

LUIZ EDUARDO FERREIRA

**Análise comparativa energética e econômica do etanol e do biogás em cenários rurais
familiares**

Luiz Eduardo Ferreira

**Análise comparativa energética e econômica do etanol e do biogás em cenários rurais
familiares**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

Guaratinguetá
2022

F383a	Ferreira, Luiz Eduardo Análise comparativa energética e econômica do etanol e do biogás em cenários rurais familiares / Luiz Eduardo Ferreira – Guaratinguetá, 2022. 83 f : il. Bibliografia: f. 79-83 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri 1. Biocombustíveis. 2. Biomassa. 3. Biogás. 4. Etanol. 5. Motores de combustão interna. I. Título. CDU 620.91
-------	---

LUIZ EDUARDO FERREIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador/UNESP-FEG



Prof. MSc. FERNANDO HENRIQUE MAYWORM DE ARAUJO
UNESP-FEG



Prof.(^a). MSc. SOFIA GLYNIADAKIS
UNESP-FEG

Novembro de 2022

DADOS CURRICULARES

LUIZ EDUARDO FERREIRA

NASCIMENTO	04/09/1998 – Caraguatatuba / SP
FILIAÇÃO	Alexandre Augusto da Silva Ferreira Maguida Suely Ferreira
2017/2022	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

Para meus pais que me ensinaram que o caráter é moldado pela responsabilidade e o dever, e que apenas nós podemos mudar nosso destino.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado o dom da vida e a força necessária para continuar de pé em todas as batalhas que travei, travo e travarei em minha vida.

Agradeço aos meus pais, Alexandre Augusto da Silva Ferreira e Maguida Suely Ferreira, por serem o alicerce da minha vida; motivo pelo qual busco cada dia mais evoluir como ser humano, pois sei, graças a eles, que apenas o trabalho duro, o respeito e o amor podem mover montanhas e traçar destinos. Mãe e pai, muito obrigado por acreditarem sempre em mim e me apoiarem em todas as minhas batalhas, pois vocês mesmo hoje não estando perto de mim diariamente, sempre estarão em meu coração.

Agradeço a minha irmã, Luciana Helena Ferreira, por ser a pessoa mais amável e inspiradora em minha vida. Lu, seu jeito gentil e divertido sempre foi o motivo para que esse sonho se mantivesse com a chama acesa, até mesmo nos piores momentos, nos quais passei.

Agradeço também a toda a minha família que me apoiou em vários momentos dessa jornada acadêmica, cada um do seu jeito e da forma que podia. Agradeço minhas duas vós, Aguida Suely de Moura Obed e Eni da Silva Ferreira, por serem minhas segundas mães, por ajudarem a mim e nossa família sempre como podiam e por sempre acreditarem no meu sonho. Agradeço da mesma forma meu eterno avô, Eduardo Ferreira, no qual carrego não apenas o nome, mas sim toda a inspiração para ser um grande homem um dia, assim como ele foi em vida e sempre será; sei que esse sonho também era dele e sei o quanto estaria orgulhoso se estivesse ainda conosco, mas sei também que lá de cima sempre torcerá por mim e por nossa família

Agradeço, a todos os meus amigos e colegas que fiz ao longo de esses anos em minha passagem pela FEG, em especial meus grandes amigos Alberto Albissu e Giovani Takeuchi. As verdadeiras amizades são aquelas que sempre estarão do nosso lado, nos momentos fáceis e difíceis da vida.

Agradeço a FEG por ter me proporcionado um bom estudo para me moldar como profissional de engenharia mecânica e aos bons professores que tive ao longo desses anos. Agradeço a Marcelo Sampaio Martins por ter sido um ótimo professor e amigo em todos os momentos da minha passagem acadêmica, e agradeço também a José Antônio Perrella, que além de ser um ótimo professor e orientador para mim durante esse trabalho, me ensinou muito sobre como devemos levar o trabalho e a vida pessoal de forma leve, sem deixar de ter responsabilidade e foco.

“Não importa o quanto você bate, mas sim o quanto aguenta apanhar e continuar. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha.”

Rocky Balboa

RESUMO

Com o aumento dos preços das principais fontes de combustíveis não renováveis na atual matriz energética tanto mundial quanto brasileira, atrelado aos já conhecidos agravantes ambientais, muitos têm apostado em alternativas para solucionar as questões econômicas e ambientais relacionadas. Assim, uma das várias propostas renováveis que o estudo científico apresenta é a do uso dos biocombustíveis provindos diretamente da biomassa residual. Esses biocombustíveis visam promover a partir do emprego de suas respectivas tecnologias, a idealização de uma agricultura familiar sustentável que possa ajudar na renda de um proprietário rural durante, por exemplo, o horário de pico de consumo de energia elétrica em sua residência. Partindo desta premissa, os biocombustíveis analisados por esse trabalho foram o etanol (biocombustível de origem vegetal utilizado atualmente como fonte de combustível substitutivo à gasolina no Brasil) e o biogás (um biocombustível promissor obtido a partir da digestão anaeróbica de bactérias em resíduos ou dejetos orgânicos em decomposição, sejam estes animais ou vegetais). Para essas considerações, tem-se por objetivo deste trabalho a análise e comparação das equivalências dos consumos específicos dos biocombustíveis e dos custos econômicos relacionados em um motor de combustão interna designado em exemplos de cenários rurais familiares derivados de um cenário base com bovinocultura leiteira. Após a aplicação do método de análise proposto e obtenção dos resultados, observou-se que ambos os biocombustíveis são notáveis nos parâmetros e aspectos analisados e podem contribuir para um melhor equilíbrio econômico de um proprietário rural. O etanol assume um papel de investimento mais seguro, porém permanente, enquanto o biogás é apontado como uma aposta, cujo tempo de retorno é estimável, possibilitando retornos positivos se as suas necessidades forem atendidas.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa. Biocombustíveis. Biogás. Etanol. Motor de Combustão Interna.

ABSTRACT

With the prices increase of the primary sources of non-renewable fuels in the current energy matrix both worldwide and in Brazil, linked to the already known environmental aggravating factors, many people have bet on alternatives to solve the related economic and ecological issues. One of the several renewable proposals that the scientific study presents is the use of biofuels coming directly from residual biomass. These biofuels aim to promote, from the use of their respective technologies, the idealization of sustainable family farming that can help a rural owner's income during, for instance, the peak hours of electricity consumption in his residence. Therefore, based on this premise, the biofuels analyzed in this work will be ethanol (plant-origin biofuel currently used as fuel source to replace gasoline in Brazil) and biogas (a promising biofuel obtained from the anaerobic fermentation of bacteria in decomposing organic waste or litter, whether animal or plant). For these considerations, this work aims to analyze and compare the specific consumptions' equivalences of biofuels and the related economic costs in an internal combustion engine designated in instances of familiar rural scenarios derived from a base scenario with dairy cattle. After applying the proposed analysis method and obtaining the results, it was observed that both biofuels are remarkable in the parameters and aspects analyzed and can contribute to a better economic balance of a rural owner. Ethanol assumes a safer investment role, but the investment is permanent, while biogas is indicated as a term bet, whose return time is estimated, enabling positive returns if its needs are met.

KEYWORDS: Biomass. Biofuels. Biogas. Ethanol. Internal Combustion Engine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de energia elétrica por tipo de biocombustíveis no Brasil de 1990 até 2020.....	16
Figura 2 – Exemplo de fluxo energético.....	20
Figura 3 – Lista de postos em relação aos seus tempos de duração no período de um dia.....	24
Figura 4 – Esquema de obtenção do biogás e do biofertilizante utilizando um biodigestor.....	34
Figura 5 – Biodigestor modelo chinês.....	36
Figura 6 – Biodigestor modelo indiano.....	36
Figura 7 – Esquema de um biodigestor de produção contínua.....	37
Figura 8 – Biodigestor <i>HOMEBIOGAS</i> 2.0.....	38
Figura 9 – Biodigestor <i>HOMEBIOGAS</i> 7.0.....	39
Figura 10 – Possibilidades de utilização do biogás.....	41
Figura 11 – Biodigestor caseiro construído.....	48
Figura 12 – Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna.....	49
Figura 13 – Ciclo de operação de um motor de 4T.....	51
Figura 14 – Equivalência energética do biogás.....	53
Figura 15 – Relação η (%) x C_s (g/kWh) do etanol.....	67
Figura 16 – Custos mensais do etanol.....	68
Figura 17 – Relação η (%) x C_s (g/kWh) do biogás.....	71
Figura 18 – Consumos e custos mensais do biogás.....	71
Figura 19 – Custos fixos com os biodigestores.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese dos preços dos principais combustíveis vendidos nos postos do Brasil....	30
Tabela 2 – Propriedades do etanol anidro e hidratado resumidas.....	31
Tabela 3 – Custos dos dois primeiros trimestres de 2017 de um sistema de criação tradicional de gado leiteiro.....	43
Tabela 4 – Produtividade do biogás.....	44
Tabela 5 – Quantidade mássica necessária para se gerar 1 Nm ³ de biogás.....	44
Tabela 6 – Propriedades do biogás resumidas.....	47
Tabela 7 – Características resumidas dos biodigestores utilizados.....	62
Tabela 8 – Resultados determinados para o primeiro cenário derivado.....	67
Tabela 9 – Resultados determinados para o segundo cenário derivado – Parte 1.....	70
Tabela 10 – Resultados determinados para o segundo cenário derivado – Parte 2.....	73
Tabela 11 – Equivalência do custo do etanol com o melhor biodigestor analisado.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2T	Dois tempos
4T	Quatro tempos
A/C	Ar/Combustível
AGW	Anthropogenic Global Warming
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CFE	Consumo Final de Energia
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CV	Cavalo-Vapor
FA	Fluido Ativo
GL	Graus Alcoólicos em Volume
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
IGP-M	Índice Geral de Preços de Mercado
LED	Light Emitting Diode
MCE	Motor de Combustão Externa
MCI	Motor de Combustão Interna
OTEP	Oferta Total de Energia Primária
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Álcool
PUREFA	Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blaket
USP	Universidade de São Paulo
VA	Volt-Ampere
VC	Volume de Controle

LISTA DE SÍMBOLOS

atm	Atmosfera padrão
°C	Graus Celsius
Ch	Consumo horário
Cm	Consumo mensal
Cs	Consumo específico
g	Grama
h	Hora
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
J	Joule
l	Litro
m	Metro
min	Minuto
Ne	Potência efetiva do motor
R\$	Real
rad	Radiano
s	Segundo
US\$	Dólar americano
W	Watt

Letras gregas

ρ	Massa específica
η	Eficiência de conversão do combustível

Prefixos

k	Quilo
M	Mega
N	Normal

Sobrescrito

*	Alternativo
---	-------------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	MOTIVAÇÃO.....	18
1.2	OBJETIVO.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA.....	20
2.2	PERSPECTIVAS DA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL E NACIONAL.....	20
2.3	FONTES RENOVÁVEIS E A MUDANÇA NA MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL.....	22
2.4	TARIFA BRANCA E HORÁRIO DE PICO.....	23
2.5	AGRICULTURA FAMILIAR.....	24
2.6	ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA O AGRICULTOR FAMILIAR.....	25
2.7	BIOMASSA.....	26
2.8	BIOCOMBUSTÍVEIS.....	27
2.8.1	Etanol.....	29
2.8.1.1	Definição.....	29
2.8.1.2	Variações do etanol.....	29
2.8.1.3	Preço médio do etanol.....	30
2.8.1.4	Propriedades do etanol.....	30
2.8.1.5	Importância do uso do etanol na matriz energética brasileira.....	31
2.8.2	Biogás.....	32
2.8.2.1	Definição.....	32
2.8.2.2	Obtenção do biogás e suas principais tecnologias envolvidas.....	33
2.8.2.3	Biodigestores.....	35
2.8.2.3.1	Definição.....	35
2.8.2.3.2	Tipos mais comuns de biodigestores.....	35
2.8.2.3.3	Funcionamento de um biodigestor com a utilização de excremento bovino como matéria-prima.....	37
2.8.2.3.4	Custos envolvendo um biodigestor.....	38
2.8.2.4	Vantagens do biogás provindo de excremento bovino e do uso de biodigestores no cenário rural brasileiro.....	40
2.8.2.5	Custos envolvendo a produção do biogás provindo de excremento bovino.....	42
2.8.2.6	Equacionamentos e propriedades do biogás provindo de excremento bovino.....	43

2.8.2.7	Exemplo na literatura do uso do biogás provindo de excremento bovino e seus resultados obtidos.....	47
2.9	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	49
2.9.1	Definição.....	49
2.9.2	Diferenças para o motor de combustão externa.....	50
2.9.3	Principais motores de combustão interna.....	50
2.9.4	Motor de combustão interna operando com biogás.....	51
2.9.5	Adaptações e complementos em motores de combustão interna para operar com biogás.....	53
2.9.5.1	Adaptações em motores ciclo Diesel.....	54
2.9.5.2	Adaptações em motores ciclo Otto.....	54
2.9.6	Equacionamento para um MCI ciclo Otto.....	56
2.9.6.1	Potência efetiva do motor.....	56
2.9.6.2	Consumo específico de combustível.....	57
2.9.6.3	Eficiência de conversão do combustível.....	58
3	MATERIAL E MÉTODO.....	59
3.1	MATERIAL.....	59
3.1.1	Cenário base.....	59
3.1.2	Derivações do cenário base.....	60
3.1.2.1	Primeiro cenário derivado.....	60
3.1.2.2	Segundo cenário derivado.....	60
3.2	MÉTODO.....	62
3.2.1	Parâmetros de análise.....	62
3.2.2	Considerações.....	63
3.2.3	Abordagem de trabalho e apresentação dos resultados.....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1	PRIMEIRO CENÁRIO DERIVADO.....	66
4.2	SEGUNDO CENÁRIO DERIVADO.....	69
4.2.1	Análise do biogás.....	69
4.2.2	Análise dos biodigestores.....	72
5	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A evolução econômica e tecnológica da sociedade está diretamente relacionada ao aumento da demanda de energia (SANTOS; RODRIGUES; CAMIELLO, 2021). A energia é fundamental para a humanidade, estando presente nela por diferentes meios, como por exemplo, pelo meio do próprio potencial humano inato do movimento para realizar uma ação específica, ou pelo meio do uso de uma máquina, cuja energia necessária para seu funcionamento é fornecida a partir de alguma forma de combustível.

Para entender a relação entre o uso de energia com as necessidades da humanidade, Santos, Rodrigues e Camiello (2021) destacam duas classificações principais para origem das formas de energia utilizadas em uma matriz energética: as provindas de combustíveis não renováveis e as provindas de combustíveis renováveis, sendo que a energia mais utilizada atualmente é a oriunda de meios fósseis (um dos principais tipos de fontes não renováveis), fato ligado tanto com fatores históricos quanto econômicos da sociedade.

De acordo com Santos, Rodrigues e Camiello (2021) e as informações do Instituto Acende Brasil (2021), o uso de fontes não renováveis (principalmente as fósseis) proporciona uma série de problemas de gestão ambiental com impactos em sustentabilidade, como por exemplo, os danos causados pela emissão de níveis elevados de carbono na atmosfera. O Instituto Acende Brasil (2021) ainda aborda a questão da provável escassez desses recursos no futuro devido à não renovabilidade desse tipo de fonte, assim influenciando a economia e a geração de energia elétrica na matriz energética tanto mundial quando brasileira.

Mirando as próximas décadas, percebe-se que será necessário alterar fundamentalmente a forma de planejar a expansão do sistema elétrico (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2021). Nos últimos anos, novas fontes e tecnologias têm surgido e sido implementadas com sucesso no país, o que torna menos previsível como a configuração do parque gerador evoluirá nos próximos anos (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2021).

Santos, Rodrigues e Camiello (2021) consideraram, ao comparar a oferta e destinação de energia da matriz energética brasileira com a mundial, que o Brasil possui potencial favorável a implementação de energias renováveis em seu território. A justificativa baseou-se na análise dos dados de consumo levantados pela Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* em inglês, IEA) para o cenário brasileiro e mundial entre os anos de 1990 e 2017, além do favorável histórico brasileiro com o uso de fontes renováveis, tais como as usinas hidrelétricas. No passado, o planejamento energético era pautado

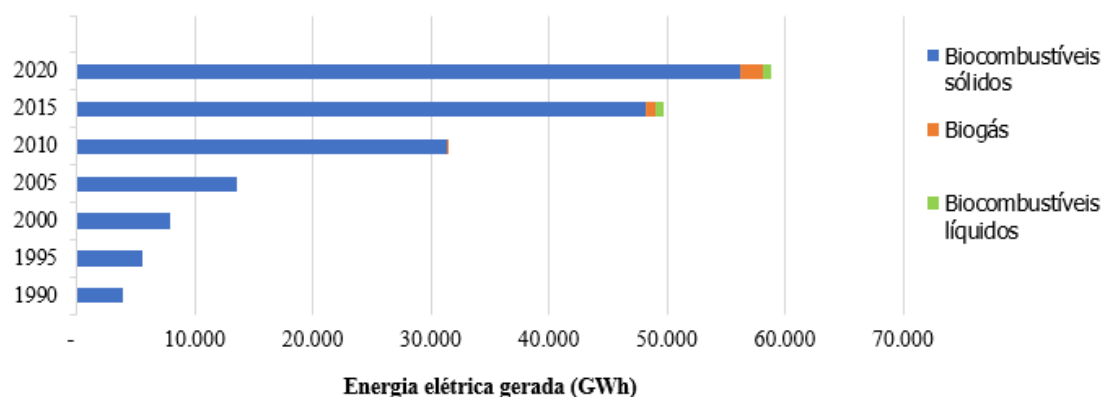
principalmente pelos inventários hidrelétricos porque a fonte hidrelétrica era a mais econômica, versátil e abundante no país, o que a posicionava como a fonte dominante (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2021).

Atualmente a maioria dos países estão promovendo ações para que as energias alternativas renováveis tenham participação significativa em suas matrizes energéticas (FERNANDES et al., 2011). A biomassa possui um enorme potencial para contribuir com o fornecimento total de energia nas próximas décadas (FERNANDES et al., 2011). Leite e Cortez (2008) ainda destacam que o papel adequado da biomassa e dos biocombustíveis designados como energéticos limpos também será de substituir as fontes não renováveis (principalmente os derivados do petróleo) no futuro.

Fernandes et al. (2011) consideram que a médio e longo prazo a exaustão das fontes não renováveis e as pressões ambientais poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa, gerando assim mais estudos e investimentos na área mundialmente. Para Fernandes et al. (2011), espera-se que o espaço dos biocombustíveis em uma matriz energética aumente com a queda do uso das fontes não renováveis e isto só será possível através de uma política clara de comercialização da biomassa.

No Brasil, de acordo com o levantamento de dados feito pela International Energy Agency (2022) de 1990 até 2020, nota-se um uso mínimo em biocombustíveis líquidos e gasosos para geração exclusiva de energia elétrica, sendo que tal designação de uso fica quase exclusivo para os biocombustíveis sólidos, como observado na Figura 1.

Figura 1 – Geração de energia elétrica por tipo de biocombustíveis no Brasil de 1990 até 2020



Fonte: Adaptado de International Energy Agency (2022)

No país tem crescido continuamente a implantação de sistemas de geração de energia elétrica na área rural, especialmente com resíduos da suinocultura e bovinocultura (SOUZA,

2016). Santos e Cândido (2013) adentram o tema abordando a questão dos agricultores familiares brasileiros, sendo que essa classe social representa 77% (cerca de 10 milhões de pessoas) do cenário agrícola nacional; desse total, 67% ocupavam o cenário agropecuário, de acordo com Brasil (2019). Para Santos e Cândido (2013), novos meios alternativos de produção e uso de fontes energéticas para uma economia viável e sustentável precisam ser introduzidos no meio rural. Dessa forma, a aposta dos autores para essa classe em específico seria também na biomassa e nos biocombustíveis como um meio para equilibrar a balança econômica e melhorar a renda dos agricultores e agropecuaristas familiares.

Complementando a questão do equilíbrio da balança econômica do agropecuarista familiar abordado por Santos e Cândido (2013), tem-se o uso da tarifa branca. Brasil (2022a) explica que essa é uma tarifa de adesão voluntária para conscientizar o uso de energia elétrica. A tarifa branca, segundo Brasil (2022a), foi proposta originalmente como forma de reduzir o número de usuários durante o horário de pico, uma vez que dentro desse horário (aproximadamente 3h ao dia nos dias úteis da semana) os valores da tarifa são muito maiores que o convencional, porém fora desse horário os valores são ligeiramente menores que o convencional.

Como abordado por Fernandes et al. (2011), a biomassa possui um grande potencial para uso energético nas próximas décadas. De maneira análoga, Leal (2005) destaca que das várias formas de biomassas presentes muitos biocombustíveis podem ser gerados e utilizados como meios alternativos de geração de energia. Dessa maneira, com as observações feitas por Fernandes et al. (2011) e Leal (2005) em adição ao tema abordado por Santos e Cândido (2013) e complementado por Brasil (2022a), serão apresentados os seguintes biocombustíveis a ser trabalhados nesse trabalho: o etanol e o biogás.

Guarieiro; Torres e Andrade (2011) definem o etanol como um biocombustível líquido que pode ser obtido a partir de vegetais ricos em carboidratos e em amidos ou da celulose. Leite e Cortez (2008) inteiram que o etanol desempenha um papel muito importante na matriz energética brasileira, sendo atualmente o principal biocombustível líquido utilizado e uma boa opção substitutiva a gasolina nos postos do país.

Segundo Leite e Cortez (2008), o etanol tem sido utilizado há anos no país, principalmente no setor automotivo, devido a vários fatores que facilitam o cultivo da cana-de-açúcar (principal biomassa utilizada como matéria-prima para esse biocombustível no Brasil) em solo nacional, além de fatores históricos e econômicos ligados ao biocombustível.

Em paralelo, conforme citam Baldinelli, Barelli e Bidini (2017), o biogás é um dos principais subprodutos obtidos a partir da digestão anaeróbica de resíduos ou dejetos orgânicos (biomassa) em decomposição. Fernandes et al. (2011) explicam que o biogás pode ser extraído tanto de meios vegetais quanto animais e o seu uso vem crescendo mundialmente devido aos novos conceitos ambientalistas e de sustentabilidade, além do uso e tratamento correto de resíduos orgânicos (antes tratados como dejetos).

Segundo Gaspar (2003), o biogás pode ser obtido por meio do uso dos biodigestores, sendo que essa tecnologia pode ser construída pelo próprio usuário ou adquirida comercialmente. Gaspar (2003) revela que os biodigestores modelos chinês e indiano são os mais comuns utilizados no país e ambos podem ser comprados ou construídos em casa.

Para a escolha da máquina térmica que irá operar com os biocombustíveis destacados no trabalho, Leite e Cortez (2008) explicam que o etanol é muito utilizado em motores de combustão interna (MCI) no Brasil e Souza (2016) complementa que os MCIs também são os mais adequados e utilizados para se trabalhar com o biogás. Assim, essa seria a melhor máquina para se utilizar, sendo que, de acordo com Brunetti (2018), um MCI é uma máquina térmica capaz de transformar o calor obtido pela combustão em trabalho (energia) mecânico. Em adição, Salomon (2007) explica que para a conversão de energia mecânica em elétrica necessita-se de um alternador (gerador elétrico) acoplado no MCI.

Por fim, para complementar a relação do biogás com o MCI, Salomon (2007) também explica que hoje já existem MCIs próprios para uso com biogás no mercado. Para acrescentar, Coelho et al. (2006) inteiram que esses equipamentos operando com outras formas de combustíveis também podem ser facilmente adaptados para uso com biogás.

1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação desse trabalho é apresentar uma forma de equilibrar a balança econômica dos agropecuaristas familiares brasileiros adeptos da tarifa branca da ANEEL a partir da implementação e uso da biomassa e dos biocombustíveis com suas respectivas tecnologias atreladas como forma de geração de energia. A partir dessa motivação tem-se o estudo comparativo baseado nos dois biocombustíveis distintos apresentados em derivações de um cenário base rural familiar que possui atividades ligadas a bovinocultura leiteira e agricultura de subsistência.

O etanol (adquirido comercialmente) e o biogás (oriundo da proposta de instalação e uso de um ou mais biodigestores com excremento bovino como matéria-prima) abastecerão

um motor de combustão interna e serão comparados pela equivalência de seus consumos específicos calculados a partir de uma potência específica constante do motor utilizado e um intervalo de variações de eficiências de conversão dos combustíveis pré-estabelecidos, além dos custos econômicos equivalentes envolvidos com os biocombustíveis. Por fim, vale ressaltar que o trabalho será desenvolvido com o auxílio do software licenciado *Microsoft Excel* para cálculos e análises.

1.2 OBJETIVO

O trabalho tem por objetivo, utilizando exemplos de cenários rurais familiares com bovinocultura leiteira, analisar e comparar os consumos (horários e específicos) e custos propostos a partir dos parâmetros de análise do etanol e do biogás em um motor de combustão interna.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

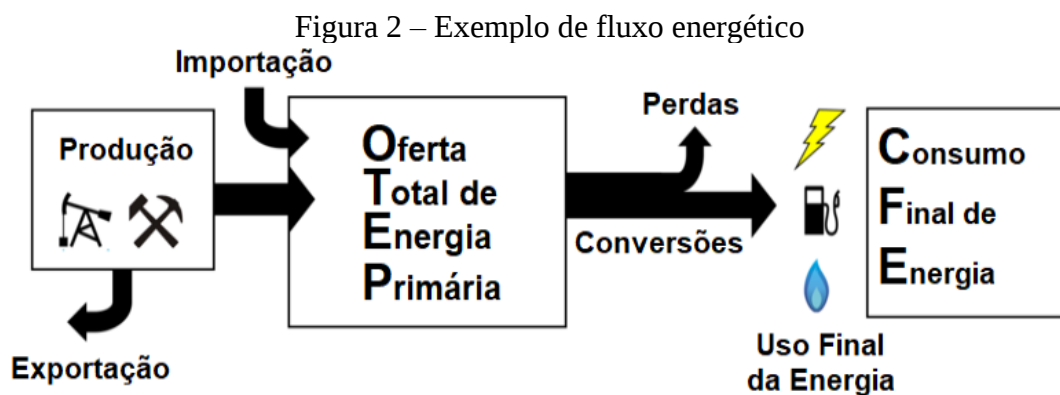
2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA

Santos, Rodrigues e Camiello (2021) discorrem sobre as atuais fontes de energia utilizadas pela humanidade. Segundo os autores, as provindas de combustíveis fósseis, minerais ou nucleares são classificadas como fontes de energia não renováveis por serem encontradas na natureza em quantidades limitadas; enquanto as renováveis como a energia solar, a eólica ou as provindas por biocombustíveis possuem ciclos com renovabilidade de matéria-prima.

De acordo com Santos, Rodrigues e Camiello (2021), as fontes não renováveis estão bem consolidadas no cenário global histórico, ao passo que as fontes renováveis estão conquistando notável presença no cenário global atual.

2.2 PERSPECTIVAS DA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL E NACIONAL

Santos, Rodrigues e Camiello (2021) explicam que uma matriz energética [ou elétrica, como designa o Instituto Acende Brasil (2021) devido ao fato de citar apenas as fontes de geração de energia elétrica] é uma representação quantitativa dos recursos energéticos disponíveis de uma região. Santos, Rodrigues e Camiello (2021) relatam também a questão da oferta total de energia primária (OTEP) e do consumo final de energia (CFE) de um fluxo energético, sendo esses demonstrados na Figura 2.



Fonte: Santos, Rodrigues e Camiello (2021)

Com os dados da matriz energética mundial coletados pela Agência Internacional de Energia que considera o uso geral da energia para os mais diversos setores (incluindo residencial e de transportes); Santos, Rodrigues e Camiello (2021) evidenciaram que a OTEP mundial no período de 1990 até 2017 para os combustíveis fósseis (predominantemente petróleo, gás natural e carvão mineral) mais a energia nuclear foi superior as das demais fontes analisadas. Dos dados analisados pelos autores, em 1990 o percentual foi de 87,2% e em 2017 foi de 86,1%. A sutil redução de 1,1% de 1990 até 2017, segundo os autores, indica o crescimento das fontes renováveis no cenário global, pois elas vêm gradativamente ao longo dos anos ganhando espaço na matriz energética mundial.

No cenário brasileiro para a OTEP para uso geral da energia, de acordo com Santos, Rodrigues e Camiello (2021), com os dados da IEA de 2020, há uma presença mais significativa das fontes renováveis (presencialmente de geração hidráulica, de biocombustíveis, solar e eólica) na matriz energética nacional de 1990 até 2017 do que a matriz energética mundial, totalizando 47,6% em 1990 e 42,8% em 2017. A matriz energética brasileira para as fontes renováveis é mais de três vezes maior do que a mundial no mesmo período analisado. Entretanto, ao contrário da matriz mundial, na brasileira as fontes renováveis tiveram uma queda, segundo os autores, devido à ascensão do petróleo e do gás natural nesse mesmo período no Brasil.

Referindo-se agora ao CFE mundial, segundo Santos, Rodrigues e Camiello (2021), percebe-se que no ano de 2017 os setores industrial, de transportes e residencial despontam como maiores consumidores de energia. Esses três setores são os que mais têm impacto econômico a nível mundial na sociedade globalizada e totalizam uma participação de 79,1% para o ano de 2017 (SANTOS; RODRIGUES; CAMIELLO, 2021). As porcentagens correspondentes seriam 29% para o setor industrial, 28,9% para o setor de transportes e 21,2% para o setor residencial no que diz respeito ao CFE mundial de 2017.

Com relação ao nível nacional, segundo Santos, Rodrigues e Camiello (2021), percebe-se que no ano de 2017, as três maiores posições ainda estariam ocupadas pelos mesmo setores do CFE mundial. Logo, há semelhança no que diz respeito ao CFE das matrizes energéticas mundial e nacional, porém transportes assume a ponta em relação ao setor industrial, enquanto o residencial é evidentemente bem menor que os dois primeiros. As porcentagens correspondentes seriam 37,2% para o setor de transportes, 34,2% para o setor industrial e 11% para o setor residencial no que diz respeito ao CFE nacional de 2017.

2.3 FONTES RENOVÁVEIS E A MUDANÇA NA MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL

De acordo com Brasil (2020), as fontes renováveis alcançaram uma demanda de 46,1% de participação na matriz energética do país nos mais diversos setores de uso; um aumento de 0,6 ponto percentual em relação ao indicador de 2018, segundo dados do Ministério de Minas e Energia do ano de 2020. As fontes de energia renováveis incluem a hidráulica, a eólica, a solar e a bioenergia (BRASIL, 2020). O indicador brasileiro representa três vezes o valor do indicador mundial (BRASIL, 2020), sendo consistente com o que foi evidenciado por Santos, Rodrigues e Camiello (2021).

Um tema em específico, quando se fala da matriz energética e das fontes de combustíveis atuais, é a obtenção de novos meios de fontes de energia sustentáveis e eficientes para contornar os principais problemas causados pela atual percentagem da distribuição dos meios não renováveis da matriz energética global. Cook et al. (2013) e Cook et al. (2016) demonstraram com o levantamento dos dados para os casos de aquecimento global antropogênico ou anthropogenic global warming (AGW) que a emissão de gases do efeito estufa resultantes de atividades humanas é a principal causa da tendência de aquecimento do clima observada ao longo do último século.

Para Cook et al. (2013) e Cook et al. (2016), cuja referência usada foi um acervo vasto de revistas científicas publicadas ao longo dos anos de 1991 até 2011, as principais fontes causadoras do efeito estufa envolvem as atividades humanas com o uso e a queima de combustíveis fósseis.

Santos e Cândido (2013) relatam, que no início da década de 1970 após constatada a crise ambiental e social que o planeta vivenciava, que o planeta não conseguiria absorver todos os rejeitos (como os gases poluentes resultantes dos processos de combustão) provindos das atividades humanas, em especial das industriais. Assim, visto que o planeta é um sistema fechado, limitado e esgotável, não pode sustentar indefinidamente o crescimento da sociedade humana consumindo bens e serviços infinitamente (SANTOS; CÂNDIDO, 2013).

De acordo com Sae Brasil (2022), a multinacional do setor de energia *British Petroleum* previu no ano de 2020 que até 2050 o petróleo será substituído por fontes renováveis de energia; atrelado a isso, estudos apontam que as fontes de energia fósseis vão sofrer um declínio nos próximos 30 anos, sendo um dos motivos o aumento de 20 a 60% do uso de fontes renováveis. A convicção crescente de que anomalias climáticas deverão aumentar em intensidade e em frequência exercerá pressões incontornáveis para a

substituição de combustíveis fósseis por renováveis (LEITE; CORTEZ, 2008). Ademais, destaca-se que as fontes de energia fósseis são finitas, enquanto as renováveis, como o próprio nome propõe, podem renovar seus prazos se manejadas corretamente.

2.4 TARIFA BRANCA E HORÁRIO DE PICO

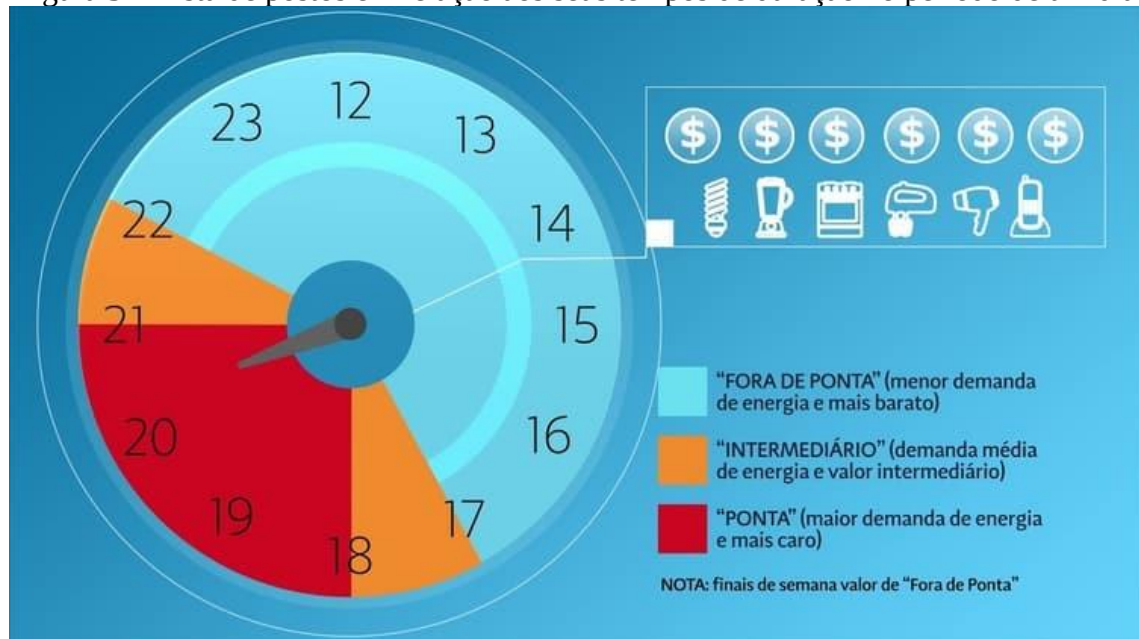
De acordo com Brasil (2022a), a tarifa branca (criada em janeiro 2018) é uma opção tarifária para as unidades consumidoras atendidas em baixa tensão (de 127, 220, 380 ou 440 V), também catalogados pela ANEEL como grupo B. Nesse grupo, há três subgrupos (B1, B2 e B3), sendo respectivamente: B1 para residências, B2 para propriedades rurais e B3 para indústrias, comércios, serviços públicos, consumo próprio, dentre outros.

Diversamente da modalidade de tarifa convencional, que possui um único valor, a tarifa branca possui valores diferentes ao longo do dia (BRASIL, 2022a). Segundo Brasil (2022a), a adesão da tarifa branca é uma opção voluntária e conscientizadora para os consumidores; não é cobrada nos finais de semana e durante os dias úteis possui três postos (horários) diferentes, sendo eles: ponta ou pico (tarifa mais elevada), intermediário (tarifa de valor intermediário) e fora de ponta (tarifa de valor menor).

Para Generac Brasil (2022), a tarifa branca é uma ideia de conscientização e economia no consumo de energia elétrica lançada pela ANEEL, a fim de reduzir o número de usuários durante o horário de pico. De acordo com Generac Brasil (2022) e Brasil (2022b), fora de pico, os usuários são beneficiados com valores mais baixos na cobrança da tarifa branca, sendo que esse valor seria relativamente menor do que o valor da tarifa convencional para o mesmo horário.

Generac Brasil (2022) explica que o horário de pico (ou horário de ponta) listado, por exemplo, na tarifa branca é o momento do dia em que acontece o maior consumo de energia elétrica pela população do país. De acordo com Generac Brasil (2022), o horário de pico geralmente ocorre entre 18h e 21h (aproximadamente 3h de duração) variando de estado para estado no Brasil quanto ao início e término do pico. Na Figura 3, pode-se observar a lista de postos em relação ao tempo que cada um possui em um dia útil da semana.

Figura 3 – Lista de postos em relação aos seus tempos de duração no período de um dia



Fonte: Generac Brasil (2022)

2.5 AGRICULTURA FAMILIAR

Do apresentado anteriormente pelo Instituto Acende Brasil (2021), nota-se que as questões que envolvem a emissão de gases poluentes e a atual reserva dos combustíveis fósseis vêm sendo alvo de estudos e abordam como isso afetará a necessidade da energia elétrica nos mais diferentes cenários e classes da sociedade. Dessa forma, uma classe afetada em específico é a do agricultor familiar que, de acordo com Brasil (2019), no país representa 77% (cerca de 10 milhões de pessoas) do cenário agrícola, sendo que desse total, 67% ocupavam o cenário agropecuário, segundo dados do IBGE de 2017 retirados da página oficial do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

O agricultor e o agropecuarista familiar no Brasil, em sua grande maioria, não possuem assistência técnica correta e enfrentam dificuldades para equilibrar a balança econômica e energética em seus meios de subsistência. Observa-se que a agropecuária familiar é a principal responsável pela produção dos alimentos que são disponibilizados para o consumo da população brasileira nos mais diferentes setores (BRASIL, 2019). Ela é constituída de pequenos produtores rurais, povos e comunidades tradicionais, assentados da reforma agrária, silvicultores, aquicultores, extrativistas e pescadores (BRASIL, 2019).

A agricultura alimenta o mundo, mas depende de recursos naturais vitais para produzir grandes quantidades a fim de satisfazer a demanda (SANTOS; CÂNDIDO, 2013). Santos e Cândido (2013) esclarecem que por mais que a agropecuária seja fundamental, ela

depende de muitos recursos que atendam toda a sociedade e preservem os agroecossistemas existentes, uma vez que a sociedade está em constante crescimento e está em constante avanço sobre *habitats* de regiões florestais. Os autores reforçam a necessidade da importância de se trabalhar com meios sustentáveis na agropecuária para manter um equilíbrio tanto econômico quanto ambiental visto que a agropecuária no geral exerce muita influência no meio ambiente ao redor.

2.6 ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA O AGRICULTOR FAMILIAR

Cabe destacar que a sociedade, como um todo, está continuamente em processo de modernização, exigindo cada vez mais abundância e diversificação das fontes de energia para suprir suas necessidades (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2021). O setor energético mundial está passando por profundas mudanças que alterarão estruturalmente o suprimento de energia elétrica nas próximas décadas (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2021). Complementa-se que para o Instituto acende Brasil (2021), toda forma de mudança que ocorrerá na matriz elétrica exigirá uma reformulação do planejamento e da coordenação do suprimento de energia elétrica.

Da pesquisa realizada por Santos, Rodrigues e Camiello (2021), percebe-se que a matriz energética brasileira no ano de 2017 apresentou 30% de presença de biocombustíveis provindos do meio rural. Ou seja, dos 42,8% das fontes renováveis presentes na matriz energética brasileira daquele ano, aproximadamente 70,1% correspondiam apenas a energia provinda dos biocombustíveis. Tendo em segundo lugar, a energia provinda dos meios hidráulicos, correspondendo a 11,2% da matriz energética brasileira total.

Uma das características mais relevantes das fontes renováveis é que sua produção é determinada pela disponibilidade do recurso energético, razão pela qual tais recursos são referidos como fontes não controláveis (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2021). De acordo com o Instituto Acende Brasil (2021), como a maioria das fontes renováveis são obtidas a partir da dependência de outros fatores, sendo que alguns desses fatores estão além da capacidade humana de poder intervir, essas fontes são ditas como não controláveis, pois possuem variações de produção ao longo do ano devido ao não controle dos fatores que as envolvem. Tem-se, por exemplo, a época das chuvas ao desenvolvimento das plantações, as cheias dos reservatórios às hidrelétricas ou as variações das incidências solares ao longo do dia aos painéis fotovoltaicos.

Santos e Cândido (2013) complementam suas observações realçando a necessidade de um novo modelo agrícola, pois para eles, os agricultores precisam ter conhecimento da responsabilidade que eles têm no cenário atual entre economia e sustentabilidade ambiental. Para Santos e Cândido (2013), os princípios agronômicos, ecológicos e socioeconômicos precisam de uma melhor compreensão e avaliação à introdução de novas tecnologias e avanços sociais sobre os sistemas agrícolas atuais. Nesse ponto, para os autores, as três dimensões de sustentabilidade são um sistema agrícola economicamente viável, socialmente justo e ecologicamente sustentável (SANTOS; CÂNDIDO, 2013).

Inclui-se também nas observações de Santos e Cândido (2013) que para um conhecimento significativo dos agropecuaristas familiares, novos meios alternativos de produção e uso de fontes energéticas para uma economia viável e sustentável precisam ser introduzidos no meio rural. Santos e Cândido (2013) ressaltam também que para isso é necessário um respaldo técnico por parte de incentivos ao agricultor ou agropecuarista familiar, que hoje no Brasil carecem de informativos à meios alternativos, que muitas vezes possuem em suas próprias propriedades, e que podem ajudar a equilibrar suas contas e melhorar a renda. Uma das apostas dos possíveis meios alternativos informados pelos autores é o uso da biomassa e dos biocombustíveis para geração de energia sustentável.

2.7 BIOMASSA

De acordo com Leal (2005), a biomassa é um dos biocombustíveis mais antigos usados pela humanidade. Leal (2005) destaca que o ser humano, ao longo dos anos, vem se aproveitando dos benefícios da biomassa de diversas formas, por exemplo, para se aquecer na queima da lenha ou carvão vegetal como combustíveis de uma fogueira ou utilizar como combustível em algumas minicentrals termoeletricas sustentáveis.

Fernandes et al. (2011) complementam que o histórico de uso da biomassa pela sociedade só começou a perder relevância há pouco mais de 100 anos atrás para a energia provinda da queima do carvão mineral, e depois, com o crescimento do petróleo e do gás natural (todos combustíveis não renováveis). Logo, a utilização atual da biomassa foi limitada praticamente às residências particulares em regiões agrícolas e às regiões mais carentes economicamente.

No geral, a biomassa é qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica (FERNANDES et al., 2011) e pode ser definida, segundo Leal (2005), como um artifício da natureza, sendo que na sua forma vegetal, ela

armazena energia solar por meio da fotossíntese das plantas. Leal (2005) ainda explica que na forma vegetal, as plantas, a partir do processo de fotossíntese, combinam o dióxido de carbono (recolhido da atmosfera) com a água (recolhida principalmente do solo) para produzir variados tipos de carboidratos que constituem os tecidos vegetais e têm um razoável valor energético, ao contrário de seus formadores, CO₂ e H₂O.

Frigo et al. (2015), Fernandes et al. (2011) e Fearnside (2001) complementam que a biomassa na sua forma animal está presente tanto nos organismos destes seres quanto nos seus resíduos e dejetos, uma vez que ela está incluída no ciclo do carbono, além de estar envolvida com os processos biológicos de respiração, fermentação (biodigestão) e decomposição. Fernandes et al. (2011) ressaltam que a energia da biomassa é obtida durante a transformação de produtos de origem animal e vegetal para a produção de energia térmica e/ou elétrica. Leal (2005) reafirma que a biomassa energética se apresenta na natureza de várias formas, podendo ser de origem vegetal ou animal.

Segundo Leal (2005), a biomassa se divide em dois grandes grupos atualmente, segundo pesquisadores da área: a biomassa tradicional (essencialmente lenha, carvão vegetal, resíduo orgânico e outros resíduos naturais) e a biomassa moderna (sendo produzida com tecnologias adequadas e controlada pelo ser humano, como florestas plantadas, atividades agrícolas e atividades pecuárias). Em nível mundial, essa forma de energia participa com cerca de 11% na matriz de energia primária, mas, quando se faz a separação acima, a biomassa moderna representa apenas 2% dessa matriz energética (LEAL, 2005).

2.8 BIOCOMBUSTÍVEIS

Leal (2005) explica que a biomassa pode ser usada tanto como um biocombustível principal quanto para originar novos biocombustíveis. O autor destaca que das várias formas de biomassas presentes podem-se gerar diferentes formas de biocombustíveis com diferentes potenciais energéticos, sendo que esses podem ser descritos como combustíveis de origem orgânica e renováveis que são capazes de produzir uma energia mais sustentável e com baixo custo em relação aos combustíveis não renováveis, além de razoável eficiência energética.

Leite e Cortez (2008) destacam que os únicos energéticos limpos capazes de substituir adequadamente os derivados do petróleo são aqueles obtidos a partir da biomassa. Os autores explicam que o principal motivo está no fato que a biomassa seca contém cerca

de metade da quantidade de energia contida na mesma massa de petróleo. Leite e Cortez (2008) complementam que esse fato é relevante, uma vez que a biomassa é renovável, podendo ficar em maior quantidade física e consequentemente alcançando maiores quantidades de energia para se aproveitar.

Fernandes et al. (2011) inteiram que há diferentes tecnologias no processamento e transformação da biomassa em energia, porém todas as tecnologias de biomassa atualmente usadas no mundo possuem dois problemas cruciais: o custo da biomassa e a eficiência energética de sua cadeia produtiva. Conforme citam os autores, se o perfil de usos da energia for reduzido às opções de aproveitamento térmico, cogeração ou geração de energia elétrica, verifica-se que há necessidade de algum processo de tratamento complementar da biomassa para seu aproveitamento energético correto.

De acordo com Fernandes et al. (2011), quando a biomassa é refinada e torna-se um novo biocombustível, a partir de um processo ou tecnologia específica, a energia solar armazenada a curto prazo sob a forma de carbono do processo fotossintético pode ser posteriormente transformada em calor, eletricidade ou outras formas de energia, dependendo das tecnologias empregadas. Conforme explicam Fernandes et al. (2011), somente a biomassa utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica (em comparação com as demais fontes para energias renováveis) possui a flexibilidade para suprir a produção de energia elétrica e o setor de transporte em grande proporção e ao mesmo tempo.

Segundo o Instituto Acende Brasil (2021) e Frigo et al. (2015), no Brasil, a biomassa é um recurso abundante devido as dimensões continentais que possui. Assim, no solo brasileiro, podem-se cultivar variados tipos de biomassa moderna em pequenas, médias e grandes safras, além de se aproveitar os resíduos orgânicos gerados pelas ativas pecuárias (suinocultura, bovinocultura e avicultura) que se estendem de norte a sul no país. Entretanto, o potencial energético da biomassa num contexto geral ainda é pouco explorado no país, sendo que o principal, e quase único, biocombustível explorado é do seguimento sucroalcooleiro, ou em outras palavras, o etanol provindo da cana-de-açúcar ou do milho que hoje é o principal concorrente da gasolina (um combustível de origem fóssil) no Brasil.

2.8.1 Etanol

2.8.1.1 Definição

O etanol é um combustível líquido que pode ser obtido a partir de vegetais ricos em carboidratos (como cana-de-açúcar, beterraba e frutas) e em amido (como arroz, mandioca e milho), ou da celulose (extraída principalmente de eucaliptos) (GUARIEIRO; TORRES; ANDRADE, 2011). Leite e Cortez (2008) explicam que quando o etanol (ou álcool etílico) é obtido dessa forma biológica e natural, ele também é conhecido como bioetanol e é dito como sendo um biocombustível.

De acordo com Leite e Cortez (2008), o processo para se obter o etanol é natural e ocorre por meio da fermentação a partir da ação de microrganismos bacterianos, conhecidos como fermentos. Segundo Leite e Cortez (2008), atualmente, em processos comerciais, o etanol é produzido da cana-de-açúcar, do milho, da beterraba e do sorgo e, experimentalmente, de muitas outras frutas, tubérculos, cernes etc. Após a fermentação, o álcool é obtido com uma concentração de 10 a 14%, sendo necessária uma destilação fracionada (LEITE; CORTEZ, 2008).

2.8.1.2 Variações do etanol

Pau (2003) lista duas formas variadas que o etanol possui: o etanol anidro (isento de água) e o hidratado. Segundo Pau (2003), o etanol anidro é dito puro e apresenta teor alcoólico superior a 99,6 GL (graus alcoólicos em volume), enquanto o hidratado apresenta água em sua composição, possuindo um teor alcoólico inferior a 99,6 GL.

Segundo Pau (2003), o etanol anidro é comercialmente mais caro de se produzir, pois requer maior investimento nas colunas de destilação das refinarias e por isso é produzido em escalar menor que o etanol hidratado, sendo geralmente misturado à gasolina, substituindo os aditivos antidetonantes. Pau (2003) complementa que o etanol hidratado é o mais comum de ser vendido comercialmente nos postos de combustíveis brasileiros como um combustível acabado, sendo preferencialmente utilizado nos motores de combustão interna.

2.8.1.3 Preço médio do etanol

Na Tabela 1 apresenta-se o levantamento fornecido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) do preço médio do etanol hidratado comercial comparado com os principais combustíveis vendidos nos postos de combustível do país no período de maio de 2022. Segundo Brasil (2022c), nota-se que o preço médio do etanol hidratado em maio de 2022 foi de aproximadamente R\$5,30 por litro.

Tabela 1 – Síntese dos preços dos principais combustíveis vendidos nos postos do Brasil
SÍNTESE DOS PREÇOS PRATICADOS NO BRASIL – MAIO / 2022

Produto	Unid.	Nº de postos Pesquisados	Preço ao consumidor (R\$)			
			Preço médio	Desvio Padrão	Preço mínimo	Preço máximo
GLP	R\$/13kg	18.129	112,86	10,17	84,99	160,00
GNV	R\$/m ³	1.740	5,24	0,63	3,18	7,43
Gasolina comum	R\$/l	24.261	7,28	0,47	6,18	8,99
Gasolina aditivada	R\$/l	18.289	7,39	0,42	6,29	8,99
Óleo diesel	R\$/l	11.187	6,84	0,38	5,49	8,69
Óleo diesel S10	R\$/l	20.206	6,97	0,36	5,38	8,49
Etanol hidratado	R\$/l	21.399	5,30	0,66	4,17	7,90

Fonte: Adaptado de Brasil (2022c)

Ainda, de acordo com Brasil (2022c), percebe-se que a média do preço do etanol varia a cada mês no país. Logo, em uma pesquisa mais aprofundada, segundo Brasil (2022c), percebe-se que em maio de 2021 o preço médio do litro de etanol hidratado estava em R\$ 4,25 e em janeiro de 2022 estava em R\$ 5,04. Dessa forma, o valor aproximado de R\$ 5,30 não deve ser considerado como um valor absoluto, servindo apenas de exemplo para a noção do preço do combustível e para ajustes dos limites inferior e superior da escala de preços que será adotada posteriormente na obtenção dos resultados desse trabalho.

2.8.1.4 Propriedades do etanol

Moreira e Pau (1998 apud PAU, 2003)¹ apresentam na Tabela 2 algumas propriedades físico-químicas de amostras de ambas as substâncias de etanol abordadas em condições ambiente. Boundy et al. (2011) relatam que a massa específica e o poder calorífico inferior (PCI) do etanol anidro são respectivamente 789,35 kg/m³ e 26,952 MJ/kg

a 25°C. Nota-se que tais valores são próximos aos apresentados por Moreira e Pau (1998 apud PAU, 2003)¹ a 20°C.

Tabela 2 – Propriedades do etanol anidro e hidratado resumidas		
Propriedades (a 20°C)	Etanol anidro	Etanol hidratado
Fórmula química aproximada	C ₂ H ₅ OH	C ₂ H ₅ OH + 0,19H ₂ O
Massa específica (kg/m ³)	790	810
Razão A/C estequiométrica	9/1	8,3/1
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	27,085	24,722
Índice de octano	106	110
GL	99,5	95

Fonte: Adaptado de Moreira e Pau (1998 apud PAU, 2003)¹

2.8.1.5 Importância do uso do etanol na matriz energética brasileira

Santos, Rodrigues e Camiello (2021) ressaltam que o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar é o biocombustível líquido mais utilizado na matriz energética brasileira atualmente. Leite e Cortez (2008) explicam esse motivo apresentando duas razões principais: produtividade e balanço energético.

A quantidade de biomassa produzida por unidade de área é, para a cana-de-açúcar, significativamente superior do que para qualquer outro vegetal, seja ele cultivado ou não como biomassa energética (LEITE; CORTEZ, 2008). A razão entre a energia obtida e a energia total utilizada para produzi-la é muito maior para o álcool de cana do que para qualquer outro biocombustível (LEITE; CORTEZ, 2008).

Leite e Cortez (2008) também apresentam alguns fatores a respeito do uso maior do etanol no Brasil comparado a qualquer outro biocombustível. Para os autores, os fatores mais importantes para a introdução do etanol no Brasil no início do século XX foram a

¹ MOREIRA, S. A.; PAU, F. S. Análisis del funcionamiento de Motores de Combustión Interna utilizando alcohol como combustible. In: II Encontro de Engenharia de Materiais, La Habana, Cuba. ISPJAE, 1998 apud PAU, F. S. **Análise experimental dos fenômenos da combustão e da emissão de gases em motores a combustão interna utilizando misturas de etanol e gasolina como combustível**. 2003. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

necessidade de amenizar as sucessivas crises do setor açucareiro que o país enfrentava e a tentativa de reduzir a dependência do petróleo importado.

Leite e Cortez (2008) ainda afirmam que o crescimento do uso do etanol na matriz energética brasileira ocorreu em 1975 com o lançamento do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) pelo governo brasileiro, cujo objetivo maior era a redução da dependência do petróleo importado e a popularização do biocombustível nos postos de combustíveis com um preço mais acessível do que a gasolina.

No início do século XXI, o Brasil possuía um setor sucroalcooleiro muito forte e competitivo. Isso foi possível graças aos constantes esforços do governo de garantir o mercado interno do etanol e de ganhar novos mercados de açúcar (LEITE; CORTEZ, 2008). Todavia, segundo Leite e Cortez (2008), foi em 2003 com os motores *flex-fuel* (que admitem operar com qualquer porcentagem de etanol na mistura do combustível) no mercado nacional que o etanol voltou a ganhar um novo impulso e se isolou em primeiro lugar como o biocombustível líquido mais utilizado no país.

Entretanto, segundo Ramos (2019), desde 2011 os automóveis a gasolina passaram a perder sua posição no mercado para os automóveis *flex*, enquanto os automóveis apenas a álcool (etanol) perderam completamente seu espaço no mercado brasileiro. Ramos (2019) complementa dizendo que este cenário representa a deficiência de pesquisas relacionadas ao uso do etanol em motores de combustão interna devido à ascensão dos motores *flex-fuel*.

2.8.2 Biogás

2.8.2.1 Definição

Baldinelli, Barelli e Bidini (2017) resumem o biogás como uma fonte de combustível renovável e sendo um biocombustível que pode ser convertido em energia térmica ou elétrica, e que é um dos principais subprodutos obtidos a partir da digestão anaeróbica bacteriana de resíduos ou dejetos orgânicos (biomassa) em decomposição.

Frigo et al. (2015) inteiram que o biogás é uma mistura gasosa composta principalmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H_2SO_4), amônia (NH_3), dentre outros componentes. De acordo com Coelho et al. (2006), estes últimos componentes listados, como o ácido sulfídrico (H_2SO_4), são considerados impurezas, são prejudiciais a saúde e ao meio ambiente e precisam ser tratados para melhor utilização do biocombustível. Por sua vez, Coelho et al. (2006)

complementam que a concentração de CH_4 chega a ser cerca de 24 vezes maior do que CO_2 , o que faz do combustível um aliado contra o efeito estufa.

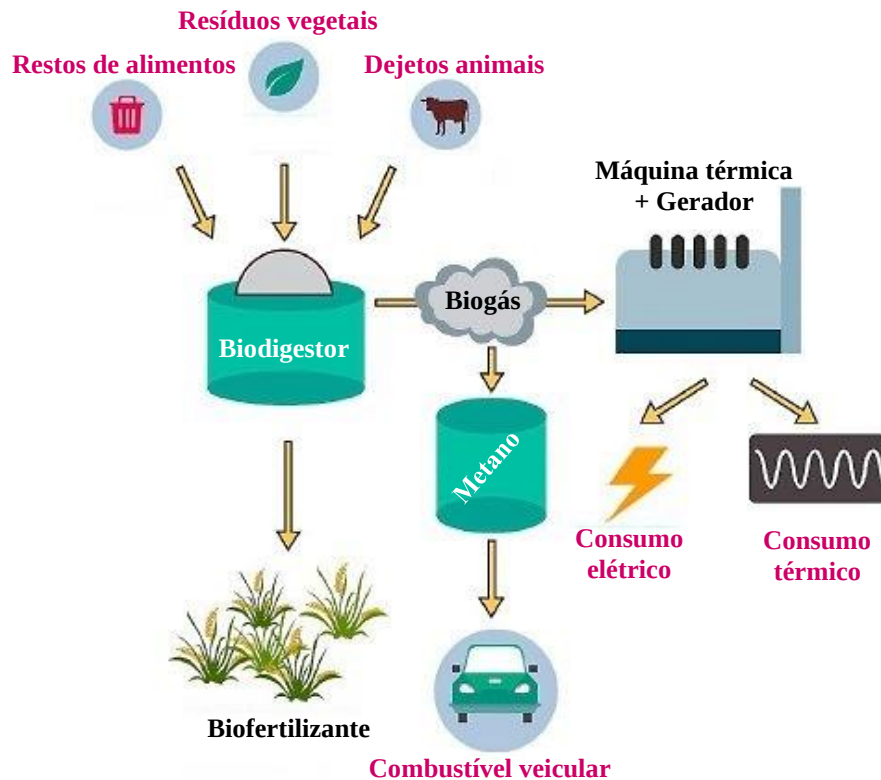
2.8.2.2 Obtenção do biogás e suas principais tecnologias envolvidas

Fernandes et al. (2011) discorrem a respeito do tratamento da biomassa (de origem animal ou vegetal) para a obtenção do biogás a partir de operações conhecidas como unitárias, que removem as substâncias indesejáveis (impurezas), ou as transformam em outras substâncias mais aceitáveis. De acordo com os autores, há os seguintes níveis de tratamento: preliminar, primário, secundário e terciário. Entretanto, o interesse desse trabalho está no tratamento secundário.

O tratamento secundário utiliza-se de processos biológicos, ou seja, reações bioquímicas realizadas por microrganismos bacterianos para remover a matéria orgânica presente na biomassa residual (FERNANDES et al., 2011). Segundo Fernandes et al. (2011), esses processos de biodigestão (também referenciados como sistemas pelos autores) podem ser aeróbicos (com presença de oxigênio) ou anaeróbicos (sem presença de oxigênio), sendo que o biogás é gerado nos sistemas anaeróbicos. Nesses sistemas o balanço de massa se dá da seguinte forma: 70 a 90% do material orgânico é biodegradável e é convertido em biogás, de 5 a 10% é convertido em biomassa microbiana, e de 10 a 30% não é biodegradável (FERNANDES et al., 2011).

Fernandes et al. (2011) citam algumas das tecnologias atuais capazes de realizar a biodigestão anaeróbica, tais como o Reator Anaeróbio de Manta de Lodo ou *Upflow Anaerobic Sludge Blaket* (UASB), as lagoas de estabilização e os biodigestores, dentre outros. Na Figura 4 se apresenta um esquema simplificado do processo para obtenção do biogás e do biofertilizante utilizando um biodigestor, além de alguns dos possíveis destinos de uso que o biogás possui.

Figura 4 – Esquema de obtenção do biogás e do biofertilizante utilizando um biodigestor



Fonte: Adaptado de O'Connor et al. (2021)

Segundo Coelho et al. (2006), há sistemas de pré-tratamento de biogás disponíveis que são capazes de captar, purificar e armazenar o biogás, além de utilizá-lo, como biocombustível, na geração de energia elétrica. Os autores citam o exemplo do sistema de pré-tratamento da PUREFA do campus da USP de São Paulo que, após análises, teve eficiência de purificação comprovada, pois observou-se um decréscimo significativo das concentrações do sulfeto de hidrogênio (H_2S) e água na composição do biogás.

O sistema de purificação é composto por dois compartimentos e está instalado na linha de captação do gás. Antes de o biogás ser alimentado neste sistema, passa por um recipiente onde fica retida a água condensada durante sua passagem pela tubulação. O primeiro compartimento é composto por dois tipos de peneira molecular, sendo que uma delas visa à retirada da umidade e a outra à retirada do ácido sulfídrico, e sílica gel azul, utilizada como indicador, pois quando saturada, possui coloração diferente. O segundo contém cavaco de ferro, visando assegurar a retirada de H_2S , que possivelmente não tenha reagido com o primeiro elemento (COELHO et al., 2006).

Assim, de acordo com Coelho et al. (2006), depois dos resultados com concentrações menores das impurezas, houve a aquisição de um gasômetro e de um motogerador sem riscos de danificar os equipamentos a curto prazo na geração de energia elétrica.

2.8.2.3 Biodigestores

2.8.2.3.1 Definição

Gaspar (2003) define um biodigestor como sendo uma câmara de contenção fechada, podendo ser composta de vários tipos de materiais como alvenaria, concreto, lona, dentre outros, na qual biomassas (em geral, dejetos animais ou restos de matéria orgânica vegetal) são armazenados e fermentados anaerobicamente (sem a presença de oxigênio) pela ação de microrganismos bacterianos.

Dessa forma, segundo Gaspar (2003), como resultado da biodigestão, ocorre a liberação de biogás e a produção de biofertilizante (subprodutos sólidos). O biogás, por ser menos denso, sobe e então é extraído por uma abertura com válvula localizada geralmente na parte superior do biodigestor. Em algumas situações utiliza-se algum equipamento, como por exemplo, um compressor, capaz de realizar o fluxo de extração do gás.

2.8.2.3.2 Tipos mais comuns de biodigestores

Existem variados tipos de biodigestores; mas, em geral, todos são compostos por duas partes principais: o recipiente (tanque) para abrigar e permitir a digestão da biomassa e o gasômetro (campânula) para armazenar o biogás (GASPAR, 2003). Gaspar (2003) ainda cita alguns exemplos de biodigestores, porém ressalta que hoje os mais utilizados no mercado mundial e brasileiro são os modelos chinês e indiano, ambos de produção contínua.

Castanho e Arruda (2008) trazem uma breve explicação a respeito dos dois modelos de biodigestores que Gaspar (2003) aborda, sendo que os autores ainda complementam que os biodigestores podem ser de produção contínua ou descontínua. Segundo os autores, o biodigestor chinês (Figura 5) é uma versão mais compactada voltada para as pequenas propriedades rurais. Esse biodigestor é uma peça única, construído em alvenaria e enterrado no solo, para ocupar menos espaços. Este modelo tem o custo mais barato em relação aos outros, pois sua cúpula também é feita em alvenaria (CASTANHO; ARRUDA, 2008).

Figura 5 – Biodigestor modelo chinês



Fonte: Castanho e Arruda (2008)

De acordo com Castanho e Arruda (2008), o biodigestor indiano (Figura 6) se diferencia do chinês por não estar completamente enterrado no solo e por possuir uma cúpula feita de ferro ou fibra, o que encarece o equipamento. Nesse tipo de biodigestor o processo de biodigestão acontece de forma mais rápida, pois aproveita a temperatura do solo que é pouco variável, favorecendo a ação das bactérias. Ele ocupa ainda pouco espaço e a construção por ser subterrânea, dispensa o uso de reforços, tais como cintas de concreto (CASTANHO; ARRUDA, 2008).

Figura 6 – Biodigestor modelo indiano

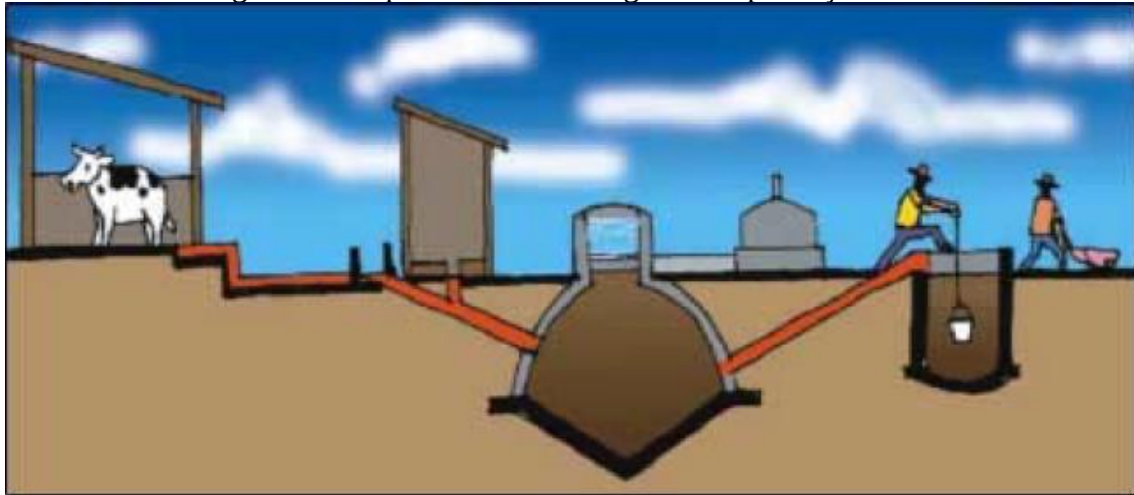


Fonte: Castanho e Arruda (2008)

Castanho e Arruda (2008) explicam que um biodigestor de produção contínua é aquele em que o processo ocorre por um longo período, sendo que a biomassa é colocada no biodigestor diariamente ao mesmo tempo em que o biofertilizante é retirado, conforme no esquema da Figura 7.

Gaspar (2003) cita que é comum armazenar o biogás gerado na produção contínua em gasômetros para atender as épocas de alto consumo energético. Segundo Castanho e Arruda (2008), os biodigestores de produção descontínua são aqueles com maior destinação à produção de biogás; uma vez que totalmente fechada com a biomassa em seu interior, a câmara do biodigestor só será reaberta depois de algum tempo já com os subprodutos finais.

Figura 7 – Esquema de um biodigestor de produção contínua



Fonte: Castanho e Arruda (2008)

2.8.2.3.3 Funcionamento de um biodigestor com a utilização de excremento bovino como matéria-prima

Léon e Martín (2016) reforçam a necessidade de manter as temperaturas médias (entrada com saída) dentro da câmara do biodigestor em faixas específicas para facilitar os processos anaeróbicos. Eles explicam que quanto menores forem as temperaturas médias, mais tempo de retenção a biomassa precisa para os processos anaeróbicos serem eficientes. Léon e Martín (2016) citam três modos de operação comuns usados atualmente de acordo com o tempo de retenção que a biomassa ficara no ambiente anaeróbico: abaixo de 20°C para uma retenção de 70 a 80 dias, entre 30 e 42°C para uma retenção de 30 a 40 dias e entre 43 e 55°C para uma retenção de 15 a 20 dias.

Castanho e Arruda (2008), ratificados por Frigo et al. (2015), explicam que é necessário fazer uma prévia preparação da matéria-prima (biomassa) que será colocada no biodigestor, que consiste em se fazer uma mistura homogênea com água. Os autores explicam que a porcentagem de matéria sólida a ser utilizada no biodigestor deve ser mínima para que os processos anaeróbicos sejam eficientes.

Complementando Castanho e Arruda (2008) e Frigo et al. (2015), Quadros (2009 apud PRACIANO et al., 2020)² recomendam que para cada 1 kg de excremento bovino, deve-se adicionar 1 l de água. Em seguida, os autores recomendam agitar a mistura, buscando torná-la mais homogênea possível para facilitar a fase de retenção hidráulica posterior.

2.8.2.3.4 Custos envolvendo um biodigestor

No mercado brasileiro há algumas opções de biodigestores à venda, sejam eles produzidos aqui ou importados. Porém, conforme explica Biomovement (2022), deve-se se atentar que existem diferenças entre biodigestores feitos para tratamento de esgoto residencial (que não são muito viáveis para gerar biogás) e biodigestores destinados exclusivamente para gerar biogás, como os da fabricante *HOME BIOGAS*. Assim, segundo Biomovement (2022), no catálogo da *HOME BIOGAS* encontra-se o *HOME BIOGAS 2.0* e o *HOME BIOGAS 7.0* que são opções de biodigestores de fluxo contínuo com bom custo-benefício oferecido hoje no mercado nacional.

O *HOME BIOGAS 2.0* (Figura 8) tem capacidade para até 4 kg de resíduos orgânicos por dia ou 18 kg de excremento animal por dia, gerando de 2 a 3 horas diárias de biogás e 4 litros de biofertilizante natural (para hortas e plantações). O produto ocupa um espaço de 6 m² e custa R\$ 8.900,00 (BIOMOVEMENT, 2022).

Figura 8 – Biodigestor *HOME BIOGAS 2.0*



Fonte: Biomovement (2022)

² QUADROS, D. G. **Biodigestor na agricultura familiar do semiárido**. Salvador: Eduneb, 2009. 96 f. apud PRACIANO, A. C. et al. CONTRIBUIÇÃO DE BIODIGESTORES PARA A AGRICULTURA FAMILIAR. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 35, n. 1, p. 95-106, mar. 2020.

O *HOMEBIOGAS* 7.0 (Figura 9) tem capacidade para até 10 kg de resíduos orgânicos por dia ou 60 kg de excremento animal por dia, gerando de 5 a 7 horas diárias de biogás e 10 litros de biofertilizante natural (para hortas e plantações). O produto ocupa um espaço de 10 m² e custa R\$ 13.900,00 (BIOMOVEMENT, 2022).

Figura 9 – Biodigestor *HOMEBIOGAS* 7.0



Fonte: Biomovement (2022)

Entretanto, Gaspar (2003) apresenta uma proposta alternativa à compra que consiste na construção de um biodigestor caseiro (semelhante ao modelo chinês de fluxo contínuo) de alvenaria. O modelo proposto por Gaspar (2003) é capaz de produzir até 4,20 m³ de biogás por dia para atender, por exemplo, às necessidades diárias de uma família rural que possui criação de porcos em sua propriedade na região de Toledo (PR).

Segundo Gaspar (2003), seu biodigestor também poderia atender outras culturas de criação e ser modificado, caso fosse necessário, para comportar maior capacidade de produção e armazenamento, desde que novos levantamentos fossem feitos em relação ao preço dos materiais novos utilizados.

O biodigestor proposto por Gaspar (2003) apresentou, na época, um custo final de compra dos materiais e de construção do equipamento relativamente baixo (R\$ 1.408,17) revelando-se indicado para pequenas e médias propriedades com suinicultura. Entretanto, esse total não inclui gastos com pagamento de frete, mão-de-obra qualificada (pedreiro) para construção do biodigestor, ou preparação do local onde ele será erigido (GASPAR, 2003).

Os valores apresentados por Gaspar (2003) são de quase duas décadas atrás e para manter a fidelidade de seus resultados atualmente será necessário fazer uma correção com base nos preços atuais estimados de mercado dos materiais usados. Assim, utilizando a Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil para correção de valores (BRASIL,

2022d), fez-se uma estimativa utilizando como parâmetro o Índice Geral de Preços de Mercado (IGP-M) do período de maio de 2003 até maio de 2022 e o resultado obtido foi de R\$ 5.738,86.

Logo, há um valor percentual correspondente de aproximadamente 307% de aumento do custo estimado por Gaspar (2003) para os dias atuais. Porém, mesmo com o reajuste, nota-se que o valor total de construção continua sendo menor do que as opções de biodigestores comercializados pela *HOMEBIOGAS*.

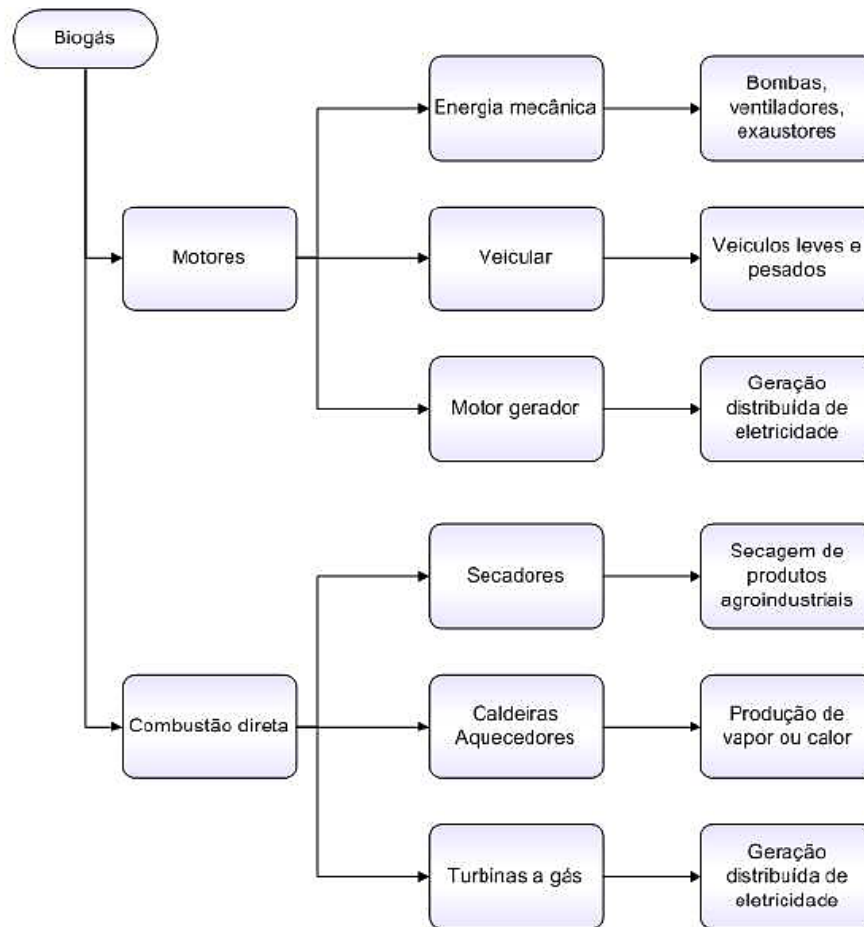
2.8.2.4 Vantagens do biogás provindo de excremento bovino e do uso de biodigestores no cenário rural brasileiro

Fernandes et al. (2011) discorrem a respeito das vantagens tanto econômicas quanto ambientais geradas pela tecnologia dos biodigestores, podendo ser explorada por diversas classes sociais, sendo que ela é de interesse de pesquisa de entidades públicas e privadas atualmente. Na Figura 10, pode-se observar algumas das finalidades de uso do biogás atualmente.

Para Fernandes et al. (2011), os sistemas anaeróbicos são uma das tecnologias de mais fácil acesso atualmente, pois o biogás é um assunto fortemente abordado na literatura científica, sendo usado como substituto aos combustíveis fósseis para contribuir na redução da poluição ambiental causada hoje pelo excesso de CO₂ liberado nos processos de combustão.

No Brasil, segundo Fernandes et al. (2011), devido às condições ambientais favoráveis, essa tecnologia é economicamente viável, pois a operação dela é de baixo custo e gera subprodutos com grande aplicação e bom retorno econômico, tais como os biofertilizantes gerados também pelo processo de biodigestão anaeróbica. O desenvolvimento tecnológico dessa questão, para os autores, está ligado diretamente à problemática do tratamento dos resíduos da sociedade, em especial dos resíduos provenientes das atividades agropecuárias, como é o caso dos excrementos animais.

Figura 10 – Possibilidades de utilização do biogás



Fonte: Adaptado de Souza (2016)

Segundo Brasil (2021), a partir das informações obtidas pela PPM (Pesquisa da Pecuária Municipal) até 31 de dezembro de 2020, no Brasil foram registrados 218,2 milhões de cabeças de gado no território, observando novamente um aumento depois de quase dois anos de queda. Vale destacar que o Brasil possui o maior rebanho bovino do mundo atualmente, segundo Brasil (2021). Brasil (2021) complementa que o país é um dos maiores produtores de leite do mundo, sendo o maior exportador comercial de carne bovina, explicado, especialmente, pela demanda chinesa que teve alta de 74,5% e refletiu-se nos preços de toda a cadeia, do bezerro ao consumidor final (BRASIL, 2021).

Fernandes et al. (2011), ratificados por Praciano et al. (2020), sinalizam que a biodigestão anaeróbica como processo de tratamento e valorização de dejetos orgânicos, nesse caso do excremento bovino, apresenta vantagens para o agropecuarista familiar brasileiro, pois o biogás seria capaz de gerar economia no consumo de energia elétrica em diversas atividades a médio prazo de uma unidade rural familiar.

Frigo et al. (2015) apontam sobre as vantagens de se utilizar a biodigestão anaeróbica e os biodigestores para a reutilização dos dejetos gerados pelo gado de criação em uma unidade familiar rural, uma vez que os animais produzem muitos dejetos ao longo do dia e isso pode ser prejudicial ao meio ambiente. Leite, Bernardes e Oliveira (2004) lembram que a disposição inadequada de resíduos orgânicos sólidos (nesse caso, os excrementos gerados pelos animais) promove a contaminação do meio ambiente (principalmente do solo e das águas subterrâneas) e a proliferação de doenças, assim gerando consequências negativas tanto ambientais quanto sociais.

2.8.2.5 Custos envolvendo a produção do biogás provindo de excremento bovino

Gaspar (2003) destaca que um metro cúbico de biogás apresenta um custo mínimo se comparado a um barril de petróleo. Um metro cúbico de biogás, oriundo de um biodigestor corretamente instalado e operado, custa bem menos ao produtor (GASPAR, 2003). Gaspar (2003) explica que isso ocorre, pois, a matéria-prima para a produção do biogás representa apenas o custo normal que o criador teria para manter o animal vivo e saudável (vacinas, rações, estrebarias e pocilgas).

Gaspar (2003) refere-se à suinocultura em sua explicação, porém a questão dos custos nada difere das outras culturas de criação, como a bovinocultura, por exemplo, uma vez que se pode estimar o custo de produção do biogás oriundo de excremento bovino sobre o custo normal para manter o gado vivo e saudável também.

Porém, como revela Michels et al. (2019), se a atividade já apresenta lucros, os custos para a produção do biogás são irrisórios, uma vez que o custo real seria para manter a manutenção dos animais para a atividade; sendo assim, o biogás seria apenas um produto complementar gerado pela atividade. Ou seja, como será originado do excremento, que em tese é algo que seria descartado pela atividade, não há custos mensais para o biogás, mas sim custos para manter a bovinocultura, custos estes com os animais, o local de instalação, a mão-de-obra, dentre outros.

Michels et al. (2019) apresentam por meio da Tabela 3 uma pesquisa de campo dos dois primeiros trimestres de 2017 dos custos de um sistema de criação tradicional de gado leiteiro. Cabe destacar que o lucro com a venda do leite ou dos animais apresentado por Michels et al. (2019) não será abordado nesse trabalho, uma vez que a pauta é apresentar (apenas como forma de complemento) somente os valores dos custos brutos de manutenção dos animais para produção do biogás.

Tabela 3 – Custos dos dois primeiros trimestres de 2017 de um sistema de criação tradicional de gado leiteiro

	1º Trimestre de 2018	2º Trimestre de 2018
Cabeças de gado	85	84
Total de custos (R\$) do sistema	127.443,00	143.614,45
Total de custos (R\$) aproximado por cabeça de gado	1.499,33	1.709,69

Fonte: Adaptado de Michels et al. (2019)

Ressalta-se que os lucros dependem de outros fatores variados de acordo com o mercado, conforme explica Michels et al. (2019), e estes também não serão abordados na pauta do trabalho. Logo, fazendo uma média dos totais de custos aproximados por cabeça de gado apresentados na Tabela 3 tem-se um valor de R\$ 1.604,515 por trimestre ou R\$ 534,84 por mês para se manter viva e saudável uma vaca leiteira.

2.8.2.6 Equacionamentos e propriedades do biogás provindo de excremento bovino

Santos e Nogueira (2012) relatam que é impossível determinar com exatidão o quanto uma vaca adulta produz de excretas por dia devido as diversas categorias de animais e fatores extras como a alimentação, por exemplo. Dessa forma, Santos e Nogueira (2012) definiram a equação (1), a partir de uma relação entre o peso do animal vivo e saudável com sua produção de excremento por dia e com o uso de um valor constante calculado a partir de uma média ponderada com diversos animais.

$$\text{Pest} = \text{PV} * \text{VM} \quad (1)$$

Sendo que:

- Pest - Produção diária de excremento, kg/dia;
- PV - Peso vivo do animal, kg;
- VM - Valor médio de produção de esterco, 0,07 dia⁻¹.

Porém, de acordo com uma pesquisa e estimativa com alguns animais adultos e saudáveis, Baungratz et al. (2013) relatou que uma vaca com peso médio de 300 kg produz diariamente o equivalente entre 10 e 15 kg de excremento, ou em média 12,5 kg. Vale

ressaltar que valores próximos a esses podem ser conferidos também no trabalho de Gaspar (2003) e Praciano et al. (2020).

Nogueira (1986 apud SANTOS; NOGUEIRA, 2012)³ apresentam por meio da Tabela 4 alguns valores empíricos da produtividade do biogás para alguns tipos diferentes de biomassas, dentre elas, a do esterco bovino fresco.

Tabela 4 – Produtividade do biogás			
Material	Produtividade (Nm ³ /kg)	Material	Produtividade (Nm ³ /kg)
Esterco bovino fresco	0,04	Resíduos vegetais secos	0,30
Esterco de galinha seco	0,43	Resíduos de matadouro (úmido)	0,07
Esterco suíno seco	0,35	Lixo	0,05

Fonte: Adaptado de Nogueira (1986 apud SANTOS; NOGUEIRA, 2012)³

Como a informação da Tabela 4 é um apud de um trabalho de 1986 não encontrado em uma versão gratuita para acesso na internet e não há menções de Santos e Nogueira (2012), não foi possível determinar em quais condições de temperatura e pressão as produtividades de biogás abordadas na Tabela 4 se referem. Logo, será suposto que essas produtividades estão nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), uma vez que Santos e Nogueira (2012) realizam outros cálculos em sua pesquisa indicando essa condição. Dessa forma, utilizando os dados de produtividade do biogás fornecidos na Tabela 4, elaborou-se a Tabela 5 que contém os valores aproximados da quantidade mássica necessária para se gerar 1 Nm³ de biogás, dentre eles a do esterco bovino fresco.

Tabela 5 – Quantidade mássica necessária para se gerar 1 Nm ³ de biogás			
Material	Quantidade (kg)	Material	Quantidade (kg)
Esterco bovino fresco	25,00	Resíduos vegetais secos	3,33
Esterco de galinha seco	2,33	Resíduos de matadouro (úmido)	14,30
Esterco suíno seco	2,86	Lixo	20,00

Fonte: Autoria própria a partir de Nogueira (1986 apud SANTOS; NOGUEIRA, 2012)³

³ NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: A Alternativa Energética**. São Paulo: Nobel, 1986. 93 p. apud SANTOS, I. A.; NOGUEIRA, L. A. H. Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia. **Revista Agroambiental**, Pouso Alegre, v. 4, n. 1, p. 41-49, abr. 2012.

Silva et al. (2005) discorrem a respeito das características físico-químicas do biogás oriundo do excremento bovino. Segundo os autores, o poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS) do biogás dependem diretamente do teor de CH₄ em sua composição química, sendo que o CO₂ e os demais componentes presentes na composição não influenciam no poder calorífico. De acordo com Lucas Júnior (1987 apud SILVA et al., 2005)⁴, “analisando o biogás produzido em biodigestores modelos indiano e chinês, pelo período de um ano, encontrou, em média, 57,7% de CH₄ e 34,2% de CO₂”.

Silva et al. (2005) consideraram uma aproximação de 60% de CH₄ e 40% de CO₂ na composição do biogás oriundo do excremento bovino. Os autores também utilizaram os seguintes parâmetros termodinâmicos nas condições normais de temperatura e pressão (0°C e 1 atm) para o CH₄: massa específica (ρ) do CH₄ de 0,720 kg/Nm³, poder calorífico inferior (PCI) do CH₄ de 50,000 MJ/kg e poder calorífico superior (PCS) do CH₄ de 55,545 kJ/kg.

Para calcular tanto o PCI quanto o PCS do biogás, Silva et al. (2005) adaptaram e utilizaram a equação (2).

$$PCx\text{Biogás} = \%CH_4 * \rho_{CH_4} * PCxCH_4 \quad (2)$$

Sendo que:

- PCxBiogás - Poder calorífico (inferior ou superior) do biogás, kJ/Nm³;
- %CH₄ - Porcentagem da composição química do CH₄ no biogás;
- ρ_{CH_4} - Massa específica do CH₄, kg/Nm³;
- PCxCH₄ - Poder calorífico (inferior ou superior) do CH₄, kJ/kg.

Logo, Silva et al. (2005), estudando a respeito do poder calorífico do biogás de amostras de excremento bovino e utilizando da equação (2) apresentada, encontraram um valor para o PCI de 21,600 MJ/Nm³ e para o PCS de 23,995 MJ/Nm³. Mari (2014), ponderando sobre o biogás oriundo de excrementos de suínos, apresentou valores da composição de CH₄ no biogás variando de 40 a 75% e uma faixa de poder calorífico variando de 22,500 a 25,000 MJ/Nm³, sendo estes valores calculados nas condições

⁴ LUCAS JÚNIOR, J. **Estudo comparativo de biodigestores modelos indiano e chinês**. 1987. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1987 apud PRACIANO, A. C. et al. CONTRIBUIÇÃO DE BIODIGESTORES PARA A AGRICULTURA FAMILIAR. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 1, p. 95-106, mar. 2020.

normais de temperatura e pressão também. Assim, complementa-se que tais valores estão próximos aos encontrados por Silva et al. (2005).

Em relação a massa específica do biogás, Silva et al. (2005), considerando o biogás composto apenas por CH₄ e CO₂ e utilizando os parâmetros termodinâmicos (nas CNTP), utilizaram para as massas específicas do CH₄ e do CO₂ respectivamente: $\rho_{CH_4} = 0,720 \text{ kg/Nm}^3$ e $\rho_{CO_2} = 1,960 \text{ kg/Nm}^3$.

Assim, Silva et al. (2005) utilizaram a equação (3) para calcular a massa específica do biogás.

$$\rho_{\text{Biogás}} = \frac{(\%CH_4 * \rho_{CH_4}) * (\%CO_2 * \rho_{CO_2})}{100\%} \quad (3)$$

Sendo que:

- $\rho_{\text{Biogás}}$ - Massa específica do Biogás, kg/Nm³;
- %CH₄ - Porcentagem da composição química do CH₄ no biogás;
- ρ_{CH_4} - Massa específica do CH₄, kg/Nm³;
- %CO₂ - Porcentagem da composição química do CO₂ no biogás;
- ρ_{CO_2} - Massa específica do CO₂, kg/Nm³.

Logo, Silva et al. (2005), a respeito da massa específica do biogás de amostras de excremento bovino e utilizando da equação (3) apresentada, encontraram um valor para a $\rho_{\text{Biogás}}$ de 1,216 kg/Nm³, sendo que ao utilizar esse valor da massa específica do biogás para converter o PCI determinado anteriormente, tem-se um valor para o PCI do biogás igual a 17,763 MJ/kg (CNTP).

De outro modo, Santos e Nogueira (2012) definiram a equação (4) para o valor energético estimado do biogás diário, a partir de uma relação determinada entre o PCI do biogás gerado pelo excremento bovino fresco de algumas amostras a partir da quantidade de excremento produzido diariamente relatada na equação (1) e com o uso da produtividade relatada na Tabela 4 para converter em produção diária de biogás.

$$\text{Veest} = \text{PCI} * \text{PBiogás} \quad (4)$$

Sendo que:

- Veest - Valor energético estimado do biogás diário, kJ/dia;

- PCI - Poder calorífico inferior do biogás provindo do esterco bovino, kJ/kg;
- PBiogás - Produtividade diária de biogás, kg/dia.

Suzuki et al. (2011) relatam que há duas maneiras de se utilizar o biogás para gerar energia, sendo elas por meio de chama direta ou combustão interna. No caso do calor da chama direta, há vários meios fáceis de uso, sendo que o biogás pode simplesmente ser queimado, sem qualquer intenção de geração de calor (SUZUKI et al., 2011).

Souza (2016) esclarece que durante a queima do biogás como combustível, assumindo que há aproximadamente 58% de CH₄ no biogás, para 1,72 volumes de biogás serão necessários 9,52 volumes de ar ou 1,0 volume de biogás para 5,53 de ar. Com isso, a razão estequiométrica para combustão do biogás é 15,3 % de biogás no ar, ou seja, nessa proporção a combustão é completa (SOUZA, 2016).

As propriedades físico-químicas do biogás resumidas constam na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades do biogás resumidas	
Propriedades (CNTPT)	Biogás
Fórmula química aproximada	0,6CH ₄ + 0,4CO ₂
Massa específica (kg/Nm ³)	1,216
Razão A/C estequiométrica	5,53/1
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	17,763
Fonte: Autoria própria a partir de Silva et al. (2005) e Souza (2016)	

2.8.2.7 Exemplo na literatura do uso do biogás provindo de excremento bovino e seus resultados obtidos

Praciano et al. (2020), em seu experimento para gerar biogás a partir de excremento bovino, relatam ter utilizado aproximadamente 75 kg de excremento gerado por cinco vacas adultas em um dia. Os autores relatam também terem misturado a biomassa de excremento com aproximadamente 75 l de água, criando uma mistura homogênea dentro da câmara de um biodigestor caseiro tubular de produção (Figura 11).

Após a biomassa passar por uma retenção hidráulica de 20 dias, ao final do experimento, eles obtiveram um volume de 2,836 m³ de biogás oriundo de 75 kg originais de excremento bovino de cinco vacas adultas. Ou seja, uma relação de produtividade de m³

de biogás por kg de excremento bovino de $0,038 \text{ m}^3/\text{kg}$, sendo esse valor próximo ao usado por Santos e Nogueira (2012), porém Praciano et al. (2020) não explicam quais foram as condições de temperatura e pressão exatas para se obter esse valor. Por fim, os autores concluíram que possivelmente poderiam ser produzidos 85 m^3 de biogás por mês (30 dias) utilizando um fluxo contínuo de excremento diário ou mais biodigestores caseiros.

Figura 11 – Biodigestor caseiro construído



Fonte: Praciano et al. (2020)

Praciano et al. (2020) relatam que seu experimento foi suficiente para atender a demanda energética ao qual estipularam. Assim, de acordo com os autores, dos $2,836 \text{ m}^3$ de biogás gerados, apenas $0,134 \text{ m}^3$ foram utilizados para bombear 1 m^3 de água em uma motobomba $1/3 \text{ CV}$ e, simultaneamente a isso, apenas $0,135 \text{ m}^3$ de biogás foram empregados para manter um fogão de duas bocas funcionando por 1 hora.

Praciano et al. (2020) também relatam terem conseguido gerar energia elétrica com o biogás e fazer uma série de lâmpadas de LED funcionar simultaneamente a motobomba e o fogão de duas bocas. Cabe destacar que para gerar energia elétrica a partir da queima do biogás, Praciano et al. (2020) citam terem usado um motogerador de 1.200 W de potência que originalmente teria sido construído para receber gasolina como combustível, mas que foi adaptado para receber biogás e com um gerador acoplado (motogerador). Porém, Salomon (2007) explica que os motores de combustão interna são máquinas simples e robustas que podem ser vendidas facilmente no mercado e são os equipamentos mais

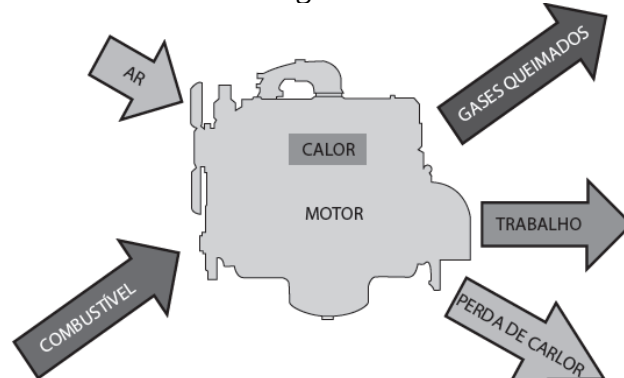
utilizados para queima do biogás devido à flexibilidade que alguns modelos possuem em aceitar tanto combustíveis líquidos quanto gasosos.

2.9 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

2.9.1 Definição

Brunetti (2018) explica que um motor de combustão interna (MCI) é uma máquina térmica capaz de transformar o calor (energia química) obtido pela combustão (queima do combustível) em trabalho mecânico, sendo que esse processo ocorre dentro do volume de controle (VC) formado pela estrutura do motor. Na Figura 12 apresenta os principais fluxos de massa e energia no VC de um MCI.

Figura 12 – Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna



Fonte: Brunetti (2018)

Os motores de combustão interna representam a tecnologia mais difundida dentre as máquinas térmicas, devido a sua simplicidade, robustez e alta relação potência/peso, o que faz com que estes acionadores sejam empregados em larga escala como elementos de propulsão para geração de eletricidade contínua, de *backup* ou de carga de pico e para acionamento de bombas, compressores ou qualquer outro tipo de carga estacionária (SALOMON, 2007).

Brunetti (2018) define o fluido ativo (FA) como sendo a substância responsável que passará por uma sequência de processos na obtenção do trabalho mecânico. Na Figura 12, para Brunetti (2018), o FA seria a mistura ar (comburente da reação) e combustível na entrada do volume de controle e os produtos da combustão (gases queimados) na saída.

2.9.2 Diferenças para o motor de combustão externa

Brunetti (2018) explica que o FA é responsável pela denominação de combustão “interna” ou “externa” que os motores recebem e pode ser tanto líquido, sólido ou gasoso dependendo de qual combustível, comburente ou máquina térmica estiverem sendo usados para definir o volume de controle.

Segundo Brunetti (2018), o motor de combustão externa (MCE) recebe essa denominação quando a combustão se processa externamente ao FA, que será apenas o veículo da energia térmica a ser transformada em trabalho (BRUNETTI, 2018). Suzuki et al. (2011) explicam que no MCE o fluido de trabalho está completamente separado da mistura ar com combustível e um exemplo de MCE seria o ciclo Rankine convencional, onde a água/vapor seria o fluido de trabalho enquanto na caldeira do ciclo ocorreria a queima do combustível.

De maneira oposta ao MCE, de acordo com Brunetti (2018), o motor de combustão interna recebe essa denominação uma vez que o FA (mistura ar com combustível nesse caso) participa diretamente da combustão e no processo de obtenção da energia mecânica, como por exemplo, em um motor de um automóvel.

2.9.3 Principais motores de combustão interna

Segundo Salomon (2007), os MCIs do tipo alternativo, que utilizam pistões, são os mais comuns no mercado e são divididos em motores de ignição por centelha (ciclo Otto) e de ignição por compressão (ciclo Diesel). Salomon (2007) inteira que eles também podem ser de quatro ou dois tempos.

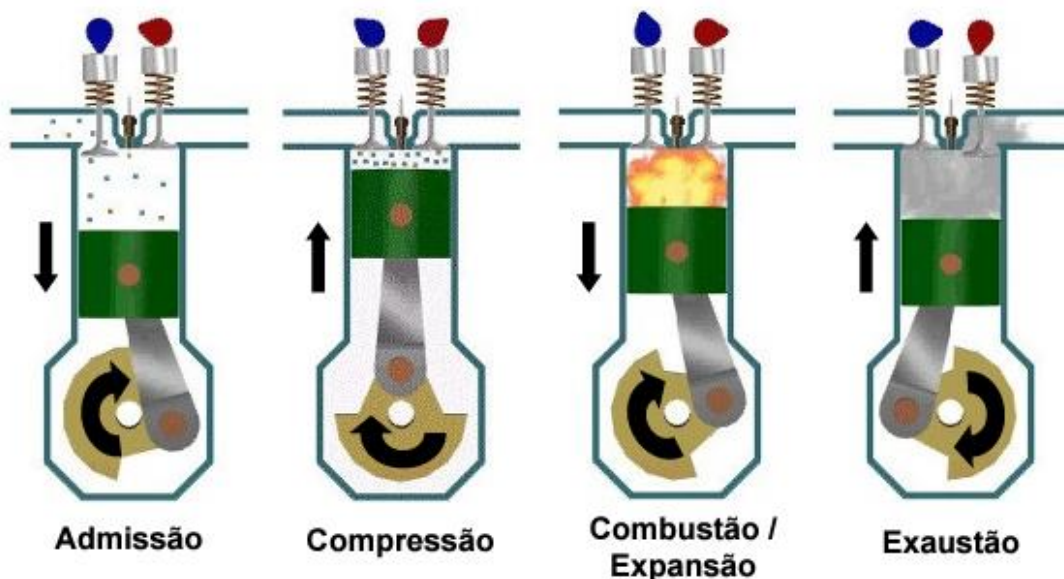
Nos motores ciclo Otto, a mistura ar/combustível é admitida na câmara de combustão e inflamada por meio de uma vela de ignição (SALOMON, 2007). Nos motores Diesel (ciclo Diesel), o ar admitido na câmara de combustão é comprimido até uma pressão suficiente para que ocorra a combustão espontânea quando o combustível for injetado (SALOMON, 2007).

De acordo com Brunetti (2018), nos motores de combustão interna a quatro tempos (4T), o movimento para aumento de pressão da combustão da mistura ar/combustível ocorre equivalente a duas voltas da manivela do motor para completar um ciclo de operação com o cilindro. Brunetti (2018) esclarece que esses tempos que formam o ciclo de operação

do motor (Figura 13) são conhecidos como tempo de admissão, compressão, expansão/combustão e escape/exaustão.

Segundo Brunetti (2018), nos motores de combustão interna a dois tempos (2T), o ciclo é realizado com apenas dois cursos do pistão, o que é equivalente a uma única volta do eixo do motor. O autor explica que a principal diferença do motor 2T para o 4T é que no primeiro tempo do motor 2T ocorre a expansão/combustão e escape/exaustão, e no segundo tempo ocorre a admissão e compressão. De acordo com Brunetti (2018), o motor de 2T é mais simples, leve e potente do que o motor de 4T, porém ele é pouco econômico e exige um combustível com maior poder calorífico, além de ser menos flexível do que o de 4T, tendo sua eficiência prejudicada por variações de temperatura ou rotação, por exemplo.

Figura 13 – Ciclo de operação de um motor de 4T



Fonte: Amorim (2005)

2.9.4 Motor de combustão interna operando com biogás

Segundo Souza (2016), os MCIs de ignição por centelha são as máquinas primárias mais utilizadas na geração de energia elétrica com aproveitamento do biogás como combustível primário. A maioria dos motores a gás utilizam o gás natural, o que facilita o processo de conversão para biogás com 60% de metano (mais comum de se encontrar) (SOUZA, 2016).

Para complementar, Souza (2016), citando outros trabalhos, afirma que existem, em propriedades rurais instalados em todo o mundo, sistemas para geração de energia próprios,

os quais tem potência de geração entre 15 e 50 kW em média, sendo que alguns, além de produzir eletricidade para satisfazer a demanda da propriedade, utilizam água quente proveniente do calor de arrefecimento do MCI.

Segundo Souza, Souza e Machado (2004), os motores a gás de ignição por centelha possuem uma eficiência volumétrica menor que o equivalente motor com combustíveis derivados do petróleo. Para os autores, isto se deve ao fato da adição de gás reduzir o volume de ar aspirado; contudo, a menor eficiência volumétrica é geralmente compensada pelo fato de que os motores a gás conseguem funcionar com taxas de compressão elevadas. Isto é possível porque o poder antidetonante do gás está ligado ao número de metano, ou seja, quanto maior a quantidade de metano maior será a resistência à detonação (SOUZA; SOUZA; MACHADO, 2004).

Suzuki et al. (2011) citam que as vantagens do uso do biogás em motores de combustão interna estão atreladas à possibilidade de fácil geração e retorno de energia elétrica. Porém, devido ao potencial de dióxido de carbono e elevados níveis de sulfeto de hidrogênio, o gás não deve ser diretamente queimado em uma área fechada (SUZUKI et al., 2011).

Salomon (2007) complementa que os motores de combustão interna são muito utilizados atualmente por operarem com diferentes tipos de combustíveis, tanto líquidos quanto gasosos, podendo funcionar com misturas de ambos ou alternar entre ambos dependendo do motor ou adaptação que ele receba. Atualmente os motores de combustão interna alternativos já vem preparados para queimar o biogás com diferentes teores de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico (SALOMON, 2007).

A Figura 14 apresenta a equivalência energética e consumo mássico do biogás com 60% de metano operando em um motor de combustão interna quando comparado com outros combustíveis no mesmo motor (SOUZA, 2016).

De acordo com Salomon (2007), a conversão da energia mecânica gerada pelo motor em energia elétrica é realizada por um gerador que pode ser acoplado diretamente ao motor. Os motores geradores a biogás podem ser utilizados em áreas rurais utilizando biogás proveniente de biomassa vegetal ou resíduos animais, ou áreas urbanas com biogás de aterro sanitário e sistemas de tratamento de esgoto industrial ou doméstico (SOUZA, 2016).

Figura 14 – Equivalência energética do biogás



Fonte: Souza (2016)

Para Souza (2016), os grandes grupos de motores geradores a biogás alcançam potências da ordem de até 1,6 MW. Para motores grandes ciclo Otto (importados), o custo de investimento do sistema de captação de biogás e geração de energia corresponde à ordem de 1.200 US\$/kW instalado (SUZUKI et al., 2011).

Nos casos de biogás provindos de esterco, a tecnologia é restrita a motores de combustão interna de pequeno porte (50 a 100 kW) suficientes para abastecer as fazendas com geração de energia elétrica ou até mesmo acionamento de bombas de irrigação (SUZUKI et al., 2011).

2.9.5 Adaptações e complementos em motores de combustão interna para operar com biogás

Suzuki et al. (2011) consideram que para que o biogás seja utilizado em sua maior potência para a geração de energia elétrica nas propriedades rurais são em geral necessárias poucas alterações em motores de ciclo Diesel ou ciclo Otto convencionais atualmente existentes no mercado.

Porém, segundo Coelho et al. (2006), o biogás possui impurezas tais como o sulfeto de hidrogênio, além de concentrações de água em sua composição, que podem ocasionar danos, como a corrosão, ao MCI. Segundo os autores, há muitas tecnologias complementares que auxiliam nesse pré-tratamento do biogás antes de sua utilização no MCI.

Entretanto, para que o biogás possa ser utilizado como combustível, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, é necessário identificar sua vazão, composição química e poder calorífico, parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia elétrica, além de permitir dimensionar os processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção de ácido sulfídrico e da umidade, com o propósito de evitar danos aos equipamentos da instalação e aumentar seu poder calorífico (COELHO et al., 2006).

Para Coelho et al. (2006), a aquisição ou construção desses sistemas de pré-tratamento é importante para aumentar a vida útil do MCI, além de evitar danos à saúde e ao meio ambiente a longo prazo.

2.9.5.1 Adaptações em motores ciclo Diesel

Mihic (2004) relata que os MCIs ciclo Diesel podem ser modificados para operar de duas formas possíveis com o uso do biogás como combustível. A primeira forma de operação seria com combustível duplo (*dual fuel*), sendo a ignição por injeção de um combustível líquido diesel piloto, o que resultaria numa redução drástica do consumo de diesel acima de 80%, segundo Souza (2016). Na segunda forma de operação, somente seria queimado o biogás, porém a ignição seria por centelha.

Entretanto, Souza (2016) explica que essa segunda forma de operação geraria um processo de modificação muito custoso, pois estar-se-ia convertendo o motor ciclo Diesel em um motor Otto, tornando assim essa escolha ineficaz para se usar com o biogás em pequenas instalações, por exemplo.

2.9.5.2 Adaptações em motores ciclo Otto

A modificação de um MCI ciclo Otto é relativamente fácil, pois esse tipo de motor já é projetado para operar com uma mistura ar/combustível com ignição por centelha (MIHIC, 2004). Souza (2016) complementa que a principal modificação é realizar uma regulação no carburador à queima de uma mistura ar/combustível mais pobre do que seria com o uso de gás natural. Souza (2016) ainda explica que essa modificação é possível, pois os motores ciclo Otto são já são convencionalmente adaptados para funcionar com gás natural, sendo vendidos já com as adaptações no mercado.

Souza, Souza e Machado (2004), em seu experimento que visava o desempenho de um motor ciclo Otto utilizando biogás, utilizaram um motor *Volkswagen* de fabricação nacional modelo Ap. 1.8 l. Os autores explicam que o motor foi adquirido em uma concessionária e era originalmente destinado para uso exclusivo com gasolina como combustível principal, porém, os autores o converteram para uso tanto com biogás quanto para gás natural. A conversão consiste em algumas modificações nos sistemas de alimentação e de ignição e na taxa de compressão do motor (SOUZA; SOUZA; MACHADO, 2004).

Observou-se que o motor convertido com biogás pode produzir na potência máxima acima de 45 kW, podendo com isso ser acoplado a um gerador de 35 kVA, tornando uma propriedade rural com disponibilidade de biogás, autossuficiente em energia elétrica. O motor também pode ser acoplado diretamente a uma bomba para a irrigação da propriedade (SOUZA; SOUZA; MACHADO, 2004).

Coelho et al. (2006) explicam que o funcionamento de um motor de combustão interna por centelha com o uso de biogás como fonte primária de combustível ocorre similar ao com uso de gás natural, onde a energia química contida nas moléculas de metano do biogás é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. A energia mecânica ativa um gerador elétrico acoplado ao eixo do motor, que converte a mesma em energia elétrica (COELHO et al., 2006).

Amorim (2005) complementa Coelho et al. (2006) ressaltando que os motores de combustão por centelha multicomcombustíveis funcionando com gasolina e etanol hidratado são altamente difundidos no mercado brasileiro. Segundo Amorim (2005), o gás metano (principal componente do biogás e do gás natural) também é um combustível que está aumentando a sua participação no mercado através da instalação de *kits* em motores a gasolina ou etanol. Estes motores adaptados não apresentam um bom aproveitamento do combustível por causa da baixa razão de compressão para este combustível (AMORIM, 2005).

Por fim, Souza (2016), ratificando Amorim (2005), explica que o motor de ignição por centelha (ou ciclo Otto) de quatro tempos é a máquina térmica mais utilizada atualmente para operar com o biogás como combustível primário na geração de energia elétrica. Souza (2016) explica que isso é devido ao menor custo na compra do equipamento

já adaptado ou na facilidade das modificações necessárias para ele operar com o biogás em relação aos outros tipos de motores no geral.

2.9.6 Equacionamento para um MCI ciclo Otto

De acordo com Dal Bem (2008), o desempenho de um MCI ciclo Otto varia conforme o tipo de combustível utilizado, sendo que diferentes tipos de combustível exigem diferentes relações A/C, ponto e curva de ignição, taxa de compressão, entre outros, e a correta preparação do motor define o potencial de extração da energia desse combustível (DAL BEM, 2008). Dessa forma, segundo Dal Bem (2008), essas diferenças obtidas partem primeiramente do equacionamento e análise dos seguintes quesitos que envolvem a aplicação do combustível no MCI, sendo eles:

- Potência efetiva do motor;
- Consumo específico de combustível;
- Eficiência de conversão do combustível.

Logo, partindo desse pretexto, os quesitos listados por Dal Bem (2008) serão abordados detalhadamente nos próximos tópicos.

2.9.6.1 Potência efetiva do motor

Heywood (1988) explica que a potência efetiva é aquela de saída gerada no eixo do motor. Define-se, para cada etapa de transformação de energia do motor, um tipo de potência (DAL BEM, 2008). Dal Bem (2008) e Souza (2016) listam e abordam três potências presentes em um motor, sendo que elas se relacionam pela equação (5) apresentada por Heywood (1988).

$$N_e = N_i - N_p \quad (5)$$

Sendo que:

- N_e - Potência efetiva do motor, W;
- N_i - Potência indicada, W;
- N_p - Potência absorvida pelas resistências passivas, W.

Segundo Dal Bem (2008), a potência efetiva do motor (N_e) é a mais importante para ser utilizada como parâmetro para os ensaios e análises comparativas, uma vez que ela é a potência que será utilizada a partir do eixo do motor para as demais operações nas quais ele está vinculado; logo, N_i e N_p não serão abordadas nesse trabalho.

Heywood (1988) também define a potência efetiva como sendo o produto do torque pela velocidade angular do eixo do motor, conforme apresentado na equação (6).

$$N_e = T * \omega \quad (6)$$

Sendo que:

- N_e - Potência efetiva do motor, W;
- T - Torque do motor, N.m;
- ω - Velocidade angular, rad/s.

2.9.6.2 Consumo específico de combustível

Heywood (1988) apresenta o consumo específico como uma das principais característica do motor, sendo este definido como a quantidade em gramas (g) de combustível que ele consome de hora em hora para cada quilowatt (kW) de potência efetiva produzida na saída. A equação (7), adaptada de Heywood (1988), apresenta como se obter o consumo específico de um combustível utilizado.

$$C_s = \frac{C_h}{N_e} \quad (7)$$

Sendo que:

- C_s - Consumo específico de combustível, g/kWh;
- C_h - Consumo horário de combustível, g/h;
- N_e - Potência efetiva do motor, kW.

Os melhores valores de consumos específicos, considerando a potência no freio do motor, estão por volta de 270 g/kWh para MCIs ciclo Otto, segundo Heywood (1988).

2.9.6.3 Eficiência de conversão do combustível

Heywood (1988) explica que o termo “rendimento global” também pode ser destinado para se referir a eficiência de conversão do combustível de um motor. Porém, para o autor, é preferível utilizar a segunda opção, pois ela refere-se à eficiência do motor usando o combustível fornecido como o equivalente a potência de entrada para produzir trabalho (Ne) na saída; e distingue esta, das outras eficiências existentes, pois destaca diretamente o combustível que é o agente de entrada que retrata a eficiência do motor.

A equação (8), adaptada de Heywood (1988), apresenta como se obter a eficiência de conversão do combustível utilizado. Nota-se a relação de entrada como sendo Ch por PCI, e a saída sendo Ne; 3600 é uma constante de conversão de hora para segundos (vice-versa), ou seja, 1 hora equivale a 3600 segundos.

$$\eta = \frac{3600}{C_s * PCI} = \frac{3600 * Ne}{Ch * PCI} \quad (8)$$

Sendo que:

- η - Eficiência de conversão do combustível;
- C_s - Consumo específico de combustível, g/kWh;
- PCI - Poder calorífico inferior do combustível, MJ/kg.

Dal Bem (2008), em suas análises, apresenta valores de eficiência de conversão do combustível para MCIs variando até limites máximos entorno de 0,30 a 0,35. Heywood (1988) também apresenta faixas de eficiências próximas disto, definindo como valores máximos próximos do real.

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 MATERIAL

3.1.1 Cenário base

Todos os cenários que foram elaborados nesse trabalho partem da premissa de cenário rural base, constituído por uma propriedade agropecuária familiar que recentemente aderiu a tarifa branca da ANEEL. Nessa propriedade há, além de atividades ligadas à agricultura de subsistência, uma forte presença de bovinocultura leiteira, no qual o proprietário tem como renda a venda do leite produzido e dos animais ao mercado local. Como premissa de análise, valores referentes a quaisquer formas de lucro envolvendo a atividade leiteira serão desconsiderados na análise, pois são variados de acordo com o mercado, segundo Michels et al. (2019), e não estão na pauta inicial do trabalho.

Em conformidade com Praciano et al. (2020), assume-se que no cenário base haverá bovinos adultos e saudáveis que serão considerados (apenas para fins de estudo) com 300 kg cada, sendo que alguns ou todos podem ser utilizados para gerar biogás. Assim, de acordo com o que foi apresentado por Baungratz et al. (2013), cada bovino produzirá diariamente, em média, o equivalente a 12,5 kg de excremento (ou 375 kg por mês, considerando um mês com 30 dias). Por fim, baseando-se em Michels et al. (2019), será considerado um valor aproximado de R\$ 530,00 por mês para manter cada bovino vivo e saudável, incluindo neste valor a manutenibilidade dos agregados que a atividade possui.

Fora do horário de pico, a propriedade rural consome energia elétrica diretamente pela compra com a concessionário da região, porém o proprietário utiliza um MCI ciclo Otto a quatro tempos de pequeno porte que possui uma potência efetiva de 15 kW (aproximadamente 20,4 CV) para suprir algumas de suas necessidades energéticas que envolvem tanto sua atividade de criação de bovinos quanto sua propriedade, apenas durante o horário de pico de consumo de energia elétrica nos dias úteis da semana (segunda a sexta). A escolha do equipamento e potência se baseiam no que foram apresentados por Souza (2016) e Suzuki et al. (2011), respectivamente.

Destaca-se que o MCI apresentado pode ser abastecido de forma contínua e separadamente tanto com combustíveis líquidos quanto gasosos, sendo que inicialmente o proprietário o abastecia com uma fonte não renovável de combustível adquirida comercialmente.

Seguindo as orientações de Santos e Cândido (2013), buscando uma alternativa de combustível ecológico e visando uma economia viável e sustentável para sua propriedade, o proprietário optou por realizar um experimento comparativo a partir de duas possíveis escolhas de combustíveis renováveis. Os biocombustíveis utilizados por ele serão os apresentados nesse trabalho e serão comparados pelo consumo específico, além dos custos econômicos envolvidos para cada um.

Portanto, destas escolhas, configurou-se inicialmente duas possíveis derivações do cenário base que o proprietário poderá seguir. Dessa forma, com as análises de equivalência das propriedades citadas de ambos os combustíveis renováveis, ele poderá tomar uma decisão de qual destes será de melhor agrado durante o uso em que o consumo de energia elétrica possui uma tarifa maior devido ao horário de pico.

3.1.2 Derivações do cenário base

3.1.2.1 Primeiro cenário derivado

Na primeira derivação do cenário base, o proprietário optará por um caminho mais rápido para utilização de um combustível renovável. Ele abastecerá o MCI diariamente com etanol hidratado comprado mensalmente em um posto de combustível, cuja média adaptada de Brasil (2022c) do preço do litro do combustível é próximo de R\$ 5,30. Porém, dado que os preços dos combustíveis variam, como destacado por Brasil (2022c), serão adotados os valores de R\$ 4,00 a R\$ 6,00 como sendo os limites inferior e superior da escala de preços mensais para a compra do litro do etanol hidratado. Por fim, as propriedades físico-químicas do etanol hidratado serão as apresentadas na Tabela 2 (valores a 20°C).

3.1.2.2 Segundo cenário derivado

Na segunda derivação do cenário base, indo ao encontro do já citado anteriormente por Santos e Cândido (2013), tem-se o uso do biogás oriundo da biodigestão anaeróbica de biomassa residual como uma proposta econômica alternativa de combustível para uso no MCI presente na propriedade rural. O agropecuarista familiar investirá no uso de um ou mais biodigestores de fluxo contínuo com gasômetros para armazenar o biogás gerado, reaproveitando o excremento produzido por seus bovinos para gerar o biocombustível que abastecerá o seu MCI. Destaca-se que será considerado o tempo de funcionamento de

biodigestor e da coleta de excremento animal durante o mês todo (aproximadamente 30 dias).

O biogás gerado na propriedade será considerado com um pré-tratamento a fim de remover suas impurezas com base no que foi apresentado por Coelho et al. (2006) no capítulo 2.8.2.2, porém os cálculos de custos de investimento desse sistema não serão considerados nesse trabalho. Vale destacar também que as propriedades físico-químicas do biogás serão as resumidas na Tabela 6 (valores nas CNTP) e a produtividade do mesmo em excremento bovino será de 0,04 Nm³/kg, como apresentado por Santos e Nogueira (2012).

Complementa-se, como será calculado posteriormente e apresentado em tabela, que os valores arbitrários do intervalo de variação de uso de excremento, bem como a quantidade de bovinos adultos e saudáveis que o proprietário possui ou possa vir a possuir em sua propriedade dependem dos valores pré-estabelecidos dos parâmetros de análise de eficiência de conversão do combustível. Desse modo, os resultados do consumo horário do biogás serão fundamentais para determinar o consumo teórico mensal de excremento, e consequentemente de bovinos, necessário para abastecer o(s) biodigestor(es).

Também não serão considerados os valores de lucros mensais com venda de leite ou animais, portanto serão apresentados apenas os custos brutos mensais de manutenção do gado, porém esses resultados de custos não serão utilizados como critério comparativo, estando apenas disponíveis como complemento às análises, uma vez que o biogás não possui custos mensais efetivos por ser resultado complementar da bovinocultura.

Agrega-se a este fato que o proprietário poderá investir em quantidades variadas de três possíveis biodigestores para utilizar, sendo eles as duas opções de compra apresentadas por Biomovement (2022) no catálogo da *HOME BIOGAS* (*HOME BIOGAS* 2.0 e *HOME BIOGAS* 7.0) e a opção de construção apresentada por Gaspar (2003), cujo custo final envolvido foi recalculado para os dias atuais para que todos estejam novelados na mesma base.

As características desses biodigestores estão resumidas na Tabela 7, cuja produção de biogás de cada biodigestor foi obtida utilizando a produtividade de 0,04 Nm³/kg para o excremento bovino fresco fornecida pela Tabela 4. Inteira-se que nas três opções não estão sendo considerados custos com instalação, mão-de-obra ou quaisquer recursos adicionais, apenas os custos de compra dos biodigestores e dos materiais para fazer o biodigestor no caso de Gaspar (2003).

Tabela 7 – Características resumidas dos biodigestores utilizados

Propriedades	Construção de Gaspar <i>HOMEBIOGAS</i>		
	(2003) – Biod. 1	2.0 – Biod. 2	7.0 – Biod. 3
Capacidade máxima suportada de excremento animal diária (kg)	12	18	60
Produção de biogás diária para a capacidade máxima utilizada em excremento bovino (Nm ³)	0,48	0,72	2,4
Custo de compra envolvido por unidade (R\$)	5.800,00	8.900,00	13.900,00

Fonte: Autoria própria a partir de Gaspar (2003), Santos e Nogueira (2013) e Biomovement (2022)

Realça-se que as informações de capacidade e produção de biogás, apresentadas para o biodigestor construído por Gaspar (2003), foram estimadas em duas etapas com base nas produtividades de esterco suíno com esterco bovino fornecidos na Tabela 4.

Assim, como Gaspar (2003) ressaltou que seu biodigestor produz em média 4,20 m³ de biogás para o excremento suíno e o equipamento é adaptável para outras culturas de criação, tem-se, considerando que essa produção média tenha sido calculada nas CNTP, que na primeira etapa foi realizada a conversão do biogás produzido para excremento suíno direto, utilizando a produtividade de 0,35 Nm³/kg da Tabela 4. Ou seja, após o cálculo, verificou-se que no biodigestor cabem no máximo 12 kg de excremento em sua câmara.

Por fim, na segunda etapa, como a capacidade do biodigestor não altera independente de qual biomassa utilizar, conclui-se que, utilizando a produtividade de 0,04 Nm³/kg para 12 kg de excremento bovino, são produzidos 0,48 Nm³ de biogás.

3.2 MÉTODO

3.2.1 Parâmetros de análise

As principais comparações, visando a equivalência dos parâmetros na apresentação dos resultados para cada biocombustível listado (em cada cenário proposto), ocorrerão a partir das análises do consumo específico para MCIs apresentado por Dal Bem (2008). Para tanto, serão utilizados uma potência específica e um intervalo de variações de eficiências de conversão do combustível pré-determinados. Por fim, serão utilizadas as equações (7) e (8) apresentadas por Heywood (1988), além das relações entre seus consumos obtidos com os custos envolvidos para cada biocombustível.

3.2.2 Considerações

Considera-se, como dito anteriormente, que a potência efetiva e a eficiência de conversão do combustível serão valores pré-determinados para que o consumo específico e o consumo horário possam ser determinados. Acrescenta-se que as equações (7) e (8), combinadas com a substituição da variável comum de consumo específico (C_s), formam a equação (9) com os parâmetros já anteriormente declarados para determinação do consumo horário.

$$Ch = \frac{3600 * Ne}{\eta * PCI} \quad (9)$$

A equação (9) é essencial para a análise da relação de comportamento entre o consumo horário de cada biocombustível com sua respectiva eficiência de conversão do combustível no MCI utilizado. Ela também será importante para as representações gráficas geradas posteriormente como forma de enriquecer o estudo e análise.

Inteira-se que a potência efetiva do MCI será determinada como uma constante no valor de 15 kW e o intervalo estimado de eficiência de conversão do combustível será do limite inferior de 5% até o limite superior de 40%, mas considerando apenas 20 variáveis; de acordo com o que foi relatado por Souza (2016) e Dal Bem (2008) respectivamente.

Destaca-se que a aplicação do método ocorrerá sobre a relação entre as equações das variáveis do consumo específico e da eficiência de conversão em cada biocombustível para cada cenário apresentado, bem como a concordância entre seus consumos mensais (C_m) com os custos mensais envolvidos. A equação (10) apresenta a forma como será obtido o consumo mensal.

$$C_m = Ch * h * d \quad (10)$$

Sendo que:

- C_m - Consumo mensal de combustível, l/mês ou Nm^3 /mês;
- Ch^* - Consumo horário de combustível alternativo, l/h ou Nm^3 /h;
- h - Horas consideradas do dia para funcionamento do MCI, 3h/dia(s);
- d - Dias considerados no mês para funcionamento do MCI, 20dia(s)/mês.

Em adição, as variáveis de custos apresentadas de cada biocombustível em outras unidades de tempo serão convertidas ao final para apontar os resultados esperados em meses dos consumos. O cenário do etanol terá os custos apresentados de duas formas (custos mínimos e máximos), enquanto no cenário do biogás haverá custos apenas para a manutenibilidade da bovinocultura e compra de biodigestores. Logo, resume-se que os custos mensais de produção do biogás serão nulos, mas os custos das demais atividades que o envolvem e a compra dos biodigestores ainda existirão.

No que diz respeito ao MCI, será considerado um tempo de uso próximo de um valor experimental para fins de estudo de 3 horas diárias contínuas, de acordo com o horário de pico apresentado por Generac Brasil (2022). Ressalta-se que o mês será considerado com um valor arredondado de 20 dias úteis, uma vez que durante os finais de semana não há cobrança da tarifa branca. Por fim, complementa-se que não serão considerados cálculos referentes a vida útil do MCI com a utilização de nenhum dos biocombustível apresentados nesse trabalho, sendo que este fator não entrará como comparativo entre os cenários.

3.2.3 Abordagem de trabalho e apresentação dos resultados

Para que a análise e comparação entre os cenários derivados possam ser realizados, será necessário primeiramente abordar e estudar, com o uso da equação (9), o comportamento do consumo horário de cada biocombustível no intervalo de variação de eficiências pré-determinado. Para tanto, serão utilizados os PCIs dos biocombustíveis e a potência efetiva do motor como valores constantes.

Nota-se que, com o uso da equação (7), serão apenas apresentados, tabelados e comparados 20 resultados relevantes de consumos específicos a partir de seus respectivos consumos horários determinados anteriormente devido ao intervalo de variações de eficiências ser extenso. Observa-se que serão os mesmos valores do intervalo de variações de eficiências para os biocombustíveis. Em seguida, com os resultados tabelados de eficiências de conversão dos combustíveis e de consumos específicos, serão confeccionados os gráficos η (%) x C_s (g/kWh) para ambos os biocombustíveis.

Com os consumos horários alternativos relevantes tabelados, será realizada a comparação destes quanto aos custos (em R\$) gerados para cada biocombustível, utilizando o consumo mensal de cada que será calculado pela equação (10). Em seguida será realizada a confecção do gráfico dos custos mensais por consumos horários alternativos obtidos para

cada biocombustível, além do gráfico de custos fixos dos biodigestores para o caso do biogás.

O etanol hidratado (referenciado adiante apenas como etanol) terá os custos mensais envolvidos sobre o preço de compra do seu litro diretamente no posto de combustível para suprir a operação diária do MCI por 3 horas durante os dias úteis da semana para cada consumo horário tabelado convertido em consumo mensal pela equação (10), cujos limites inferior e superior serão R\$ 4,00 e R\$ 6,00 respectivamente.

Em adição, observa-se que todos os cálculos envolvendo a vazão de etanol deverão fazer uso de sua massa específica, uma vez que o consumo do combustível tem suas unidades iniciais apresentadas em gramas. Portanto, precisam ser convertidas para litros, sendo que 1 m³ equivale a 1.000 litros.

O biogás terá uma análise de custos em duas partes, sendo a primeira com o custo mensal aproximado de R\$ 530,00 para se manter cada bovino vivo e saudável e a segunda o custo fixo único da compra ou construção do(s) biodigestor(es) a ser(em) utilizado(s) de cada sub variação do segundo cenário apresentados na Tabela 7 de acordo com cada consumo horário calculado no período de um mês mais.

Por fim, uma análise complementar dos cenários derivados entre o investimento com etanol e o investimento com o melhor biodigestor escolhido da Tabela 7 será realizada. Essa análise visa determinar quanto tempo (em meses) do custo de compra do litro do etanol irá equivaler com os investimentos de compra do melhor biodigestor analisado na faixa de valores de eficiências pré-determinadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PRIMEIRO CENÁRIO DERIVADO

Desenvolvendo o primeiro cenário derivado, com os dados do MCI e do etanol já pré-definidos anteriormente e com o uso da equação (9), encontrou-se para a faixa de 20 valores de eficiências relevantes seus respectivos consumos horários (em g/h). Em seguida, com a equação (7), foram determinados os respectivos valores de consumos específicos (em g/kWh).

Como todo o cálculo do preço do etanol se baseia em litros de combustível, fez-se então a conversão do consumo horário (Ch) determinado anteriormente para consumo horário alternativo (Ch^* , em l/h), utilizando a massa específica do etanol prevista na Tabela 2 para dividir o valor de consumo horário. Vale destacar que não há a necessidade de converter g para kg ou m^3 para l na conversão de Ch para Ch^* , uma vez que a divisão por 1000 na massa acabaria sendo anulada pela multiplicação por 1000 do volume.

Com a faixa do consumo horário alternativo determinada, utilizando a equação (10), determinou-se a faixa de consumo mensal (Cm , em l/mês) do etanol para os valores pré-determinados das eficiências. Por fim, os custos mensais (mínimos e máximos) foram determinados a partir dos preços determinados anteriormente para a compra do litro do etanol para os respectivos consumos mensais determinados.

Assim, com todos os valores encontrados para a faixa de eficiências pré-determinada para todas as variáveis determinadas anteriormente, elaborou-se a Tabela 8 para o etanol (resultados a 20°C), na qual destacou-se em verde a faixa de resultados considerada mais próxima de valores de eficiências para MCIs no geral, de acordo com Dal Bem (2008).

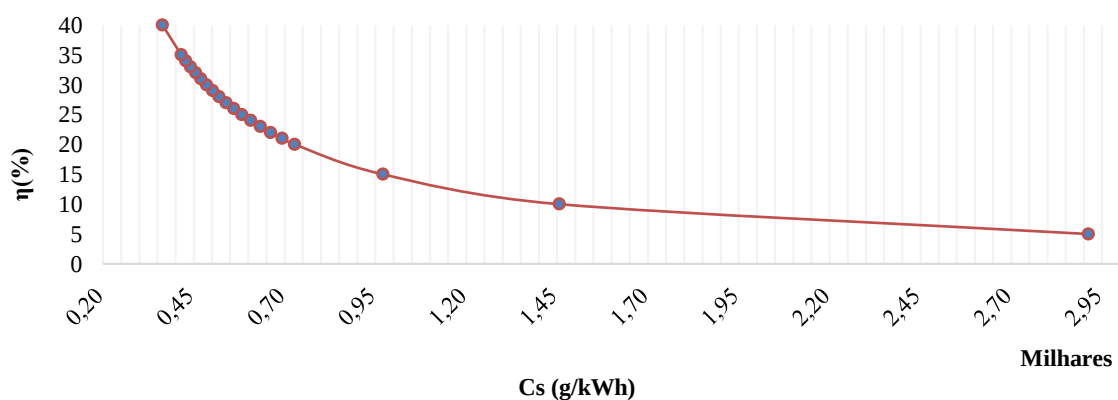
Tabela 8 – Resultados determinados para o primeiro cenário derivado

Primeiro cenário - Etanol (resultados a 20 °C)							
Eficiências		Consumos horários / específico / mensal de etanol				Custos mensais	
$\eta(\%)$	$\eta(-)$	Ch (g/h)	Cs (g/kWh)	Ch* (l/h)	Cm (l/mês)	Mín. (R\$/mês)	Máx. (R\$/mês)
5	0,05	43.685,79	2.912,39	53,93	3.235,98	R\$ 12.943,94	R\$ 19.415,90
10	0,10	21.842,89	1.456,19	26,97	1.617,99	R\$ 6.471,97	R\$ 9.707,95
15	0,15	14.561,93	970,80	17,98	1.078,66	R\$ 4.314,65	R\$ 6.471,97
20	0,20	10.921,45	728,10	13,48	809,00	R\$ 3.235,98	R\$ 4.853,98
21	0,21	10.401,38	693,43	12,84	770,47	R\$ 3.081,89	R\$ 4.622,83
22	0,22	9.928,59	661,91	12,26	735,45	R\$ 2.941,80	R\$ 4.412,71
23	0,23	9.496,91	633,13	11,72	703,47	R\$ 2.813,90	R\$ 4.220,85
24	0,24	9.101,21	606,75	11,24	674,16	R\$ 2.696,65	R\$ 4.044,98
25	0,25	8.737,16	582,48	10,79	647,20	R\$ 2.588,79	R\$ 3.883,18
26	0,26	8.401,11	560,07	10,37	622,30	R\$ 2.489,22	R\$ 3.733,83
27	0,27	8.089,96	539,33	9,99	599,26	R\$ 2.397,03	R\$ 3.595,54
28	0,28	7.801,03	520,07	9,63	577,85	R\$ 2.311,42	R\$ 3.467,13
29	0,29	7.532,03	502,14	9,30	557,93	R\$ 2.231,71	R\$ 3.347,57
30	0,30	7.280,96	485,40	8,99	539,33	R\$ 2.157,32	R\$ 3.235,98
31	0,31	7.046,09	469,74	8,70	521,93	R\$ 2.087,73	R\$ 3.131,60
32	0,32	6.825,90	455,06	8,43	505,62	R\$ 2.022,49	R\$ 3.033,74
33	0,33	6.619,06	441,27	8,17	490,30	R\$ 1.961,20	R\$ 2.941,80
34	0,34	6.424,38	428,29	7,93	475,88	R\$ 1.903,52	R\$ 2.855,28
35	0,35	6.240,83	416,06	7,70	462,28	R\$ 1.849,13	R\$ 2.773,70
40	0,40	5.460,72	364,05	6,74	404,50	R\$ 1.617,99	R\$ 2.426,99

Fonte: Autoria própria

Da Tabela 8, nota-se que, para um mesmo combustível e MCI, a eficiência é inversamente proporcional a todos os outros resultados de todas as variáveis usadas para análise. Porém, para enriquecer a análise e ilustrar melhor os resultados, foram elaborados dois gráficos.

O primeiro gráfico (Figura 15) retrata a relação $\eta(\%)$ x Cs (g/kWh) do etanol.

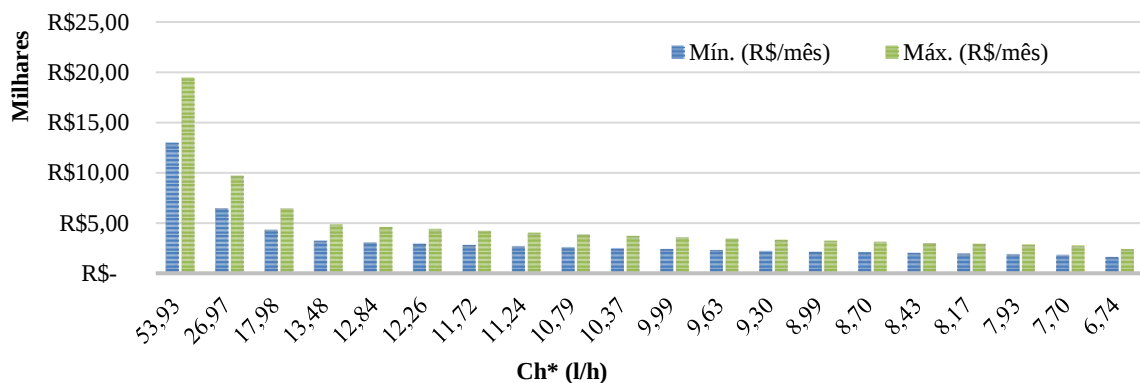
Figura 15 – Relação $\eta(\%)$ x Cs (g/kWh) do etanol

Fonte: Autoria própria

Nota-se que dessa relação presente na Figura 15, pode-se observar que à medida que C_s aumenta, η diminui. Dessa forma, pode-se dizer que a melhoria da eficiência do etanol ocorre quando, para um mesmo valor de potência efetiva (N_e), os valores de consumo específico (C_s) tendem a diminuir. Logo, diz-se que o MCI consome pouco combustível e produz muito quando a eficiência (η) aumenta.

Outro ponto importante para ser observado pela Figura 15 é que conforme η aumenta (principalmente estando dentro da faixa verde determinada na Tabela 8), os valores de C_s tendem a ser muito próximos uns dos outros, causando um afunilamento de resultados na curva; estreitando-a. Logo, deduz-se que para maiores valores de η os resultados de C_s não tendem a ser muito diferentes uns dos outros. Portanto, nem sempre o melhor está no maior, mas sim naquele que está dentro da faixa ideal. O gráfico da Figura 16 aborda a relação dos custos mensais mínimos e máximos do etanol para cada valor de Ch^* determinado.

Figura 16 – Custos mensais do etanol



Fonte: Autoria própria

Nota-se que desta relação presente na Figura 16, pode-se observar que à medida que Ch^* diminui, os custos do etanol tendem a diminuir também. De maneira análoga, observa-se pela Tabela 8 que Ch^* é proporcional a C_s e ambos tendem a diminuir na mesma medida que η aumenta. Logo, a Figura 16 evidencia que uma baixa eficiência resultou em um alto consumo de combustível e isso reflete em um custo elevado de projeto.

4.2 SEGUNDO CENÁRIO DERIVADO

4.2.1 Análise do biogás

Partindo agora para o segundo cenário derivado e seguindo analogamente o que foi realizado no primeiro cenário, porém com dados pré-determinados do biogás, encontrou-se para a faixa de 20 valores de eficiências relevantes seus respectivos consumos horários (em g/h) e seus respectivos valores de consumos específicos (em g/kWh).

Devido a necessidade de trabalhar com o biogás em Nm^3 , fez novamente a conversão do consumo horário (Ch , em g/h) para consumo horário alternativo (Ch^* , só que dessa vez em Nm^3/h), utilizando a massa específica do biogás prevista na Tabela 6 para dividir o valor de consumo horário. Vale destacar que antes de utilizar a massa específica converteu-se os valores de cada Ch de g para kg.

Com a faixa de consumo horário alternativo determinada, utilizando a equação (10), determinou-se a faixa de consumo mensal (Cm , em $\text{Nm}^3/\text{mês}$) do biogás para os valores pré-determinados das eficiências (η). Em seguida, sendo a produtividade do biogás em excremento o equivalente a $0,04 \text{ Nm}^3/\text{kg}$, dividiu-se os valores de consumos mensais pela produtividade do biogás, a fim de se encontrar o consumo equivalente de excremento bovino (em $\text{kg}/\text{mês}$) necessário para cada valor da faixa de eficiência pré-determinada.

Com essa faixa de valores de consumo de excremento mensal, pode-se determinar a quantidade aproximada de bovinos necessário para gerar o biogás originalmente dado pelo valor apresentado pelo consumo mensal; dividindo o valor por $375 \text{ kg}/\text{mês}$. Por fim, sabendo que cada bovino tem um custo mensal aproximado de R\$ 530,00, multiplicou-se esse valor pela quantidade necessária de cada animal para saber os custos teóricos para a manutenção do gado para cada valor de eficiência pré-determinada.

Logo, com a faixa de valores encontrada para todas as variáveis determinadas anteriormente, elaborou-se a Tabela 9 para o biogás, na qual destacou-se em verde a faixa de resultados considerada mais próxima de valores de eficiências para MCIs no geral, de acordo com Dal Bem (2008). A Tabela 9 refere-se à primeira parte da análise do biogás e apresenta apenas os custos referentes a criação dos bovinos, onde o custo real do biogás foi definido como sendo nulo, além dos respectivos consumos necessários de biogás e excremento por cada valor de eficiência (η).

Tabela 9 – Resultados determinados para o segundo cenário derivado – Parte 1

Segundo cenário - Biogás (resultados na CNTP) - Parte 1

Eficiências		Consumos horários / específico / mensal de biogás				Consumo de excremento mensal	Qtd de bovinos	Custos mensais com o biogás		Custos mensais para manutenção do gado	
$\eta(\%)$	$\eta(-)$	Ch (g/h)	Cs (g/kWh)	Ch* (Nm ³ /h)	Cm (Nm ³ /mês)	(kg/mês)	(-)	(R\$/mês)	-	(R\$/mês)	(R\$/mês)
5	0,05	60.800,00	4.053,33	50,00	3.000,00	75.000,00	200	R\$	-	R\$	106.000,00
10	0,10	30.400,00	2.026,67	25,00	1.500,00	37.500,00	100	R\$	-	R\$	53.000,00
15	0,15	20.266,67	1.351,11	16,67	1.000,00	25.000,00	67	R\$	-	R\$	35.510,00
20	0,20	15.200,00	1.013,33	12,50	750,00	18.750,00	50	R\$	-	R\$	26.500,00
21	0,21	14.476,19	965,08	11,90	714,29	17.857,14	48	R\$	-	R\$	25.440,00
22	0,22	13.818,18	921,21	11,36	681,82	17.045,45	46	R\$	-	R\$	24.380,00
23	0,23	13.217,39	881,16	10,87	652,17	16.304,35	44	R\$	-	R\$	23.320,00
24	0,24	12.666,67	844,44	10,42	625,00	15.625,00	42	R\$	-	R\$	22.260,00
25	0,25	12.160,00	810,67	10,00	600,00	15.000,00	40	R\$	-	R\$	21.200,00
26	0,26	11.692,31	779,49	9,62	576,92	14.423,08	39	R\$	-	R\$	20.670,00
27	0,27	11.259,26	750,62	9,26	555,56	13.888,89	38	R\$	-	R\$	20.140,00
28	0,28	10.857,14	723,81	8,93	535,71	13.392,86	36	R\$	-	R\$	19.080,00
29	0,29	10.482,76	698,85	8,62	517,24	12.931,03	35	R\$	-	R\$	18.550,00
30	0,30	10.133,33	675,56	8,33	500,00	12.500,00	34	R\$	-	R\$	18.020,00
31	0,31	9.806,45	653,76	8,06	483,87	12.096,77	33	R\$	-	R\$	17.490,00
32	0,32	9.500,00	633,33	7,81	468,75	11.718,75	32	R\$	-	R\$	16.960,00
33	0,33	9.212,12	614,14	7,58	454,55	11.363,64	31	R\$	-	R\$	16.430,00
34	0,34	8.941,18	596,08	7,35	441,18	11.029,41	30	R\$	-	R\$	15.900,00
35	0,35	8.685,71	579,05	7,14	428,57	10.714,29	29	R\$	-	R\$	15.370,00
40	0,40	7.600,00	506,67	6,25	375,00	9.375,00	25	R\$	-	R\$	13.250,00

Fonte: Autoria própria

Pela Tabela 9, nota-se novamente que, para um mesmo combustível e MCI, a eficiência é inversamente proporcional a todos os outros resultados de todas as variáveis usadas para análise. Percebe-se ainda que ao comparar a Tabela 9 com a Tabela 8, os valores de cada Ch* do biogás ficaram muito próximos dos valores de cada Ch* do Etanol da mesma faixa de eficiências (η), porém deve-se ressaltar que as unidades de ambos são diferentes, sendo o biogás em Nm³ e o etanol em l.

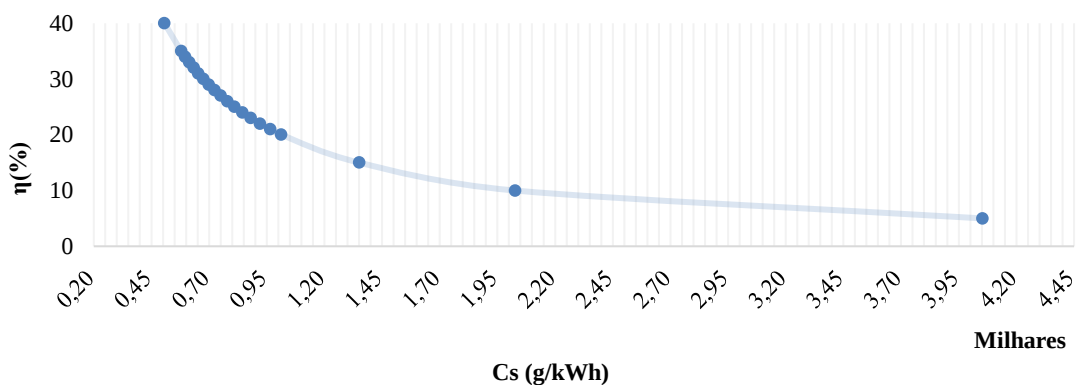
Outro fato a ser destacado aqui é que os custos mensais de manutenção com os bovinos não devem ser levados como critério para comparação com o etanol, uma vez que a atividade de gado leiteiro tem lucro com a venda do leite e dos animais, de acordo com o que foi visto na pesquisa de Michels et al. (2019). Dessa forma, pode-se dizer que o custo real do biogás é desprezível, sendo que o valor apresentado para cada faixa de eficiência do custo mensal de manutenção é apresentado a nível de curiosidade e é apenas um reflexo de quanto os animais tendem a gerar de custos ao proprietário independente da atividade na qual são designados. Por fim, pode-se dizer que o custo do biogás está sendo pago pela bovinocultura, por isso seu custo de produção mensal é apresentado como nulo.

Da Tabela 9 ainda pode-se colher outras informações quando comparada com a Tabela 8 novamente. Tal como, pode-se entender o quanto de bovinos seriam necessários para produzir a quantidade equivalente em litros de etanol para atender um valor específico

pré-determinado de eficiência para o mesmo valor de potência específica. Ou seja, por exemplo, para η igual a 25%, tem-se aproximadamente um C_m de etanol igual a 647 l/mês o que equivale ao biogás obtido do excremento de 40 bovinos no mês.

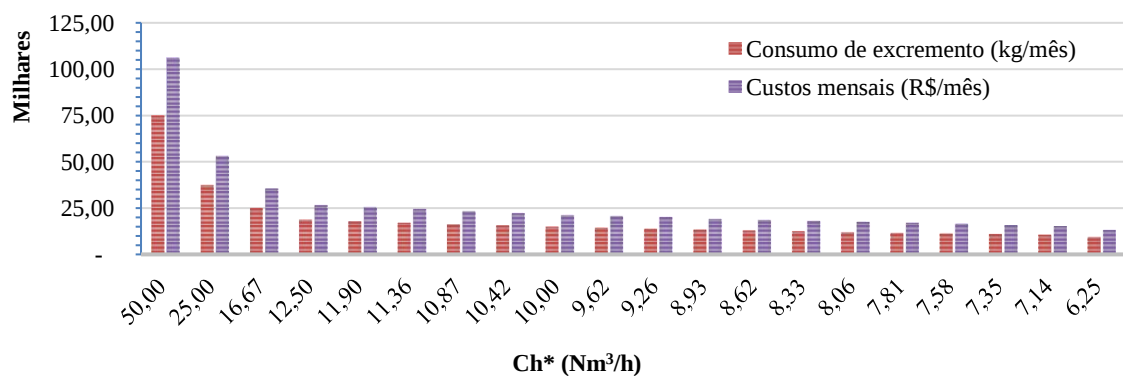
Seguindo o exemplo do primeiro cenário, novamente, para enriquecer a análise e ilustrar melhor os resultados dessa primeira parte, foram elaborados dois gráficos. O primeiro gráfico (Figura 17) retrata a relação η (%) x C_s (g/kWh) do biogás. O segundo gráfico (Figura 18) aborda a relação dos consumos de excrementos e custos mensais para manutenção dos animais para cada valor de Ch^* determinado do biogás, sendo este gráfico apenas para fins complementares e não comparativos à análise final.

Figura 17 – Relação η (%) x C_s (g/kWh) do biogás



Fonte: Autoria própria

Figura 18 – Consumos e custos mensais do biogás



Fonte: Autoria própria

O gráfico da Figuras 17 para o biogás apresenta comportamento similar ao da Figura 15 para o etanol, logo pode-se dizer que a relação das variáveis é idêntica. Porém, é nítido, conforme observado na Tabela 9, que os consumos do biogás são relativamente maiores para a mesma faixa de valores de eficiências usadas no etanol. A melhor explicação para

isso está no fato que o biogás apresenta um PCI relativamente menor que o etanol, onde ao se observar pela equação (9) resultará em valores de consumos horários sempre maiores.

Inteira-se, segundo Souza (2016) que a maioria dos motores adaptados a gás usam o gás natural como combustível principal, sendo este um combustível com maior PCI do que o biogás. Segundo, Silva et al. (2005), o elemento detonante presente tanto no gás natural quanto no biogás é o metano (ou biometano no caso do biogás), sendo esse o principal elemento que compõe o PCI de ambos os biocombustíveis. Logo, de acordo Souza (2016), com a queima de uma mistura ar/combustível mais pobre (biogás) do que seria com o uso de gás natural, a tendência é que o consumo seja maior para compensar a eficiência de conversão do combustível. Nota-se que essa relação pode ser evidenciada nas equações (8) e (9), substituindo os mesmos valores da Tabela 9.

Outros fatos importantes abordados na literatura que explicam o motivo do alto consumo de biogás em relação ao etanol nos MCIs, que utilizam combustíveis tanto líquidos quanto gasosos, são que os combustíveis gasosos segundo Souza, Souza e Machado (2004) possuem uma eficiência volumétrica menor nos motores a gás de ignição por centelha que o equivalente motor com combustíveis derivados do petróleo (onde a grande maioria é líquido). Lista-se também a esses fatos que, segundo Amorim (2005), estes motores adaptados não apresentam um bom aproveitamento dos combustíveis gasosos por causa da baixa razão de compressão para estes combustíveis.

4.2.2 Análise dos biodigestores

Agora, partindo para os biodigestores tem-se a segunda parte da análise do biogás, refletida por meio da Tabela 10, sendo essa gerada pelos valores de consumos de excrementos encontrados para cada valor de eficiência dividida por cada valor apresentado de quantidade máxima na câmara dos biodigestores da Tabela 7. Logo, A Tabela 10 possui valores arredondados (para cima) das quantidades necessárias de cada um dos biodigestores apresentados na Tabela 7, bem como seus respectivos custos envolvidos.

Reforça-se que o tempo de funcionamento do biodigestor e da coleta de excremento animal ocorrem durante o mês todo (aproximadamente 30 dias). Dessa forma, os valores das quantidades de biodigestores e seus custos são para 30 dias e não para 20 dias, como é no caso do funcionamento do MCI.

A principal informação que se pode extrair da Tabela 10 é que esses são de fato os custos que o biogás acarretará para cada valor de eficiência pré-determinada. Dessa forma,

percebe-se que o investimento em cada tipo e quantidade de biodigestores a se utilizar refletem em valores altos se comparados com o custo mensal do litro do etanol, entretanto salienta-se que esses valores são únicos e finais. Portanto, uma vez pagos, não haverá mais custos, a não ser em relação a manutenção dos equipamentos e nos casos em que o proprietário necessite comprar mais biodigestores para uma demanda maior.

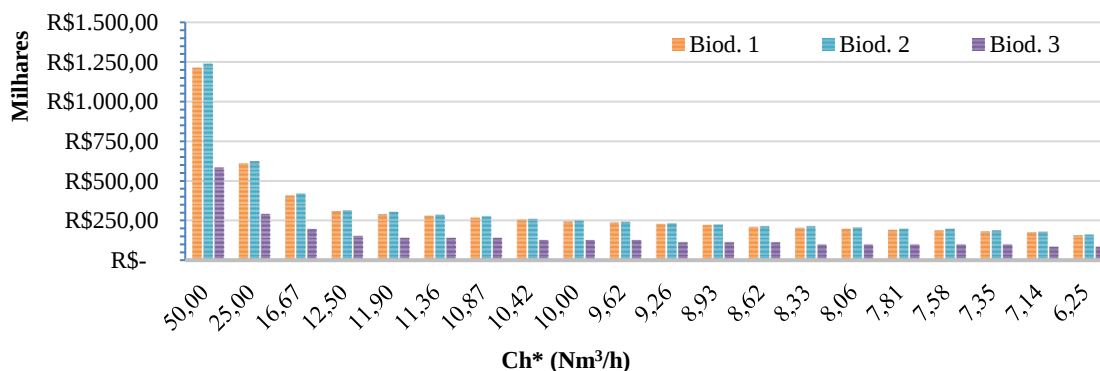
Tabela 10 – Resultados determinados para o segundo cenário derivado – Parte 2

Segundo cenário - Biogás - Parte 2								
Eficiências		Qtd mín. necessárias de biodigestores			Custos fixos (em R\$) com os biodigestores necessários			
$\eta(\%)$	$\eta(-)$	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3				
5	0,05	209	139	42	R\$ 1.212.200,00	R\$ 1.237.100,00	R\$ 583.800,00	
10	0,10	105	70	21	R\$ 609.000,00	R\$ 623.000,00	R\$ 291.900,00	
15	0,15	70	47	14	R\$ 406.000,00	R\$ 418.300,00	R\$ 194.600,00	
20	0,20	53	35	11	R\$ 307.400,00	R\$ 311.500,00	R\$ 152.900,00	
21	0,21	50	34	10	R\$ 290.000,00	R\$ 302.600,00	R\$ 139.000,00	
22	0,22	48	32	10	R\$ 278.400,00	R\$ 284.800,00	R\$ 139.000,00	
23	0,23	46	31	10	R\$ 266.800,00	R\$ 275.900,00	R\$ 139.000,00	
24	0,24	44	29	9	R\$ 255.200,00	R\$ 258.100,00	R\$ 125.100,00	
25	0,25	42	28	9	R\$ 243.600,00	R\$ 249.200,00	R\$ 125.100,00	
26	0,26	41	27	9	R\$ 237.800,00	R\$ 240.300,00	R\$ 125.100,00	
27	0,27	39	26	8	R\$ 226.200,00	R\$ 231.400,00	R\$ 111.200,00	
28	0,28	38	25	8	R\$ 220.400,00	R\$ 222.500,00	R\$ 111.200,00	
29	0,29	36	24	8	R\$ 208.800,00	R\$ 213.600,00	R\$ 111.200,00	
30	0,30	35	24	7	R\$ 203.000,00	R\$ 213.600,00	R\$ 97.300,00	
31	0,31	34	23	7	R\$ 197.200,00	R\$ 204.700,00	R\$ 97.300,00	
32	0,32	33	22	7	R\$ 191.400,00	R\$ 195.800,00	R\$ 97.300,00	
33	0,33	32	22	7	R\$ 185.600,00	R\$ 195.800,00	R\$ 97.300,00	
34	0,34	31	21	7	R\$ 179.800,00	R\$ 186.900,00	R\$ 97.300,00	
35	0,35	30	20	6	R\$ 174.000,00	R\$ 178.000,00	R\$ 83.400,00	
40	0,40	27	18	6	R\$ 156.600,00	R\$ 160.200,00	R\$ 83.400,00	

Fonte: Autoria própria

Pela Tabela 10 percebe-se que o melhor biodigestor para se investir na faixa de valores apresentados seria o Biod. 3 (*HOME BIOGAS 7.0*), uma vez que sua escolha sempre irá utilizar menos equipamentos com custos finais menores, pois esses comportam mais excremento animal e têm melhor produtividade de biogás. Para visualizar melhor essa análise, o gráfico (Figura 19) abordará a relação dos custos únicos entre as três opções de biodigestores da Tabela 7 em relação ao Ch* do biogás.

Figura 19 – Custos fixos com os biodigestores



Fonte: Autoria própria

Um fato relevante da Tabela 10 é que o Biod. 1 proposto por Gaspar (2003) apresenta valores com os custos ligeiramente mais baixos do que o Biod. 2 (*HOMEBIOGAS 2.0*). Entretanto, precisa-se de unidades a mais do Biod. 1 de Gaspar (2003) para cada valor da faixa de eficiência em relação ao Biod. 2 (*HOMEBIOGAS 2.0*). Dessa forma, pode-se dizer que, em relação a necessidade de espaço de instalação dos equipamentos, o Biod. 2 (*HOMEBIOGAS 2.0*) seria melhor que o Biod. 1 proposto por Gaspar (2003).

Por fim, uma análise relevante a ser feita com a Tabela 10 e a Tabela 8 é determinar em quanto tempo (em meses) o custo de compra do litro de etanol irá equivaler com o investimento único de compra do melhor biodigestor analisado (o Biod. 3) na faixa de valores de eficiências pré-determinadas. Dessa forma, elaborou-se a Tabela 11 para apresentar esses resultados (ressaltando que nesse caso só é considerado o preço de compra dos equipamentos).

Percebe-se pela Tabela 11 que para os valores mínimos de custo de compra do etanol, a quantidade de tempo para atingir o preço final de compra do Biod. 3 (*HOMEBIOGAS 7.0*) seria próximo ao intervalo de 46 a 52 meses ou de 3,8 a 4,3 anos. Entretanto, se todo o custo de compra do etanol fosse máximo, o tempo para atingir o preço final de compra do biodigestor seria menor (algo entre 31 e 35 meses ou 2,6 e 2,9 anos).

Tabela 11 – Equivalência do custo do etanol com o melhor biodigestor analisado

Equivalência do custo do etanol com o melhor biodigestor analisado						
Eficiências		Custos mensais com etanol		Custo fixo com o Biod. 3	Tempo necessário para a equivalencia dos investimentos	
$\eta(\%)$	$\eta(-)$	Mín. (R\$/mês)	Máx. (R\$/mês)	R\$	P/ Mín (meses)	P/ Máx. (meses)
5	0,05	R\$ 12.943,94	R\$ 19.415,90	R\$ 583.800,00	46	31
10	0,10	R\$ 6.471,97	R\$ 9.707,95	R\$ 291.900,00	46	31
15	0,15	R\$ 4.314,65	R\$ 6.471,97	R\$ 194.600,00	46	31
20	0,20	R\$ 3.235,98	R\$ 4.853,98	R\$ 152.900,00	48	32
21	0,21	R\$ 3.081,89	R\$ 4.622,83	R\$ 139.000,00	46	31
22	0,22	R\$ 2.941,80	R\$ 4.412,71	R\$ 139.000,00	48	32
23	0,23	R\$ 2.813,90	R\$ 4.220,85	R\$ 139.000,00	50	33
24	0,24	R\$ 2.696,65	R\$ 4.044,98	R\$ 125.100,00	47	31
25	0,25	R\$ 2.588,79	R\$ 3.883,18	R\$ 125.100,00	49	33
26	0,26	R\$ 2.489,22	R\$ 3.733,83	R\$ 125.100,00	51	34
27	0,27	R\$ 2.397,03	R\$ 3.595,54	R\$ 111.200,00	47	31
28	0,28	R\$ 2.311,42	R\$ 3.467,13	R\$ 111.200,00	49	33
29	0,29	R\$ 2.231,71	R\$ 3.347,57	R\$ 111.200,00	50	34
30	0,30	R\$ 2.157,32	R\$ 3.235,98	R\$ 97.300,00	46	31
31	0,31	R\$ 2.087,73	R\$ 3.131,60	R\$ 97.300,00	47	32
32	0,32	R\$ 2.022,49	R\$ 3.033,74	R\$ 97.300,00	49	33
33	0,33	R\$ 1.961,20	R\$ 2.941,80	R\$ 97.300,00	50	34
34	0,34	R\$ 1.903,52	R\$ 2.855,28	R\$ 97.300,00	52	35
35	0,35	R\$ 1.849,13	R\$ 2.773,70	R\$ 83.400,00	46	31
40	0,40	R\$ 1.617,99	R\$ 2.426,99	R\$ 83.400,00	52	35

Fonte: Autoria própria

Portanto, pode-se dizer que o investimento na compra das unidades do Biod. 3 (*HOME BIOGAS 7.0*) para cada valor da faixa de eficiências seria melhor caso o proprietário estivesse gastando mais com o etanol, pois em menos tempo ele poderia ter a compensação a prazo desse dinheiro gasto mensalmente ao investir no biogás.

5 CONCLUSÃO

O etanol é o biocombustível líquido mais utilizado na matriz energética brasileira, sendo destinado como uma opção alternativa à gasolina nos meios automotivos do país e, de acordo com Pau (2003), é o substituto renovável preferido nos MCIs do país. Isto pois, historicamente, como bem-dito por Leite e Cortez (2008) e Ramos (2019), esse biocombustível é reflexo de um setor sucroalcooleiro muito forte e competitivo que o Brasil possui, além de reter consideráveis pesquisas e investimentos envolvidos ao longo dos anos.

Por outro lado, o biogás não é o único subproduto benéfico da digestão anaeróbica e é um biocombustível com uma tecnologia acessível, sendo que os materiais são de fácil obtenção, de acordo com Gaspar (2003). Esse biocombustível possui considerável conteúdo de pesquisa no meio científico nacional e internacional e pode ser explorado por diversas classes sociais, além de apresentar bons resultados quando destinado como forma alternativa de combustível para fins específicos de reaproveitamento de matéria orgânica, como foi apresentado por Praciano et al. (2020), mas não se limitando apenas à obtenção por excremento bovino como matéria-prima.

Pensando agora apenas nos aspectos técnicos de ambos os biocombustíveis, pode-se observar que à medida que o consumo aumenta, a eficiência de ambos diminui. Dessa forma, diz-se que o MCI consome pouco combustível e produz muito quando a eficiência de conversão do combustível aumenta e, assim, inviabilizaria a aplicação de ambos ao MCI selecionado. Outro ponto observado para ambos os biocombustíveis é que para maiores valores de eficiência de conversão do combustível, os resultados de consumos específicos não tendem a ser muito diferentes uns dos outros. Logo, reafirmando o que foi dito anteriormente: “nem sempre o melhor está no maior, mas sim naquele que está dentro da faixa ideal”.

A partir desses aspectos apresentados percebe-se que aplicações com biocombustíveis tendem a ser mais restritas a pequenos e médios cenários, como o próprio consumo para abastecer um MCI veicular, ou para abastecer pequenos processos dentro de uma residência rural. Isto pois, grandes aplicações tendem a inviabilizar esses biocombustíveis por exigirem grandes consumos horários, porém essa hipótese necessita de mais estudos posteriores, principalmente em situações de grandes aplicações industriais.

Um ponto importante a ser apresentado ainda nos aspectos técnicos seria ao fato dos dados levantados pelo biogás serem considerados e calculados a partir de animas, cujo peso estimado foi fixado em 300 kg por conveniência das informações levantadas por Baungratz

et al. (2013). Porém, como o próprio Baungratz et al. (2013) apresenta, este seria um valor médio e mais destinado a novilhos(as), havendo animais adultos com pesos maiores que consequentemente produziram maiores quantidades de excremento e assim maiores quantidades de biogás poderiam ser geradas.

Complementa-se, como visto na Tabela 11, que para os aspectos econômicos, depois de determinado período, o biogás consegue equivaler seus custos iniciais quando comparado ao etanol, já que seu investimento é único e fixo, salvo situações que exijam manutenções preventivas ou extraordinárias, além de novos investimentos para aumentar a demanda. Porém, mesmo que isso ocorra, com o tempo, o preço de investimento nos biodigestores do biogás iria equivaler ao preço de custo mensal do etanol no mesmo período de uso.

Em paralelo aos aspectos econômicos abordados por meio da Tabela 11, complementa-se o fato de que para o uso do etanol em uma propriedade rural, custos com transporte e armazenamento, mesmo que não abordados nesse trabalho, devem ser considerados em uma situação real, uma vez que muitas destas propriedades podem estar a grandes distancias dos postos de combustíveis mais próximos. Assim, uma das vantagens do biogás sobre o etanol estaria no fato da produção desse biocombustível ser dentro da própria propriedade, desconsiderando os custos citados que o etanol pondera.

Vale destacar também que no caso do biogás nem sempre o que é caro no início sai de fato caro no final. Como visto no estudo de caso, o *HOMEBIOGAS 7.0*, que em tese é o mais caro das três opções apresentadas de biodigestores da Tabela 7, é a melhor escolha de investimento para todos os valores de eficiência de conversão do combustível por possuir as melhores propriedades e melhores fatores de produção na escala apresentada.

Portanto, a partir dos estudos de casos realizados das derivações do cenário base, quando os biocombustíveis são comparados nos mesmos parâmetros e sem considerar a vida útil do MCI ou a questão das impurezas envolvidas, observa-se que o etanol funciona como uma alternativa rápida e menos agressiva de combustível substitutivo, enquanto o biogás funcionaria como um investimento de tempo estipulável que possibilitaria retornos financeiros desde que o cenário ao qual ele estivesse empregado fosse compatível para sua aplicação.

Conclui-se que ambos os biocombustíveis são notáveis nos parâmetros e aspectos analisados por esse trabalho. O etanol já está consolidado na matriz energética nacional e possui um investimento mais seguro, porém com custos permanentes, uma vez que esse biocombustível é comprado, e não fabricado dentro da propriedade. Em contrapartida, o

biogás funciona como uma aposta de tempo estipulável, possibilitando retornos positivos desde que a aplicação não seja designada para grandes projetos e o cenário esteja propriamente preparado para sua aplicação, sendo que no caso da propriedade rural analisada, o biogás estaria pago pela atividade leiteira; podendo gerar assim uma subsistência energética que possibilite um equilíbrio da balança econômica em alguns anos após o investimento inicial.

Por fim, ficam como sugestões futuras de pesquisa e trabalho o estudo da hipótese levantada para se trabalhar com os biocombustíveis apresentados em aplicações maiores, a fim de se entender melhor como funciona o consumo para grandes investimentos, além de estudar outras possibilidades de biocombustíveis presentes na matriz energética brasileira. Por outro lado, uma ideia a ser trabalhada também futuramente é a possibilidade de se comparar esses biocombustíveis com o consumo energético elétrico fornecido diretamente da rede por uma companhia elétrica, bem como considerar a vida útil do MCI e dos biodigestores nos cálculos novos, além do uso do biogás oriundo de outras formas de matéria-prima, como as apresentadas na Tabela 4, para enriquecer as comparações.

REFERÊNCIAS

AMORIM, R. J. **Análise do aumento da razão volumétrica de compressão de um motor flexível multicomcombustível visando melhoria de desempenho**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

BALDINELLI, A.; BARELLI, L.; BIDINI, G. Upgrading versus reforming: an energy and exergy analysis of two solid oxide fuel cell-based systems for a convenient biogas-to-electricity conversion. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v. 138, p. 360-374, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.002>.

BAUNGRATZ, K. L. F. *et al.* Produção de biogás a partir de biomassa residual. **Acta Iguaçu**, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 30–39, 2013. <http://dx.doi.org/10.48075/actaiguazu.v2i3.8568>. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/8568>. Acesso em: 15 abr. 2022.

BIOMOVEMENT. **Loja**. [2022]. Disponível em: <https://homebiogas.com.br/shop/>. Acesso em: 08 jun. 2022.

BOUNDY, B. *et al.* Appendix A: lower and higher heating values of gas, liquid and solid fuels. In: BOUNDY, B. *et al.* **Biomass energy data book**. 4. ed. Washington, D.C.: Oak Ridge National Laboratory, 2011. 201 p. Disponível em: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub33120.pdf>. Acesso em: 22 maio 2022.

BRASIL. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa branca**. 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/tarifa-branca/introducao>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BRASIL. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifas e informações econômico-financeiras**. 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/tarifa-branca/introducao>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BRASIL. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Sistema de levantamento de preços**. 2022c. Disponível em: <https://preco.anp.gov.br/>. Acesso em: 05 jun. 2022.

BRASIL. Banco Central do Brasil. **Calculadora do cidadão**: correção de valores. 2022d. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice#>. Acesso em: 08 jun. 2022.

BRASIL. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da pecuária municipal de 2020. **Pesquisa da Pecuária Municipal, Brasil**, v. 48, n. 1, p. 1-12, jan. 2021.

BRASIL. Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura familiar**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/agricultura-familiar-1>. Acesso em: 29 mar. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Uso de fontes renováveis no Brasil é três vezes maior que o mundial**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/07/uso-de-fontes-renovaveis-no-brasil-e-tres-vezes-maior-que-o-mundial#:~:text=A%20demanda%20total%20de%20energia,participa%C3%A7%C3%A3o%20das%20renov%C3%A1veis%20na%20matriz>. Acesso em: 30 mar. 2022.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. Biodigestores. In: SEMANA DE TECNOLOGIA EM ALIMENTOS, 6., 2008, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/chines1_000g7gph0mm02wx5ok0wtedt3q5rn9mk.pdf. Acesso em: 25 abr. 2022.

COELHO, S. T. *et al.* Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11., 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Campinas: SciELO, 2006. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100070&lng=en&nrm=abn. Acesso em 16 abr. 2022.

COOK, J. *et al.* Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. **Environmental Research Letters**, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 024024, 15 maio 2013. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024024>.

COOK, J. *et al.* Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. **Environmental Research Letters**, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 048002, 1 abr. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/048002>.

DAL BEM, A. J. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto alimentado com álcool de 75 INPM**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

FEARNSIDE, P. M. Efeitos de uso de terra e manejo florestal no ciclo de carbono na Amazônia brasileira. In: FLEISCHRESSER (ed.) CAUSAS E DINÂMICA DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA, 5., 2001, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2001. p. 173-196. Disponível em: http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2001/Efeitos%20do%20Uso%20da%20Terra%20e%20Manejo.pdf. Acesso em: 10 abr. 2022.

FERNANDES, D. M. *et al.* Biomassa como fonte alternativa de energia. **Revista da Madeira**, Ourinhos, ed. 129, nov. 2011.

FRIGO, E. P. *et al.* Biomassa residual rural proveniente de diferentes atividades agropecuárias brasileiras. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 30, n. 1, p. 21-26, mar. 2015.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestor em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR**.

2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GENERAC BRASIL. **O que é horário de pico e como isso afeta a conta no final do mês?**. 2022. Disponível em: <https://generacbrasil.com.br/o-que-e-horario-de-pico-e-como-isso-afeta-a-conta-no-final-do-mes/>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GUARIEIRO, L. L. N.; TORRES, E. A.; ANDRADE, J. B. Energia verde. **Ciência Hoje**, Bahia, v. 48, n. 285, p. 36-41, set. 2011.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. Nova York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.

INSTITUTO ACENDE BRASIL (2021). **Matriz elétrica do futuro**: diversificada, dispersa e integrada. White Paper 26, São Paulo, 44 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables**. Paris, 2022. Disponível em <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. Acesso em: 14 maio 2022.

LEAL, M. R. L. V. O potencial de aproveitamento da energia da biomassa. **Inovação Uniemp**, Campinas, v. 1, n. 3, p. 40-41, dez. 2005. Disponível em: http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942005000300024&lng=pt&nrm=is. Acesso em: 02 abr. 2022.

LEITE, C. M. B.; BERNARDES, R. S.; OLIVEIRA, S. A. Método Walkley-Black na determinação da matéria orgânica em solos contaminados por chorume. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 111-115, abr. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662004000100016>.

LEITE, R. C.; CORTEZ, L. A. B. O etanol: combustível no brasil. **Biocombustíveis no Brasil**: Realidades e perspectivas, Brasília, v. 1, n. 1, p. 60-75, jul. 2008. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz702wx5ok0wtedt3xdrmfk.pdf. Acesso em: 28 abr. 2022.

LEÓN, E.; MARTÍN, M. Optimal production of power in a combined cycle from manure-based biogas. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v. 114, p. 89-99, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.002>.

MARI, A. G. **Digestão anaeróbia de dejetos suínos na presença de produtos de limpeza e desinfecção na fase acidogênica**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

MICHELS, A. *et al.* Custo na produção leiteira: um comparativo entre o sistema tradicional e o sistema compost barn em uma propriedade do oeste de Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 26., 2019, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: Abc, 2019. p. 1-16. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/4667>. Acesso em: 12 abr. 2022.

MIHIC, S. Biogas fuel for internal combustion engines. **Annals Of Faculty Engineering Hunedoara**, Hunedoara, v. 2, n. 4, p. 179-190, mar. 2004.

O'CONNOR, S. *et al.* Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on european farms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 139, p. 110580, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110580>.

PAU, F. S. **Análise experimental dos fenômenos da combustão e da emissão de gases em motores a combustão interna utilizando misturas de etanol e gasolina como combustível**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PRACIANO, A. C. *et al.* Contribuição de biodigestores para a agricultura familiar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 1, p. 95-106, mar. 2020.

RAMOS, V. R. **Análise técnica do uso de etanol em um motor de combustão interna para diferentes razões de compressão**. 2019. Monografia (Especialização em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SAE BRASIL. **Fontes de combustíveis renováveis vão substituir combustíveis fósseis nos próximos anos**. 2022. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/noticias/transicao-combustiveis-renovaveis/#:~:text=Fontes%20de%20combust%C3%ADveis%20renov%C3%A1veis%20v%C3%A3o%20substituir%20combust%C3%ADveis%20f%C3%B3sseis%20nos%20pr%C3%B3ximos%20anos,-1%20de%20nov&text=Combust%C3%ADveis%20renov%C3%A1veis%20v%C3%A3o%20substituir%20o%20petr%C3%B3leo%20at%C3%A9%202050>. Acesso em: 19 nov. 2022.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1721>. Acesso em: 29 maio 2022.

SANTOS, I. A.; NOGUEIRA, L. A. H. Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia. **Revista Agroambiental**, Pouso Alegre, v. 4, n. 1, p. 41-49, abr. 2012.

SANTOS, J. G.; CÂNDIDO, G. A. Sustentabilidade e agricultura familiar: um estudo de caso em uma associação de agricultores rurais. **Gestão Social e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 69-85, abr. 2013.

SANTOS, R. M.; RODRIGUES, M. S.; CAMIELLO, M. F. Energia e sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira. **Scientia**, Salvador, v. 6, n. 1, p. 13-33, abr. 2021.

SILVA, F. M. *et al.* Desempenho de um aquecedor de água a biogás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 608-614, set. 2005.

SOUZA, J., SOUZA, S. N. M.; MACHADO, P. R. M. Desempenho de um motor ciclo otto utilizando biogás como combustível. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Proceedings online** [...]. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100044&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 19 Jun. 2022.

SOUZA, S. N. M. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2016.

SUZUKI, A. B. P. *et al.* Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 221-237, mar. 2011.