleistungsunternehmen Studienrichtung Landwirtschaft / Agrarökonomik Betreuer: O. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Walter Schneeberger. 2006, p.42.
8. CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1997, cap. 02 e 03, p. 23-95.
9. Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: **Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren**; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Nova Iorque, 2001.

10. ALEMANHA. **Portaria sobre Geração de Eletricidade a partir de Biomassa (Biomasseverordnung - BiomasseV) BGBI n ° 29**, Parte I, página 1234, de 27 de jun. 2001.
11. Pflanzenbauwissenschaften, 7 (1), ISSN 1431-8857, Editora Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, pág. 39–47, 2003.
12. HERRMANN, C.; IDLER, C.; HEIERMANN, M.; **Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics**, Bioresource Technology journal, Published by Elsevier Ltd., 2016 www.journals.elsevier.com/bioresource-technology.
13. BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA – **Estudo Interlaboratorial em Digestão Anaeróbia: Relato de Atividades e Desempenho dos Laboratórios em 2014**. Documentos 175, Embrapa Suínos e Aves, Concórdia, SC; 2015. ISSN 0101-6245. 2015.
14. BASERGA, U.; **Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen**; FAT-Berichte n° 512, 1998.
15. EOIN, G., **Biogas production potential and cost-benefit analysis of harvesting wetland plants (Phragmites australis and Glyceria maxima)**, Halmstad University, School of Business, Engineering and Science, URN: urn:nbn:se:hh:diva-34424, 2017, p. 48.
16. BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2030**. Empresa de Pesquisa Energética. 408p.: 199 il. ISBN: 978-85-60025-02-2. Rio de Janeiro: EPE, 2007.
17. VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (AUSTRIA), Institute of Chemical Engineering Research Division Thermal Process Engineering and Simulation, **Biogas to Biomethane Technology Review**, Task 3.1.1, 2012.
18. GIERSDORF, J. **BiReSB, Biogas a partir de Resíduos no Sul do Brasil**. Seminário Brasilien, AHK-POA – Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <http://abbiogasemetano.org.br/BiReSB%202011%20tecnologias%20Purificacao.pdf>
19. GIERSDORF, J. **Biogas in Brasilien**. Seminário Brasilien – Chancen im Bereich Energietechnik/Erneubare energien. Dresden, 8.12.2011. Disponível em: http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Vortraege/Vortraege_DBFZ/DBFZ_Biogas_Brasilien_2011.pdf. Acessado em 28.01.2013.
20. LINDORFER, H.; FRAUZ, B.; **Chapter 6 - Biogas Biorefineries** – Livro: Industrial Biorefineries & White Biotechnology 2015, Elsevier, pág. 271-294. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00008-2>
21. FEIZ, R., AMMENBERG, J.; **Assessment of feedstocks for biogas production, part I-A multi-criteria approach**, Resources, Conservation and Recycling 122 (2017) 373–387; journal home page: www.elsevier.com/locate/resconrec

22. R. PASCHOTTA, Artigo 'Energiepflanzen' im RP-Energie-Lexikon, acessado em 27.10.2018 <https://www.energie-lexikon.info/energiepflanzen.html>
23. NÄGELE, H.J.; STEINBRENNER, J.; HERMANN, G.; HOLSTEIN, V.; HAAG, N.L.; OECHSNER, H.; **Innovative additives for chemical desulphurisation in biogas processes: A comparative study on iron compound products**, *Biochemical Engineering Journal*, Volume 121, 2017, Pages 181-187, ISSN 1369-703X, <https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.01.006>.
24. HAGOS, Kiros *et al.* **Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives**; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017) 1485–1496, Elsevier.
25. JAIN, S., *et. al.* **A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015) 142 – 154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.091>
26. CHEN Y.; CHENG J. J.; CREAMER K. S.; **Inhibition of anaerobic digestion process: A review**, *Bioresource Technology*, Volume 99, Issue 10, 2008, Pages 4044-4064, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>.
27. MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G.; **Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 45, 2015, Pages 540-555, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>.
28. LANES, E.; OLIVEIRA, S.; LOPES, C. F.; VILLANI, E.; (2006). **Silagem de Milho Como Alimento Para o Período da Estiagem: como produzir e garantir qualidade**. *CES Revista*. 20. 97-111.
29. LINDORFER, H.; **Plantas energéticas de biogás a partir de silagem de milho**. III Seminário Internacional sobre as Perspectivas do Ensino de Ciências Agrárias e Ambientais no Sul. Apresentado em 26 de set. 2018. Disponível em: http://abbiogasemetano.org.br/Portugu%C3%AAs%20Lindorfer_Plantas%20energ%C3%A9ticas%20jui%202018.pdf.
30. HERRMANN, C; IDLER, C.; HEIERMANN, M.; **Improving aerobic stability and biogas production of maize silage using silage additives**, *Bioresource Technology*, Volume 197, 2015, Pages 393-403, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.114>.
31. NABEL, M.; SCHREY, S. D.; POORTER, H.; KOLLER, R.; JABLONOWSKI, N. D.; **Effects of digestate fertilization on *Sida hermaphrodita*: Boosting biomass yields on marginal soils by increasing soil fertility**, *Biomass and Bioenergy*, Volume 107, 2017, Pages 207-213, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.009>.

32. JOHANSEN, A.; CARTER, M. S.; JENSEN, E. S.; HAUGGARD-NIELSEN, H.; AMBUS, P.; **Effects of digestate from anaerobically digested cattle slurry and plant materials on soil microbial community and emission of CO₂ and N₂O**, Applied Soil Ecology, Volume 63, 2013, Pages 36-44, ISSN 0929-1393, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.09.003>.
33. OSLAJ, M.; MURSEC, B.; VINDIS, P.; **Biogas production from maize hybrids**, Biomass and Bioenergy, Volume 34, Issue 11, 2010, Pages 1538-1545, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.016>.
34. NEGRI, M., *et. al.*, **Evaluation of methane production from maize silage by harvest of different plant portions**, Biomass and Bioenergy, Volume 67, 2014, Pages 339-346, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.016>.
35. OLIVEIRA, P. A. V. de. (Coord.) **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA-CNPISA, 1993. 188p. (EMBRAPA-CNPISA. Documentos, 27)
36. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira, cana-de-açúcar**. ISSN 2318-7921, V. 6 - SAFRA 2019/20 N.2 - Segundo levantamento. Pág. 17. Agosto 2019.
37. BRASIL. Empresa de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Produção de etanol abre novas oportunidades para os cultivos de inverno**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/44652784/producao-de-etanol-abre-novas-oportunidades-para-os-cultivos-de-inverno>. Acessado em 03 de julho 2019.
38. BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, d 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. DOU de 02/12/2015 (nº 230, Seção 1, pág. 45).
39. BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil**. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro, julho / 2018, pág. 13,
40. BUCHAL, C. KARL, H.D., SINN, H.W. **Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?** ISSN 2199-4455 (versão eletrônica). ifo Institut, Poschingerstraße 5, 81679 München, Postfach 86 04 60, 81631 München. Pág. 40, 25 de abril 2019.
41. ALEMANHA. Umweltbundesamt. **Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung, 1990 – 2017, Endstand zur Berichterstattung 2019**. Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau. Email: l2.6@uba.de. Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen>. Janeiro de 2019.

42. ALEMANHA. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. **Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland**, unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), Stand: Februar 2019.

ANEXO – I

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ - SEAB
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL - DERAL

ESTIMATIVA DO CUSTO DE PRODUÇÃO

PRODUTO: Trigo

MÊS/ANO: Agosto 2018

Produtividade: 48 SC 60kg/ha

Especificação	R\$/ha	R\$/60kg	Participação (%)
1 - Operação de máquinas e implementos	353,05	7,36	10,36
2 - Despesas de manutenção de benfeitorias	24,58	0,51	0,72
3 - Mão-de-obra temporária	47,45	0,99	1,39
4 - Sementes/Manivas	205,50	4,28	6,03
5 - Fertilizantes	677,00	14,10	19,87
6 - Agrotóxicos	389,60	8,12	11,44
7 - Despesas gerais	33,94	0,71	1,00
8 - Transporte externo	93,12	1,94	2,73
9 - Assistência técnica	34,62	0,72	1,02
10 - PROAGRO/SEGURO	50,92	1,06	1,49
11 - Juros	62,18	1,30	1,83
TOTAL DOS CUSTOS VARIÁVEIS (A)	1.971,96	41,09	57,88
1 - Depreciação de máquinas e implementos	296,51	6,18	8,70
2 - Depreciação de benfeitorias e instalações	32,76	0,68	0,96
3 - Sistematização e correção do solo	85,84	1,79	2,52
4 - Cultura	-	-	-
5 - Seguro do capital	21,79	0,45	0,64
6 - Mão-de-obra permanente	165,04	3,44	4,84
SUB-TOTAL (B)	601,94	12,54	17,67
7 - Remuneração do Capital próprio	205,80	4,29	6,04
8 - Remuneração da terra	627,30	13,07	18,41
SUB-TOTAL (C)	833,10	17,36	24,45
TOTAL DOS CUSTOS FIXOS (B+C)	1.435,04	29,90	42,12
CUSTO OPERACIONAL (A+B)	2.573,90	53,63	75,55
CUSTO TOTAL (A+B+C)	3.407,00	70,99	100,00

FONTE: SEAB/DERAL

Obs: Coeficientes e sistemas de produção ajustados inclusive nos meses anteriores a esta pesquisa.

ANEXO – II

EMATER/RS – Santa Maria, RS. (IBGE) Orçamento 2018/2019 - Milho 5400-6000 Kg/ha					
Composição	Especificação	UNIDADE (Kg, L, etc)	Qtd / ha	Valor Unit.	R\$/ha
A – INSUMOS					
1. Sementes	Híbrido 60.000 stes/ha Bt + RR	Kg	20,00	40,00	800,00
2. Trat. Sementes					
2.1. Fungicida		L			0,00
2.2. Inseticida	CropStar 0,1 l/ha	L	0,10	220,00	22,00
2.3. Micronutrientes		L			0,00
3. Inoculante		L			0,00
4. Fertilizante					
4.1. Base	05-25-25 300 Kg/ha 45-0-0 200 Kg/ha (2 Parcelas)	Kg	300,00	1,30	390,00
4.2. Cobertura		Kg	200,00	1,24	248,00
4.3. Outros (orgânicos, foliar, etc)		Kg/L			0,00
5. Controle de Plantas Invasoras					
5.1. Mecânico		H			0,00
5.2. Herbicida A	Glifosato 3,0 + 2,0 l/há (2 Aplic)	L	5,00	15,50	77,50
5.3. Herbicida B	2,4-D 2,0 lt/ha (2 Aplic)	L	4,00	23,00	92,00
6. Controle de Pragas					
6.1. Inseticida A	Certero 0,05 l/ha (3 Aplic)	L	0,15	170,00	25,50
6.2. Inseticida B		L			0,00
6.3. Formicida	Granulado 3,0 Kg/ha	Kg/L	3,00	17,00	51,00
6.3. Biológico		Kg/L			0,00
7. Controle de Moléstias					
7.1. Fungicida A		L			0,00
7.2. Fungicida B		L			0,00
SUBTOTAL (A)					1706,00
B - SERVIÇOS E OPERAÇÕES					
8.1. Preparo do solo/manejo de cobertura		H/M			0,00
8.2. Plantio/semear e adubação		H/M	1,00	103,82	103,82
8.3. Adubação de cobertura		H/M	1,00	97,82	97,82
8.3. Controle de Plantas Invasoras		H/M	2,00	88,12	176,24
8.4. Controle de Pragas		H/M	1,00	88,12	88,12
8.5. Controle de Moléstias		H/M			0,00
8.6. Colheita		H/M	1,00	256,73	256,73
8.7. Transporte		2%			79,79
8.8. Outros					0,00
SUBTOTAL (B)					802,52
TOTAL (A + B) Por hectare					2508,52

ANEXO – III

EMATER/RS Santa Maria, RS

Orçamento 2018 - Trigo 2300-2700 Kg/ha					
Composição	Especificação	Unidade	Quantidade por ha	Valor unitário	R\$/ha
A - INSUMOS					
1. Sementes	Sinuelo	Kg	160,00	1,30	208,00
2. Trat. Sementes					
2.1. Fungicida	Baytan+Imida	ml	3,50	14,74	51,60
2.2. Inseticida	2ml + 1,5 ml	L			0,00
2.3. Micronutrientes		L			0,00
3. Inoculante		L			0,00
4. Fertilizante					
4.1. Base	5-20-20	Kg	250,00	1,02	255,00
4.2. Cobertura	45-0-0 50 Kg	Kg	100,00	0,95	95,00
4.3. Outros (orgânicos, foliar, etc)		Kg/L			0,00
5. Controle de Plantas Invasoras					
5.1. Herbicida A (Na Dessecação)	Paraquat	L	2,00	145,00	290,00
5.2. Herbicida B (Pós Emerdente)	2,4-D Amina	L	2,00	11,50	23,00
5.3. Herbicida C					0,00
6. Controle de Pragas					
6.1. Inseticida A	Nomolt (2X)	L	0,26	140,00	36,40
6.2. Inseticida B	Connect (2x)	L	1,50	38,00	57,00
6.3. Formicida	Mirex	Kg/L	2,00	13,50	27,00
6.3. Biológico		Kg/L			0,00
7. Controle de Moléstias					
7.1. Fungicida A	Propiconazole (2X)	L	1,00	53,00	53,00
7.2. Óleo Mineral	Nimbus	L	1,00	15,00	15,00
7.2. Fungicida B	Aproach Prima(2x)	L	0,60	124,00	74,40
SUBTOTAL (A)					1185,40
B - SERVIÇOS E OPERAÇÕES					
8.1. Preparo do solo/manejo de cobertura		H/M			0,00
8.2. Plantio/semear e adubação		H/M	1,00	101,12	101,12
8.3. Adubação de cobertura		H/M	0,50	95,12	47,56
8.3. Controle de Plantas Invasoras		H/M	1,00	85,42	85,42
8.4. Controle de Pragas		H/M	2,00	85,42	170,84
8.5. Controle de Moléstias		H/M	2,00	85,42	170,84
8.6. Colheita		H/M	1,00	254,03	254,03
8.7. Transporte		2%			41,19
8.8. Outros					0,00
SUBTOTAL (B)					871,00
TOTAL (A + B) Por hectare					2056,40

ANEXO - IV
 ÁREA, PRODUÇÃO, RENDIMENTO E VALOR BRUTO DA PRODUÇÃO
MILHO (em grão)
 RIO GRANDE DO SUL – 1970 / 2017

Anos	Área (ha)		Produção (t)	Rendimento Médio (kg/ha)	V.B.P.
	Plantada	Colhida			
1970 ⁽¹⁾		1.737.080	2.386.627	1.374	374.843
1971 ⁽²⁾		1.746.584	2.401.876	1.375	421.388
1972 ⁽²⁾		1.723.596	2.237.285	1.298	659.971
1973		1.507.083	2.100.000	1.394	797.561
1974		1.525.000	2.236.000	1.466	1.371.337
1975		1.524.138	2.367.322	1.553	1.560.151
1976		1.580.000	2.443.000	1.546	2.447.273
1977		1.673.000	2.680.000	1.601	3.090.136
1978		1.673.400	2.150.000	1.319	4.586.965
1979		1.787.500	1.853.600	1.036	5.940.256
1980		1.861.298	3.162.033	1.698	21.921.233
1981		1.818.696	3.808.793	2.094	43.093.897
1982		1.851.740	3.147.246	1.700	58.397.532
1983		1.778.993	3.174.771	1.785	231.167.000
1984		1.883.224	3.567.360	1.894	652.743.000
1985		1.744.881	3.558.591	2.039	2.032.923.184
1986		1.525.461	1.937.700	1.270	2.928.882
1987	1.955.395	1.955.387	3.873.498	1.981	10.706.066
1988	1.680.247	1.619.568	2.538.528	1.567	48.592.684
1989	1.580.617	1.572.287	3.583.753	2.279	731.509
1990	1.647.266	1.645.951	3.957.441	2.404	25.615.976
1991	1.860.768	1.795.379	2.046.555	1.139	76.974.442
1992	2.009.320	2.007.320	5.533.543	2.756	1.490.465.799
1993	1.741.492	1.741.492	4.605.268	2.644	27.896.369
1994	1.721.687	1.721.487	4.751.443	2.760	406.844
1995	1.883.870	1.883.445	5.935.667	3.151	571.222
1996	1.674.242	1.366.777	2.965.323	2.170	418.569
1997	1.655.199	1.616.301	4.097.903	2.535	471.780
1998	1.523.845	1.473.474	4.362.892	2.960	595.953
1999	1.490.048	1.326.085	3.212.735	2.422	505.059
2000	1.537.759	1.487.037	3.936.202	2.647	732.405
2001	1.675.963	1.672.923	6.134.207	3.666	1.112.278
2002	1.464.836	1.425.131	3.901.171	2.737	1.008.259
2003	1.416.777	1.415.297	5.426.124	3.833	1.586.134
2004	1.303.297	1.199.523	3.376.862	2.815	1.090.174
2005	1.206.119	965.586	1.485.040	1.537	472.403
2006	1.422.060	1.403.218	4.528.143	3.226	1.020.846
2007	1.365.387	1.363.323	5.969.118	4.378	1.676.453
2008	1.385.998	1.372.768	5.231.885	3.811	2.035.603
2009	1.385.754	1.318.854	4.186.862	3.174	1.302.441
2010	1.151.397	1.148.708	5.633.912	4.904	1.705.885
2011	1.100.309	1.009.541	5.772.422	5.249	2.333.421
2012	1.119.220	1.007.106	3.155.061	3.133	1.386.005
2013	1.033.728	1.003.965	5.419.780	5.398	2.362.533
2014	925.634	924.483	5.389.916	5.830	2.170.651
2015	854.793	854.735	5.563.555	6.509	2.190.853
2016	740.510	738.370	4.729.948	6.406	2.939.673
2017	831.221	830.216	6.062.550	7.302	2.532.896

FONTE: IBGE.

ANEXO – V
 ÁREA, PRODUÇÃO, RENDIMENTO E VALOR BRUTO DA PRODUÇÃO
TRIGO (em grão)
 RIO GRANDE DO SUL – 1970 / 2017

Anos	Área (ha)		Produção (t)	Rendimento Médio (kg/ha)	V.B.P.
	Plantada	Colhida			
1970 ⁽¹⁾		1.467.947	1.448.503	987	694.282
1971 ⁽²⁾		1.778.340	1.537.081	864	829.952
1972 ⁽²⁾		1.800.000	557.306	310	334.384
1973		1.372.952	1.535.887	1.119	1.167.994
1974		1.565.380	1.690.000	1.079	2.292.312
1975		1.898.923	1.234.300	650	2.002.453
1976		2.010.000	1.809.000	900	3.750.614
1977		1.523.500	689.700	452	1.849.515
1978		1.243.800	1.505.000	1.210	5.812.795
1979		2.004.010	981.964	489	4.976.080
1980		1.358.522	1.016.243	748	10.389.532
1981		903.970	1.072.914	1.187	28.167.622
1982		1.308.052	516.790	395	29.065.163
1983		690.566	797.422	1.155	101.177.000
1984		634.187	611.632	964	298.471.000
1985		970.804	1.001.958	1.032	639.958.255
1986		1.169.234	1.811.169	1.549	6.049.333
1987	998.324	998.324	1.783.449	1.786	19.700.058
1988	1.051.188	1.051.188	1.605.043	1.526	125.205.575
1989	814.471	808.649	1.461.726	1.807	2.337.103
1990	986.248	985.158	1.168.628	1.182	14.709.264
1991	624.923	617.413	682.684	1.105	44.954.980
1992	486.964	486.614	903.139	1.855	790.559.229
1993	598.339	598.312	917.325	1.533	17.253.978
1994	554.349	554.129	806.983	1.456	88.695
1995	298.934	270.247	334.525	1.237	46.594
1996	557.169	552.839	949.982	1.718	145.139
1997	496.543	482.281	603.823	1.252	78.966
1998	379.900	376.955	538.112	1.427	77.553
1999	398.133	396.922	725.940	1.828	131.195
2000	560.550	554.932	884.507	1.593	172.959
2001	615.152	613.131	1.075.897	1.754	258.534
2002	800.307	794.187	1.126.524	1.418	453.352
2003	1.063.894	1.063.194	2.395.557	2.253	990.956
2004	1.124.845	1.124.800	2.061.410	1.832	718.483
2005	844.821	844.420	1.389.731	1.645	446.350
2006	699.451	607.269	823.062	1.355	320.609
2007	850.169	848.404	1.723.007	2.030	723.550
2008	970.375	970.178	2.198.902	2.266	880.402
2009	859.790	855.670	1.912.138	2.234	716.266
2010	787.480	787.480	2.116.952	2.688	811.803
2011	932.390	932.360	2.744.936	2.944	1.105.031
2012	989.534	961.502	1.866.254	1.941	914.247
2013	1.059.032	1.059.032	3.351.150	3.164	2.003.518
2014	1.180.179	1.179.017	1.670.623	1.417	676.113
2015	882.566	874.362	1.391.829	1.592	697.803
2016	779.045	778.486	2.541.889	3.265	1.310.525
2017	691.553	691.553	1.226.474	1.777	561.426

FONTE: IBGE