

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**TAYNARA VALLE BUENO
VICENTE PAULA SANTOS FILHO**

**ESTUDO DE IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS NOS CAMPOS
GERAIS**

PONTA GROSSA

2022

**TAYNARA VALLE BUENO
VICENTE PAULA SANTOS FILHO**

**ESTUDO DE IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS NOS CAMPOS
GERAIS**

Study of implementation of a biogas plant in Campos Gerais

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Luis Alberto Chavez Ayala.

PONTA GROSSA

2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e [4.0 Internacional](#) referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**TAYNARA VALLE BUENO
VICENTE PAULA SANTOS FILHO**

**ESTUDO DE IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS NOS CAMPOS
GERAIS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30/novembro/2022

Luis Alberto Chavez Ayala
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alessandra Cristine Novak Sydney
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Simone Bowles
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos antes de tudo às nossas famílias, que foram e são nossos alicerces durante todo o período da vida. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa por todo o apoio, estrutura e zelo para conosco e nossos colegas durante a graduação. É de suma importância também reconhecer nosso orientador Prof. Me. Luis Alberto Chavez Ayala, que sempre esteve presente e disponível e nos instigou a desenvolvermos o melhor trabalho possível. Ademais, agradecemos a todos que de alguma forma contribuíram para nossa formação e o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O Brasil é um dos países com produção agropecuária mais expressiva no mundo gerando igualmente relevante quantidade de resíduos. Aliado a isto, o cenário global é ímpar: há uma alta dos produtos originados do petróleo, aquecimento global e a grande demanda dos consumidores por produtos sustentáveis. Levando em conta estes fatores surge a oportunidade do biogás, um biocombustível limpo e *waste based*, que além de destinar corretamente os resíduos, promove a descarbonização da propriedade onde foi instalado, redução no consumo de energia elétrica, térmica e veicular. Por meio da caracterização de uma propriedade rural e seus resíduos, o levantamento da demanda energética local e o potencial de produção de metano dos resíduos, este trabalho propôs definir a viabilidade técnica e financeira teórica da implementação de uma planta de biogás. O biodigestor mais adequado para a demanda da propriedade rural foi o do tipo lagoa coberta e foi selecionado um motor gerador de 20 kVA para a transformação de biogás em eletricidade. Além disso, foi calculado um *payback* de 6 meses e VPL positivo de R\$ 87.513,80. A análise final foi que o projeto é viável e ainda geraria um excedente de 1.920,82 kW/mês que poderia ser utilizado para o fornecimento de calor para a propriedade, queima de gás em chuveiros e fogões e até abatimento da conta de luz em outras propriedades com mesmo CNPJ da propriedade rural estudada.

Palavras-chave: biogás; biodigestor; propriedade rural; análise de viabilidade.

ABSTRACT

Brazil is one of the countries with the most expressive agricultural production in the world, generating an equally relevant amount of waste. Allied to this, the global scenario is unique: there is an increase in petroleum products, global warming and the great consumer demand for sustainable products. Taking these factors into account, the opportunity arises for biogas, a clean and waste-based biofuel, which, in addition to correctly disposing of waste, promotes the decarbonization of the property where it was installed, reducing the consumption of electricity, thermal and vehicle energy. Through the characterization of a rural property and its waste, the survey of local energy demand and the potential for methane production from waste, this work proposed to define the theoretical technical and financial feasibility of implementing a biogas plant. The most suitable biodigester for the rural property's demand of the was the flow digester type and a 20 kVA generator engine was selected for the transformation of biogas into electricity. In addition, a payback period of 6 months and a positive NPV of R\$ 87,513.80 was calculated. The final analysis was that the project is viable and would still generate a surplus of 1,920.82 kW/month that could be used to supply heat to the property, burn gas in showers and stoves and even reduce the electricity bill in other properties with the same CNPJ as the rural property studied.

Keywords: biogas; biodigester; rural property; feasibility analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Etapas genéricas do processo de obtenção de biogás.....	17
Figura 2 - Fases metabólicas da digestão anaeróbica	17
Fotografia 1 - Exemplo de método de criação free stall.....	21
Figura 3 - Modelo de processo de biogás	21
Figura 4 - Exemplo de bomba centrífuga	24
Figura 5 - Modelo de biodigestor UASB	25
Figura 6 - Modelo diagrama biodigestor CSTR	26
Figura 7 - Modelo de biodigestor em fase sólida	26
Fotografia 2 - Exemplo de escavação de fossa e aplicação de lona de impermeabilização	27
Fotografia 3 - Exemplo de biodigestor lagoa coberta	28
Quadro 1 - Pontos importantes para a escolha do sistema de biodigestão	28
Quadro 2 - Diferentes processos de dessulfurização	29
Quadro 3 - Diferentes processos de retirada de CO ₂	31
Fotografia 4 - Exemplo de reservatório de digestato	32
Figura 8 - Exemplo do formato do biodigestor lagoa coberta.....	39
Figura 9 - Seção da fossa	40
Figura 10 - Vista frontal do biodigestor para dimensionamento da lona de impermeabilização	41
Figura 11 - Vista lateral do biodigestor para dimensionamento da lona de impermeabilização	41
Figura 12 - Exemplo do arco e ângulo formado no biodigestor para o cálculo do gasômetro.....	43
Fotografia 5 - Exemplo de motor gerador a biogás de 20 kVa	46
Figura 13 - Exemplo da aplicação do dreno.....	48
Fotografia 6 – Vista aérea da propriedade rural estudada.....	51
Figura 14 - Fluxograma proposto para o processo	52
Figura 15 - Exemplo do modelo e dimensões finais do biodigestor	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média de dejetos bovinos, suínos e aves	20
Tabela 2 - Valores ideais para diferentes faixas de volume do biodigestor lagoa coberta	40
Tabela 3 - Levantamento de quantidade, potência, tempo de utilização e consumo diário de equipamentos.....	57
Tabela 4 - Fluxo de caixa do projeto dentro da propriedade rural.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ST	Sólidos Totais
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
CSTR	<i>Continuous stirred tank reactor</i>
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
TRS	Tempo de Retenção de Sólidos
BLC	Biodigestor Lagoa Coberta
PVC	Policloreto de Vinila
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
ONU	Organização das Nações Unidas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
SEMA	Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais
ANP	Agência Nacional do Petróleo
SP	São Paulo
PR	Paraná
VPL	Valor Presente Líquido
VGB	Volume Geométrico da Câmara
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Selic	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia

LISTA DE SÍMBOLOS

Nm^3	Metro cúbico normal
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
H_2	Hidrogênio
P	Pressão
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
C	Consumo elétrico
Q	Quantidade de equipamentos
P	Potência
T	Tempo
W	Watt
kW	Kilowatt
V_c	Volume de carga diária
V_a	Volume de água
V_d	Volume de dejetos
V_{fb}	Volume da fossa do biodigestor
a	Medida da base do trapézio superior
b	Medida da base do trapézio inferior
hf	Altura da fossa
Lf	Comprimento da fossa
Ct	Largura da fossa
Ac	Área do arco
r	Raio do arco
At	Área do triângulo
α	Largura maior do biodigestor
θ	Ângulo do arco
h	Altura do biodigestor
V_g	Volume do gasômetro calculado
L	Comprimento do biodigestor
Carco	Comprimento do arco da lona de vedação
θ_d	Ângulo do arco desejado
Rd	Raio do arco desejado
Avedação	Área da lona de vedação

PdM	Produtividade em m ³ de metano por m ³ do biodigestor ao dia
Bo	Capacidade de produção de metano pelo dejetto
Sv	Concentração de sólidos voláteis
K	coeficiente cinético
μm	Velocidade máxima de crescimento específico
T	Temperatura
PrM	Produção diária de metano
Vbio	Volume do biodigestor
EE	Potencial de geração elétrica
Ef	Eficiência do motor Ciclo Otto
Vk	Valor existente em dado instante k
k	tempo em análise
i	percentual de variação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Biogás e aplicação rural	16
3.1.1	Hidrólise.....	17
3.1.2	Acidogênese.....	17
3.1.3	Acetogênese	18
3.1.4	Metanogênese.....	18
3.2	Fatores que influenciam a produção	18
3.3	Escolha da matéria prima	19
3.3.1	Vegetais lenhosos e não lenhosos.....	19
3.3.2	Dejetos animais.....	20
3.4	Etapas e equipamentos necessários	21
3.4.1	Armazenamento	22
3.4.2	Tratamento	22
3.4.3	Transporte e carregamento	23
3.4.4	Biodigestão.....	24
<u>3.4.4.1</u>	<u>Tipos de biodigestores</u>	<u>24</u>
3.4.5	Purificação.....	29
<u>3.4.5.1</u>	<u>Dessulfurização</u>	<u>29</u>
<u>3.4.5.2</u>	<u>Secagem</u>	<u>30</u>
<u>3.4.5.3</u>	<u>Retirada de CO₂</u>	<u>30</u>
3.6	Digestato	32
3.7	Normas e legislações	33
4.	METODOLOGIA	35
4.1	Caracterização e volume do resíduo	35
4.2	Informações sobre a propriedade	36
4.3	Planejamento do projeto	36
4.4	Consumo energético da propriedade	37
4.5	Análise para implementação física	37
4.6	Dimensionamento do biodigestor	38
4.6.1	Dimensionamento da fossa	38

4.6.2	Dimensionamento do gasômetro.....	42
4.7	Potencial de produção de metano	44
4.8	Potencial de produção de biofertilizante	46
4.9	Bombas e motores.....	46
4.10	Produção elétrica	47
4.11	Purificação do biogás.....	47
4.12	Layout da planta.....	48
4.13	Análise econômica.....	48
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
5.1	Caracterização da propriedade	50
5.2	Caracterização dos resíduos disponíveis	51
5.3	Fluxograma de processo proposto	52
5.4	Escolha do biodigestor	53
5.5	Dimensionamento do biodigestor	54
5.6	Potencial de geração de biogás.....	55
5.7	Dimensionamento do gasômetro.....	56
5.8	Balanco de consumo energético	56
5.9	Geração de biofertilizante	58
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
	REFERÊNCIAS.....	63

1. INTRODUÇÃO

O uso de fontes fósseis de energia está potencializando a degradação do meio ambiente, pois geram grande quantidade de poluentes e gases que intensificam o efeito estufa (NRDC, 2022). Não obstante, como foi observado durante a guerra entre Rússia e Ucrânia em 2022, a dependência excessiva de fontes fósseis para a geração de energia é muito prejudicial para a soberania de um país e pode desacelerar toda sua economia (ZETTELMAYER *et al.*, 2022)..

Além dos pontos supracitados, como o aumento da demanda energética está relacionado com o crescimento econômico e desenvolvimento de um país, o mercado está voltando seus olhos para alternativas sustentáveis, visando o desenvolvimento responsável. Uma alternativa crescente é o uso do biogás para geração de energia elétrica e veicular (SOUZA, 2018).

Segundo publicação no site de projetos de extensão da Universidade da Pensilvânia (2014), a história da utilização dos gases provenientes da digestão de matéria orgânica data de muito tempo atrás. O médico e químico Jan Baptista Van Helmont foi o primeiro a determinar – no século XVII – que gases inflamáveis poderiam ter sido originados de matéria orgânica em decomposição. Já o químico Alessandro Volta concluiu que existia uma relação direta entre quantidade de gás inflamável produzido e matéria orgânica utilizada e em 1808 Sir Humphry Davy determinou que o processo de digestão anaeróbica de dejetos de gado continha metano.

O metano é o principal componente (50%-75%) do biogás, mas além dele temos dióxido de carbono (25%-50%) e alguns gases traço, além de pequenas quantidades de hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio (ROHSTOFFE, 2010). O biogás é produzido pelo processo de digestão anaeróbia de matérias orgânicas e sempre está acontecendo na natureza, seja em pântanos com uma grande quantidade de matéria orgânica submersa, no rúmen de animais ruminantes ou até mesmo em esterqueiras. A diversidade de microrganismos faz com que quase toda a matéria orgânica seja transformada em gás. Além do biogás, calor e mais biomassa são produzidos (ROHSTOFFE, 2010).

Levando em conta que toda matéria orgânica pode gerar biogás de alguma forma, temos algumas regiões do planeta que são pioneiras e já apresentam produções exponenciais de biogás e até biometano (forma purificada do biogás), como é o caso da Europa, que desde 1997 possui uma política de energias renováveis

(SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018) e em 2011 se comprometeu a reduzir em 80-90% suas emissões de gases de efeito estufa (EUROPEAN COMISSION, 2011). Estas medidas fizeram com que o continente europeu fosse, junto com os Estados Unidos, o maior produtor de biogás do mundo (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018).

Embora a Europa possua uma produção massiva de biogás, é no Brasil onde um dos maiores potenciais de produção de encontra. Segundo o Biogás MAP – ferramenta de diagnóstico desenvolvida pela CIBiogas (2021) –, apesar do Brasil já contar com 811 plantas e uma produção de biogás de 2,82 bilhões (Nm^3/Ano), esta produção é concentrada nas regiões sul e sudeste (CIBIOGAS, 2021) e é irrisória perto do potencial de 82,58 bilhões (Nm^3/Ano) presente no país (ABIOGAS, 2021). Logo, há grandes oportunidades de difundir a tecnologia pelo resto do país – que possui uma enorme atividade agroindustrial.

Mesmo com este potencial os produtores rurais especificamente de médio porte ainda não mostram uma adoção em massa do processo de digestão anaeróbia (CIBIOGAS, 2021). São necessários cada vez mais mecanismos e estudos de como adaptar conceitos e processos complexos para a realidade de cada região a fim de entender a viabilidade de implementação de um projeto e suas posteriores etapas.

Ademais, o cenário atual do aquecimento global, o alarmante relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) – que alerta que para mantermos a elevação da temperatura em $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ precisamos parar de aumentar nossas emissões até 2025 – aliados à grande tendência de os consumidores preferirem comprar produtos sustentáveis (MERCADO & CONSUMO, 2021), a segurança energética e a imensa oportunidade de o Brasil aumentar sua produção de energia renovável comprovam a grande relevância do tema deste trabalho, que visa facilitar a discussão de implementação de novas fontes de energia renovável no agronegócio.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade de implementação de uma planta de biogás em uma propriedade rural.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o potencial teórico de geração de metano dos resíduos animais e agroindustriais presentes na propriedade rural estudada;
- Propor um layout da produção e dimensionamento do biodigestor e gasômetro;
- Analisar consumo energético e viabilidade financeira do projeto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biogás e aplicação rural

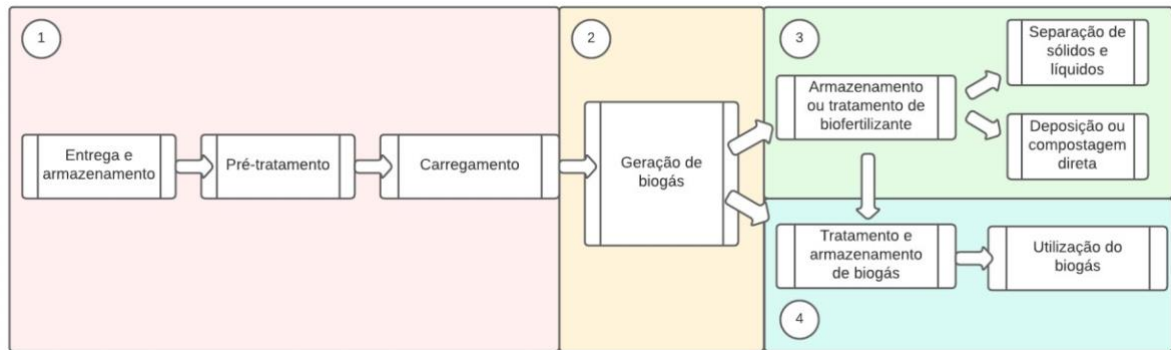
O biogás é uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). O primeiro é predominante e classificado como gás inflamável. Por isso, o biogás é amplamente usado na indústria energética como combustível. Seu processo de obtenção e uso gera benefícios para diversas propriedades rurais, tanto em relação a custo, posicionamento ambiental, reaproveitamento de matéria orgânica e geração de biofertilizantes (GROSBELLI, 2018).

Em uma propriedade rural, o gás gerado por meio da digestão anaeróbica pode ser utilizado para diversas finalidades, como: combustível para veículos, aquecimento de galpões onde os animais são abrigados, fogões domésticos, aquecimento de água para banho etc (DEGANUTTI *et al.*, 2008). Em resumo, o biogás, dependendo do seu nível de tratamento, pode substituir o gás natural em todos os seus usos e também gerar energia térmica ou elétrica.

3.3 Forma de obtenção

A produção desse gás é realizada a partir da digestão anaeróbica de substratos orgânicos, podendo ser eles de origem animal ou vegetal. Esse processo metabólico é visto como bioquimicamente complexo já que depende da atividade de diversos microrganismos que transformam a matéria orgânica em produto. Por isso, esse processo é dividido em etapas (Figura 1), a de pré-fermentação que preparam as matérias primas e pós-fermentação que manipulam os produtos gerados (ROHSTOFFE, 2010).

Figura 1- Etapas genéricas do processo de obtenção de biogás



Fonte: Adaptado de Rohstoffe (2010)

A digestão é realizada em quatro fases metabólicas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 2). A porcentagem de produtos e subprodutos formados nesse processo é variável de acordo com o substrato usado, tempo de reações e condições térmicas durante o processo (GROSBELLI, 2018).

Figura 2 - Fases metabólicas da digestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de Grosbelli (2018)

3.1.1 Hidrólise

Na etapa de hidrólise, enzimas que são excretadas por bactérias hidrolíticas degradam moléculas de alto peso molecular em meio aquoso, tais como carboidratos, proteínas e lipídios. Essa reação bioquímica gera substâncias orgânicas menos complexas, com menor cadeia carbônica. O tempo desse processo é influenciado pelas características do substrato escolhido, sendo maior quando a porcentagem de proteínas e lipídios é alta, já que a degradação desses compostos é lenta e ocorre frequentemente de forma incompleta (PIGOSSO *et al.*, 2022).

3.1.2 Acidogênese

Com a quebra da matéria orgânica no processo de hidrólise, as moléculas formadas são solúveis e aptas a serem consumidas pelas bactérias anaeróbicas e facultativas, ocorrendo a fase da acidogênese. Esse processo fermentativo gera

principalmente ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois, óxidos de nitrogênio, hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂). Em especial, há formação de ácido acético, principal fonte de carbono consumida por microrganismos que produzem metano (arqueas metanogênicas). Nessa fase, a pressão parcial do hidrogênio afeta os produtos gerados, se ela for elevada o processo produzirá moléculas com maior número de carbonos em sua cadeia (EDWIGES, MULLER e MARTINEZ, 2020).

3.1.3 Acetogênese

Na etapa de acetogênese, considerada como crítica, haverá a quebra dos ácidos de maior cadeia em ácidos com menos átomos de carbono (fórmico ou acético). As responsáveis por essas reações são as bactérias acetogênicas, que possuem uma relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas (PIGOSSO *et al.*, 2022).

3.1.4 Metanogênese

Como fase final, ocorre a produção de metano e dióxido de carbono a partir da quebra dos ácidos formados anteriormente. Esse processo ocorre em condições anaeróbicas e tem a presença de duas principais bactérias que realizam esse processo: as acetocláticas que utilizam o acetato como fonte de energia e as hidrogenotróficas que metabolizam hidrogênio e dióxido de carbono na produção de metano. Assim como nas fases anteriores, as condições de parâmetros devem ser equilibradas, como o pH, agitação, temperatura, e alimentação dos equipamentos (EDWIGES, MULLER e MARTINEZ, 2020).

3.2 Fatores que influenciam a produção

Os principais agentes que influenciam o processo produtivo de biogás são: estrutura da molécula digerida (resíduos lignocelulósicos, por exemplo, possuem estruturas fibrosas de difícil ruptura), pH, temperatura e tempo de digestão. O pH do processo deve ser neutro ou levemente superior, entre 7,0 e 8,5. Já a temperatura do processo deve ser regulada de acordo com os microrganismos ali presentes. Portanto, deve estar em torno de 37°C para as fases em que as bactérias mesofílicas estão atuando e de 55°C para as termofílicas. Caso contrário, elas podem ser inibidas e a produção será afetada. O processo produtivo deve ter longo tempo de retenção

hidráulica, com aproximadamente 10 e 25 dias, dependendo da carga orgânica, volume de dejetos adicionado ou da temperatura mantida. Como a fermentação depende da quantidade de matéria orgânica presente, quanto mais sólidos voláteis, maior será a produção de gás (ALVES JUNIOR, 2019).

3.3 Escolha da matéria prima

A escolha do substrato por sua composição química e física é de grande importância para a dinâmica da digestão, pois diferentes tipos de moléculas trazem características diferentes ao processo. Substratos com partículas grandes, como partes de frutas, e cadeias muito complexas podem limitar a etapa da hidrólise e afetar a produção de metabólitos intermediários – que servem de fonte de energia e nutrientes para as bactérias arqueas metanogênicas. Em contrapartida, quando possuímos um substrato com um teor de carboidratos alto (ex: amilose e pectina), a etapa da hidrólise é favorecida, o que também contribui para a acidificação do sistema, podendo acarretar a paralização da metanogênese (EDWIGES, MULLER e MARTINEZ, 2020).

Quando escolhermos a melhor combinação de substratos, garantimos uma digestão mais eficiente, mais controle no processo produtivo e um digestato de melhor qualidade. No Brasil, dejetos animais, efluentes domésticos e agroindustriais, resíduos sólidos urbanos e resíduos da agricultura figuram entre as principais matérias orgânicas utilizadas para a digestão anaeróbica e entendê-las é essencial para a determinação da melhor combinação para a digestão (EDWIGES, MULLER e MARTINEZ, 2020).

3.3.1 Vegetais lenhosos e não lenhosos

Os vegetais representam uma porcentagem significativa na geração de resíduos e seu tipo pode alterar substancialmente o modo como são utilizados e processados na digestão anaeróbica. Os vegetais lenhosos são aqueles capazes de produzir madeira como material de suporte (SENAI, 2016), como por exemplo o eucalipto. Neste tipo de cultura os resíduos são comumente destinados à queima em caldeiras ou utilizados para renutrir o solo de onde foi retirada (PAES, *et al.*, 2013).

Os vegetais não lenhosos por sua vez, não possuem lignina mas sim diferentes tipos de tecido de armazenagem, como: sacarídeos (sacarose), celulósicos, amiláceos (amido), oleaginosas e aquáticos. Esta categoria de vegetal é tipicamente produzida a partir de cultivos anuais e apresentam maior teor de umidade do que os lenhosos (NOGUEIRA e LORA, 2003).

3.3.2. Dejetos animais

Embora muito promissores, este tipo de resíduo ainda sofre do manejo incorreto – como o descarte direto no solo – que pode acarretar o excesso de nutrientes, patógenos, metais, entre outros (PILLON *et al.*, 2003). Esse cenário se agrava ainda mais pelo fato de o Brasil possuir uma produção pecuária expressiva e segundo o IBGE (2020) só no ano de 2020 possuir cerca de 1,5 bilhões de cabeças de galináceos, 218 milhões de bovinos e 41 milhões de suínos.

Os dejetos animais apresentam um grande potencial para a produção de biogás, pois além de ser relativamente fácil de ser tratado/ consumido, este tipo de biomassa pode ser gerado em grande volume, possui um bom equilíbrio de componentes orgânicos (proteínas, carboidratos e lipídeos) e grande disponibilidade de nitrogênio, fator esse que favorece a reprodução dos microrganismos (EDWIGES, MULLER e MARTINEZ, 2020). A Tabela 1 apresentada a seguir demonstra a composição química média de dejetos de bovinos, suínos e aves.

Tabela 1 - Composição química média de dejetos bovinos, suínos e aves

Tipo de dejetos	Sólidos Totais (%)	Sólidos Voláteis (%)	Proteína (%ST)	Lipídeo (%ST)
Dejeto bovino	8	80	9	3
Dejeto suíno	4	75	11	12
Dejeto aves	20	75	10	3

Fonte: Adaptado de EDWIGES, MULLER e MARTINEZ (2020)

Apesar de possuir uma porcentagem maior de sólidos voláteis, os dejetos bovinos não são os que mais tem potencial de produção de metano. Isso se deve pois em comparação com outros tipos de resíduos de animais, ele possui baixa degradabilidade (rico em material lignocelulósico por causa da dieta do bovino) e é pobre em seu teor de amônia (EDWIGES, MULLER e MARTINEZ, 2020). Entretanto, é importante ressaltar que realizar uma previsão das características químicas e físicas, juntamente com o potencial de produção de biogás de resíduos animais pode ser

difícil, pois a alimentação, modo de confinamento e frequência de lavagem do local podem alterar as características da matéria orgânica final (VIANCELLI *et al.*, 2019).

Pensando em produção leiteira, segundo Mota *et al.* (2017), as fazendas optam pelo confinamento de seus animais para aumentar a capacidade produtiva. Esse oferece um ambiente controlado para o animal e com coleta diária dos dejetos. As principais instalações utilizadas atualmente são: *Tie Stall*, *Loose Housing* e *Free Stall* (Fotografia 1). A diferença entre elas é a disposição das camas e área comum, sendo o último modelo o mais disseminado no Brasil.

Fotografia 1 – Exemplo de método de criação free stall

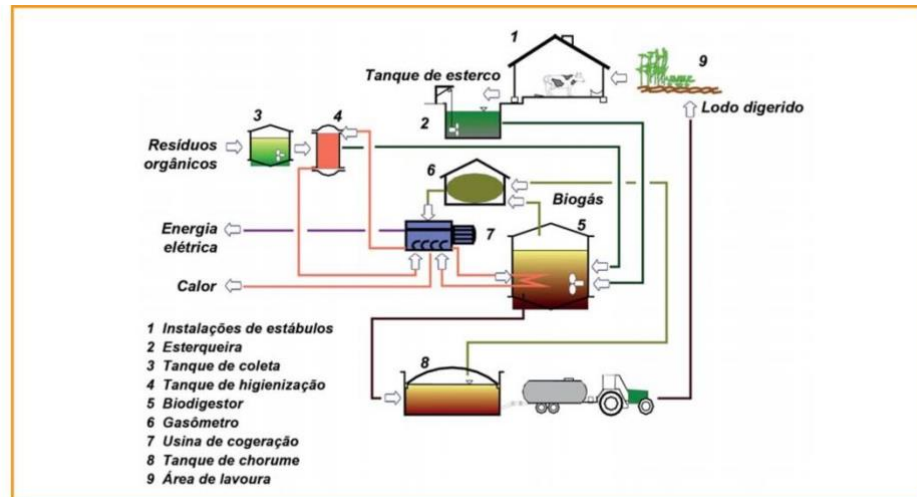


Fonte: Agro 2.0 (2019)

3.4 Etapas e equipamentos necessários

Por conta da alta variabilidade possível de resíduos orgânicos, a produção de biogás possuirá características específicas para cada configuração de substrato. Em usinas utilizando um material com alto teor celulósico, por exemplo, será necessária uma robusta etapa de pré-tratamento destes resíduos, quebrando a celulose em moléculas mais aptas a serem digeridas (GOMES, 2019). Portanto, uma planta geral de produção de biogás utilizando dejetos orgânicos possui a seguinte configuração apresentada na Figura 3:

Figura 3 - Modelo de processo de biogás



Fonte: Guia do Biogás (2010)

3.4.1 Armazenamento

Para manter-se a digestão em um volume constante, faz-se necessário algum reservatório de resíduos que possa armazenar uma quantidade suficiente para manter o digestor em funcionamento em períodos entre algumas horas e dois dias. O tamanho do reservatório precisa ser dimensionado e caracterizado a partir do volume de resíduo necessário para o funcionamento da operação (ROHSTOFFE, 2010).

Outro ponto que deve ser levado em consideração para a definição do método de armazenamento é a presença ou não de resíduos que precisem de higienização, devendo estes não serem misturados com resíduos já desinfectados, com risco de contaminação do inóculo. Ademais, o odor é frequentemente apontado como um "contra" no momento de analisar a implementação de um projeto de biogás. Uma forma de mitigar este risco é a inserção das etapas iniciais do processo dentro de galpões. Estes podem ser equipados com filtros biológicos e lavadores que impedem o maior volume de odores de escapar do local. Além de evitar os odores, a implementação de um projeto abrigado em um galpão é a possibilidade de melhor proteger os equipamentos contra as intempéries (ROHSTOFFE, 2010).

3.4.2 Tratamento

As etapas que antecedem a fermentação são de suma importância para melhorar a disponibilidade de nutrientes para os microrganismos. Conseqüentemente,

um processo de digestão que consiga ser contínuo e maximizado irá trazer melhores retornos financeiros (ROHSTOFFE, 2010).

O processo de tratamento geralmente compõe-se de: remoção de materiais estranhos, fragmentação do resíduo, mistura, higienização e desintegração. A remoção de materiais estranhos que podem ser pedras, resíduos presentes em descartes orgânicos, entre outros sólidos, é importante para evitar danificar equipamentos como bombas e tubulações. Esta remoção é comumente realizada através de separadores de materiais pesados ou peneiras acopladas à tubulação (ROHSTOFFE, 2010).

Tanto a fragmentação de resíduos quanto a desintegração são etapas feitas para aumentar a disponibilidade de nutrientes dentro do substrato e embora facilitem a digestão, não necessariamente aumentarão o rendimento. A fragmentação utiliza de picadores, moinhos e eixos e transportadores helicoidais dotados de dispositivos de corte e dilaceramento. Estes dispositivos podem ser posicionados externamente, antes do ponto de carregamento no tanque de carga, canalização ou biodigestor. Já a desintegração é a destruição da parede celular e é realizada através de processos químicos, bioquímicos, físicos e térmicos. Alguns exemplos de desintegração são o aquecimento, hidrólise, adição de enzimas ou desintegração ultrassônica (ROHSTOFFE, 2010).

O processo de mistura por sua vez consiste em homogeneizar o substrato e é diferente para cada tipo de digestão.

3.4.3 Transporte e carregamento

Segundo o Guia Prático do Biogás (2010), do ponto de vista de processos biológicos, a maneira mais correta de obter-se um processo biológico estável é existir um fluxo de alimentação contínuo. Como tal fluxo é raramente observado em prática, o recomendado é que ele seja pelo menos semi-contínuo, com o substrato sendo adicionado em várias cargas dosadas durante o dia.

Tais cargas podem ter características sólidas ou líquidas, e este ponto determinará toda a estrutura de transporte e carregamento. Substratos mais líquidos geralmente podem ser bombeáveis (bomba centrífuga e de deslocamento positivo) e estas bombas (Figura 4) e encanamentos podem ser automatizados. Já em substratos

sólidos (empilháveis), podem ser utilizadas esteiras, carregadeiras, reboques ou até em bombas de lóbulos (ROHSTOFFE, 2010).



Fonte: Armário da Engenharia Química UEM (2014)

3.4.4 Biodigestão

Ponto central de todo o projeto de digestão anaeróbia, o biodigestor deve ser escolhido especificamente para atender o tipo de substrato utilizado, localização geográfica e investimento financeiro disponível do projeto.

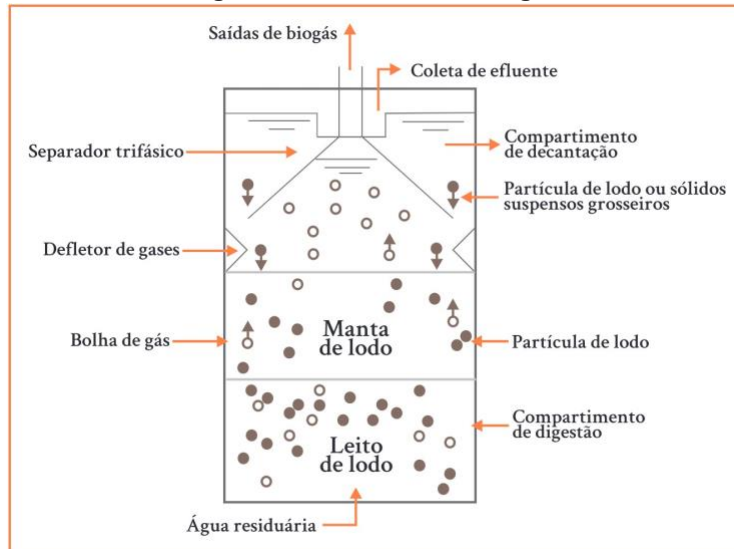
3.4.4.1 Tipos de biodigestores

Existem diferentes critérios para classificar os biodigestores. Dentro do relatório do SENAI sobre oportunidades em biogás no estado do Paraná (2016), por exemplo, os biorreatores são separados entre os de baixa, média e alta taxa. Já para Pigozzo *et al.* (2022), os biorreatores podem primariamente ser caracterizados por sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura), concentração de sólidos na digestão (digestão sólida >20%, semissólida 10% a 15% e úmida <10%), forma de alimentação (ascendente ou laminar) e regime de alimentação (batelada ou contínuo).

O *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) é um modelo de biodigestor holandês (Figura 5), foi desenvolvido na década de 70 e se caracteriza por obter um separador de fases que divide o processo em duas partes: uma inferior ou zona de digestão (leito e manta de lodo responsável pela digestão) e uma superior ou zona de

sedimentação (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994; POMPERMAYER; PAULA JUNIOR, 2000).

Figura 5 - Modelo de biodigestor UASB



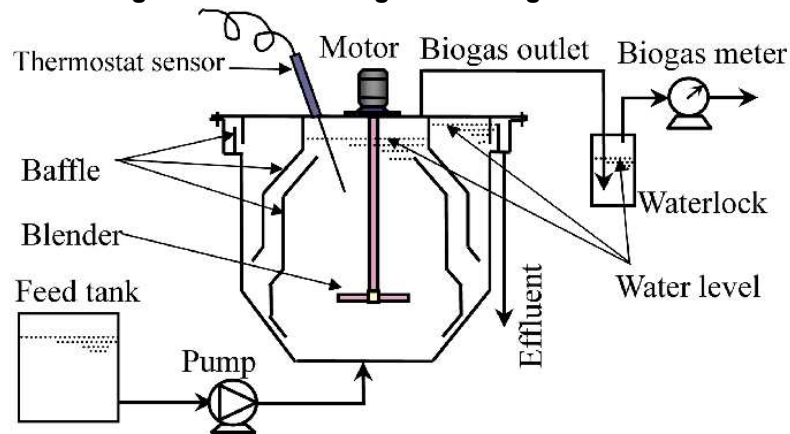
Fonte: Fundamentos da Digestão Anaeróbia (2019)

O biorreator UASB possui várias vantagens como: baixa demanda de área e energia, baixo custo de implementação, tolerância a elevadas cargas orgânicas e baixo consumo de nutrientes (ALVES, 2007). Um ponto negativo deste modelo é que devido a sua natureza ele apenas suporta uma baixa concentração de sólidos totais (<2%), o que inviabiliza uma digestão de dejetos animais sem acontecer antes um pré tratamento (PIGOSSO *et al.*, 2022).

O *Continuous stirred tank reactor*, ou CSTR é um dos modelos mais utilizados na Europa e também um dos mais tecnológicos (Figura 6). Ele geralmente conta com controle de temperatura e agitação e aguenta altas cargas volumétricas. Para este tipo de biodigestor o tempo de retenção hidráulica (TRH) e o tempo de retenção de sólidos (TRS) é igual pois presume-se que não há acúmulo de lodo.

Como este modelo possui sistemas mais avançados de controle, os custos com manutenção de mão de obra especializada são maiores, mas a produtividade também aumenta, já que a agitação melhora a distribuição de nutrientes para os microrganismos, evita o acúmulo de lodo e o controle de temperatura garante que as bactérias estão sempre em um nível ótimo de atuação (PIGOSSO *et al.*, 2022).

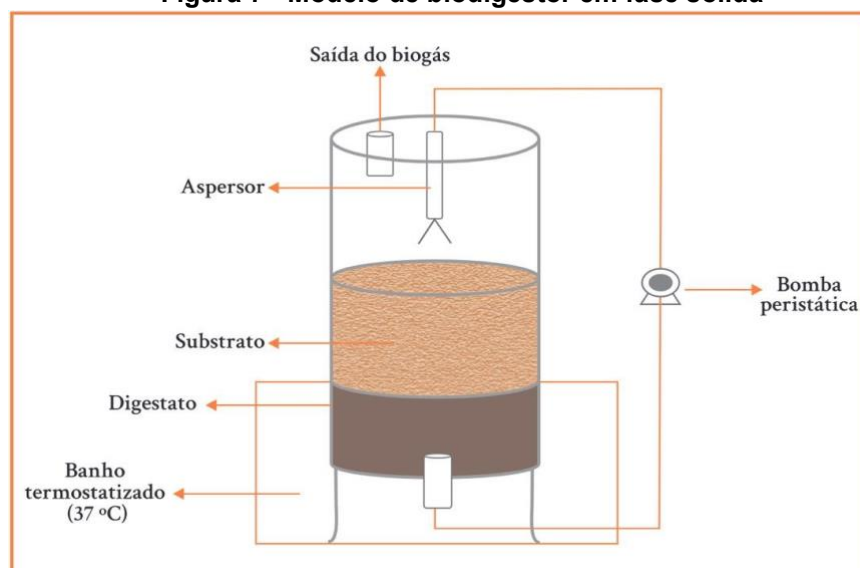
Figura 6 - Modelo diagrama biodigestor CSTR



Fonte: Metabolic pathways of hydrogen production in fermentative acidogenic microflora

O biodigestor em fase sólida é uma alternativa que funciona em sistema batelada (Figura 7). Aqui acontece um carregamento por vez, que antes de ser substituído é totalmente digerido. Sua alimentação é geralmente composta por uma fração de 20% a 40% de sólidos e o substrato é adicionado juntamente do inóculo. Algumas características deste modelo são: biodigestor com um volume menor, não necessita de grandes diluições ao substrato, precisa ser aberto para manutenção (CIBIOGAS, 2020) e precisa de bombas para a recirculação do lixiviado. O tempo de digestão depende do tipo de substrato utilizado e pode variar de 2 a 4 semanas (PIGOSSO *et al.*, 2022).

Figura 7 - Modelo de biodigestor em fase sólida



Fonte: Fundamentos da Digestão Anaeróbia (2019)

Por fim, temos o modelo lagoa coberta. Nesta configuração é escavado uma lagoa no solo e impermeabilizado e coberto com material geossintético (Fotografia 2) que pode ser Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno de Alta Densidade (PEAD), etc. Estes materiais possuem baixa permeabilidade a gases e fluidos, e permitem acumular biogás devido a sua flexibilidade. Sua seção é trapezoidal, sua base retangular e a talude varia de acordo com a inclinação do terreno e características do solo (KUNZ *et al.*, 2019).

Segundo Pigosso *et al.* (2022), este é um dos tipos mais utilizados de biorreatores quando o dejetos é proveniente de origem animal. Isto se deve principalmente ao seu baixo custo de implementação e baixa necessidade de tecnificação em sua gestão. Alguns problemas que podem surgir neste modelo de biodigestor é o acúmulo de lodo em seu fundo, devido à falta de agitação e alta % de sólidos no substrato. Um exemplo do biodigestor BLC (ou canadense) pode ser visto abaixo (Fotografia 3):

Fotografia 2 - Exemplo de escavação de fossa e aplicação de lona de impermeabilização



Fonte: Geomembrana (2019)

Fotografia 3 – Exemplo de biodigestor lagoa coberta



Fonte: Recolast Ambiental (2018)

Abaixo (Quadro 1) encontra-se um comparativo entre pontos-chave para a escolha do biorreator.

Quadro 1 – Pontos importantes para a escolha do sistema de biodigestão

Tecnologia	Pontos-chave	Opções
Sistema de alimentação	Tipo de biodigestor e de matéria-prima para alimentação	Alimentação descontínua para biodigestores de batelada. Alimentação contínua ou semicontínua para fluxo em pistão/digestores CSTR. Sistema de alimentação sólido ou líquido, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato.
Temperatura do reator	Risco para patógenos*	Temperatura mesofílicas quando não há risco de patógenos. Temperaturas termofílicas quando houver risco de patógenos (ex.: lixo orgânico doméstico).
Número de fases	Composição de substratos, risco de acidificação	Sistemas de uma fase quando não há risco de acidificação. Sistema de duas fases para substratos com um elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação.
Sistema de agitação	Matéria-prima seca para alimentação	Agitadores mecânicos para alta concentração de sólidos no biodigestor. Sistemas de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor.

Fonte: PIGOSSO et al. (2022)

3.4.5 Purificação

Segundo Rohstoffe (2010), após todo o processo de digestão ainda são necessárias etapas de purificação do biogás. Estes processos são balizados pela utilização final do gás. Os principais processos de purificação são: dessulfurização, secagem e retirada de dióxido de carbono (CO₂).

3.4.5.1 Dessulfurização

O processo de dessulfurização é de extrema importância para que o gás não cause danos às estruturas do sistema. O sulfeto de hidrogênio (H₂S) em conjunto com a água forma ácido sulfúrico (H₂SO₄), substância altamente corrosiva que danifica os motores e tubulações. Além disso, o enxofre presente possui um forte odor de ovo podre (ROHSTOFFE, 2010).

Para retirada do sulfeto de hidrogênio, são possíveis algumas metodologias (Quadro 2). Uma das mais simples é a dessulfurização biológica. Através da bactéria aeróbia *Sulfobacter oxydans*, o sulfeto de hidrogênio é convertido em enxofre elementar, que é destinado junto ao digestato como biofertilizante (ROHSTOFFE, 2010). Um ponto de atenção é que as superfícies presentes dentro de um biodigestor normalmente não são suficientes para a fixação e crescimento das bactérias. Uma possível solução é a instalação de redes acima do nível dos resíduos para a fixação destes microrganismos.

Quadro 2 – Diferentes processos de dessulfurização

Metodologia	Injeção de ar	Pureza do gás em partes por milhão em volume (ppmv)	Problemas comuns
Biodessulfurização no digestor	Não	50-2.000	Falta de exatidão no controle do processo
Biodessulfurização externa	Não	50-100	Falta de exatidão no controle do processo
Lavador biológico de gás	Não	50-100	Complexidade elevada
Precipitação de sulfeto	Não	50-500	Processo lento
Dessulfurização química interna	Não	1-100	Efeito purificador reduzido drasticamente

Carvão ativado	Sim	<5	Grandes quantidades eliminadas no processo

Fonte: Adaptado do Guia Prático do Biogás (2010)

3.4.5.2 Secagem

Em um biodigestor a umidade relativa de água é de 100% (completamente saturado). Semelhantemente à etapa anterior, a secagem é muito importante para evitar desgastes e atender as exigências de etapas de purificação subsequentes.

Exemplos de processos de secagem são: condensação, adsorção e absorção. A condensação consiste na precipitação da água pela separação do biogás abaixo do ponto de orvalho. O biogás já é normalmente resfriado nas tubulações por onde é transportado e distribuído. Se estas tubulações forem instaladas com uma certa inclinação o condensado pode ser recuperado em um purgador de vapor em seu ponto mais baixo.

Para a adsorção, são utilizados zeólitos, gel de sílica ou óxido de alumínio. Estes materiais podem ser regenerados posteriormente a quente ou a frio e possibilitam o atingimento de um ponto de orvalho de até -90°C . Graças aos ótimos resultados proporcionados, esse processo se destina a qualquer tipo de uso do biogás (ROHSTOFFE, 2010).

3.4.5.3 Retirada de CO₂

Esta etapa é realizada sobretudo quando a intenção de uso do gás é a injeção no sistema de gás natural. Isso se deve principalmente para atender o nível de pureza demandado e o poder comburentes que o metano combustível necessita (ROHSTOFFE, 2010). O Quadro 3 apresenta as principais diferenças entre os processos de retirada de CO₂.

Quadro 3 – Diferentes processos de retirada de CO₂

Metodologia	Princípio de ação	Teor de CH₄ possível	Recorrência de implantação
Adsorção com modulação de pressão (PSA)	Adsorção e dessorção físicas e alternadas por modulação de pressão	>97%	Alta
Lavagem com água sob pressão	Absorção física com água como solvente; regeneração por redução da pressão	>98%	Alta
Tratamento com aminas	Absorção química por meio de soluções aquosas de aminas, regeneração por vapor d'água	>99%	Média
Lavagem Genosorb	Análoga à lavagem com água sob pressão, com Genosorb (ou Selexol) como solvente	>96%	Baixa
Processo de separação por membranas	Gradiente de pressão em membranas porosas para separação de gás; ou velocidade de difusão de gases	>96%	Baixa
Processo criogênico	Liquefação de gases por retificação, separação em temperaturas criogênicas	>98%	Apenas pilotos

Fonte: Adaptado do Guia Prático do Biogás (2010)

3.5 Conversão do Biogás

O uso do biogás para fins energéticos pode ser dar por combustão direta, conversão elétrica ou como combustível veicular. No primeiro caso, a destinação é para abastecimento de GLP residencial ou usar sua queima em outro processo, como em caldeiras. No segundo, pode-se realizar o uso elétrico para a rede de energia e alimentação de motores, bombas e demais equipamentos movidos a eletricidade. É orientada a criação de uma central de conversão com microturbinas ou motores de combustão interna, acompanhados de geradores de corrente alternada. Já para o uso veicular também se faz necessário adaptações no automóvel, principalmente no motor de combustão (AL SEADI, 2008).

Os motores de combustão interna e turbinas são responsáveis por fazer a conversão de energia química em mecânica. Os mais utilizados em propriedades

rurais são os de Ciclo Otto, dado pela compressão do biogás e ar em uma câmara, provocando combustão e conseqüente movimento dos pistões. Em paralelo, pode-se aproveitar o calor expelido desse processo para outro fim, realizar uma cogestão da energia térmica de produção, inclusive para o aquecimento do próprio biodigestor (SUZUKI *et al.*, 2011).

3.6 Digestato

Na digestão anaeróbica, quase toda a matéria orgânica é consumida, mas o processo ainda gera um subproduto rico em nitrogênio, fósforo e potássio. Esse resíduo, nomeado digestato (Fotografia 4), pode se formar tanto sólido quanto líquido e deve ter uma destinação correta, orientada pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Quando depositada erroneamente no meio ambiente pode gerar poluição do solo, danos hídricos influenciando o ciclo do oxigênio, eutrofização e até mesmo danos à saúde humana, prejudicando as hemoglobinas de nosso corpo ou formando complexos carcinogênicos (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

Fotografia 4 – Exemplo de reservatório de digestato



Fonte: Embrapa (2018)

Segundo o e-book da Organização das Nações Unidas (ONU) para o Desenvolvimento Industrial (2022), pode ser necessário a separação do digestato em porções líquidas e sólidas. Quando os sólidos são maiores que 1mm é indicado o uso

de peneiras e prensas, quando menores, o uso de decantação ou centrifugação são orientados. O destino da fração sólida pode ser destinado ao solo, como fertilizante ou condicionador, enviado para compostagem ou comercializada, seguindo normas do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Em caso de compostagem, o benefício é que as bactérias aeróbicas irão degradar o que as anaeróbicas não conseguiram e aqui o sistema se auto esteriliza, já que o processo aeróbico atinge temperaturas maiores que 60°C.

Em caso de comercialização, o produto deve seguir a IN MAPA 61° 61/2020, obtendo rótulo com especificações dos nutrientes ali presentes, inclusive valor de umidade e nitrogênio presente. Deve ser um produto estabilizado e sem patogênicos.

Já o digestato Líquido pode ser utilizado como biofertilizante, reutilizado no processo de digestão ou tratado para o descarte em esgoto. Para esta finalidade, seria necessária uma estação de tratamento e reagente químicos. Em caso de reutilização, tem o benefício de reintroduzir bactérias no sistema, mas requer análises e cuidado técnico já que a alta quantidade de amônia pode inibir o desenvolvimento de algumas bactérias (ONU, 2022). Por isso, o uso do digestato como fertilizante traz grandes benefícios para propriedades rurais, podendo substituir adubação química e reduzir custos com tais suprimentos, além de proporcionar destinação correta e sustentável do resíduo animal, fechando o ciclo do nutriente. Além disso, o desempenho desse é maior do que se utilizasse diretamente o dejetos como adubo, já que com a fermentação os microrganismos transformam os nutrientes mineralizados e grandes moléculas em compostos suscetíveis a absorção vegetal (AL SEADI *et al.*, 2013).

A porcentagem dos nutrientes varia de acordo com diversos fatores, como o tipo de dejetos utilizado, biorreator escolhido, eficiência do pré-tratamento, entre outros fatores relacionados ao processo de obtenção do metano. A recomendação é que se façam análises no digestato para a quantificação final desses compostos, assim o agricultor pode usar essa biomassa como fertilizante em quantidades adequadas, sem prejudicar sua plantação por quantidades excessivas de nutrientes ou causar danos ambientais (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

3.7 Normas e legislações

O processo de biodigestão e descarte de resíduos devem seguir alguns parâmetros ou normas, como a ISO 13641 que rege a qualidade de água, ISO

11734:1995 que visa a avaliação e produção da fermentação anaeróbica, VDI 4630 que orienta sobre materiais orgânicos, entre outras normas vigentes (KUNZ, 2019). Não se pode descartar os cuidados ambientais que o produtor deve ter, como o cuidado com a água com sua resolução especificada pela CONAMA ou licenças ambientais para criação de animais determinadas pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP) na resolução SEMA (GROSBELLI, 2018).

Com a expansão do uso energético através do biogás, diversas entidades criaram programas de incentivo para o setor. Como o caso do Programa RenovaBio, Plano Decenal de Expansão de Energia 2026, Resolução ANP 08/2015, Decreto nº 58659/2012 - SP e Lei nº 19500/2018 - PR. Sendo as duas primeiras estratégias para aumentar o uso dessas energias renováveis e as 3 últimas parâmetros e legislações que regem a produção e utilização do biometano (ALVES, 2019).

3.8 Consumo energético e viabilidade de investimento

Para a análise de viabilidade de um projeto, não basta estudar apenas a capacidade técnica, é necessário entender se financeiramente o investimento terá retorno. Para isso, é considerado valorização ou depreciação do dinheiro no tempo e complexidade do projeto. Além disso, existem diversos modelos e análises científicas que orientam a tomada de decisão, como a análise do fluxo de caixa, *payback* e cálculo do VPL (Valor Presente Líquido). Tais cálculos permitem analisar as entradas e saídas monetárias ao longo do tempo, calcular o tempo médio de retorno do valor investido e analisar a depreciação do projeto. Além disso, é possível considerar os custos que deixarão de existir com a implantação do projeto (TORRES, 2006).

4. METODOLOGIA

O presente trabalho teve por finalidade o estudo de implementação de uma planta de biogás em uma propriedade rural nos Campos Gerais. Os métodos escolhidos são provenientes da literatura e foram adaptados conforme a propriedade escolhida. Em primeiro momento, foi-se analisado as condições da propriedade e resíduos gerados por ela, planejado e realizado o desenvolvimento do projeto em si.

4.1 Caracterização e volume do resíduo

Segundo o Guia Prático do Biogás (2010), o primeiro passo para a análise de viabilidade do projeto de biogás é definir a matéria orgânica utilizada no processo de obtenção de metano, tanto vegetal quanto animal. Por conta das características da atividade econômica predominante dos Campos Gerais, o presente trabalho focou em resíduos animais bovinos leiteiros. Portanto, o volume do resíduo foi proporcional ao tamanho do rebanho.

O volume de resíduo produzido por cada animal difere de acordo com sua raça, tamanho e idade. Por isso, utilizou-se uma média de diversas literaturas apresentada por Tavares (2016), tais números passaram por análise boxplot¹. O volume de resíduo animal total gerado pela propriedade foi seu valor referente no Quadro 5 multiplicado pela quantidade de cabeças que estão gerando dejetos (MITO *et al.*, 2018).

Tabela 2 - Valores médios delimitados pela análise para produção de efluentes por suínos e bovinos.

Categoria	L animal ⁻¹ diário
Suíno leitão	54
Suíno crescimento e Terminação	10,28
Bovino de corte	34,80
Bovino de leite	57,68

Fonte: Adaptado de Embrapa (2018)

¹ O boxplot é um recurso gráfico usado regularmente na pesquisa científica para sumarizar e analisar dados quantitativos.

4.2 Informações sobre a propriedade

Fez-se necessário a coleta de informações da propriedade para o dimensionamento de produção e layout. As informações requisitadas foram:

- Dados sobre a propriedade: Dimensões físicas; informações de instalações e espaços úteis; frequência e características das manutenções; ferramentas e equipamentos disponíveis;
- Dados sobre os resíduos: Características e quantidades de resíduos disponíveis; sazonalidade de coleta;
- Dados sobre a criação dos animais: Espécie e quantidade de animais; sistema de confinamento; rotina do manejo animal;
- Dados de consumo energético: Número de residentes da propriedade; equipamentos com gasto energético e de calor; tempo de uso; consumo energético;
- Entre outras informações que se façam necessárias para a projeção da planta de produção de biogás.

4.3 Planejamento do projeto

Após a caracterização do resíduo e a coleta de informações sobre a propriedade, dar-se-á continuidade ao planejamento do projeto. Ele é complexo e depende de algumas variáveis, logo para nosso estudo foi-se utilizado a seguinte ordem de procedimentos adaptada de Paterson *et al.* (2015):

1. Determinado o consumo energético e de calor da propriedade;
2. Verificados possíveis pontos de implantação da usina;
3. Definido pontos de descarga de material;
4. Definido equipamentos do processo;
5. Indicado como se dará o armazenamento de gás;
6. Realizado o fluxograma do processo;
7. Analisada a viabilidade financeira.

4.4 Consumo energético da propriedade

Segundo Pereira (2019), para entender qual seria a demanda total de energia utilizada na propriedade, foi-se consultado faturas de luz mensais, analisando quantidade média de consumo. Também se fez necessário quantificar os gastos das próprias instalações geradoras do biogás para ter um apanhado geral do uso de eletricidade da fazenda. Para calcularmos a demanda energética da planta de biogás foi utilizada a seguinte fórmula (Equação 1):

$$C = \sum \frac{(Q \cdot P \cdot t \cdot 30)}{1000} \quad (1)$$

Onde:

C = Consumo elétrico (Kw/Mês)

Q= Quantidade de equipamentos

P= Potência do equipamento (W)

t= Tempo de utilização do equipamento (horas/dia)

4.5 Análise para implementação física

Para prosseguir com a análise de viabilidade da planta de biogás, foi preciso garantir que a propriedade tivesse um lugar adequado a implantação física dos equipamentos. Segundo Al Seadi (2008), deve-se levar em consideração alguns critérios para escolha do local a ser posicionado a planta. Pensando em logística de movimento, é recomendável que a planta esteja perto do local de coleta da matéria prima e da distribuição de energia, e que tenha espaço suficiente para o tráfego ao seu redor. Em relação a posição, deve-se manter uma distância adequada das residências e estar contra o vento por conta do desconforto com o odor. Por fim, deve-se considerar fatores climáticos e ambientais, para que a planta não esteja sujeita a enchentes ou erosão do solo. Essa validação foi realizada junto com o proprietário.

4.6 Dimensionamento do biodigestor

O presente trabalho focou no processo de dimensionamento do biodigestor lagoa coberta. De forma geral, existem algumas informações importantes para determinar sua tecnologia, como: característica do substrato, teor de sólidos totais e objetivo do tratamento (ROCHA, 2016). O formato de um biodigestor lagoa coberta é um trapézio invertido com a superfície retangular.

4.6.1 Dimensionamento da fossa

Embora a realidade muitas vezes seja a de que é necessário adaptar equipamentos já adquiridos ou mesmo adquirir equipamentos em padrões fixos pelas fabricantes, ter um projetado específico para um processo é de suma importância para atingirmos a maior eficiência possível. Para Alvez (2017), o dimensionamento deve levar em conta o volume do biodigestor, quantidade de resíduos produzido, tempo de retenção hidráulica e teor de sólidos permitido para a digestão úmida.

Com o volume de dejetos definido, através da equação 2 foi calculado o volume de carga diária produzida, respeitando a proporção de água necessária para a diluição.

$$V_C = V_A + V_D \quad (2)$$

Onde

V_C = Volume de carga diária (m^3);

V_A = Volume de água (m^3);

V_D = Volume de dejetos diário (m^3).

O cálculo do volume total da fossa do biodigestor é realizado por meio da equação 3:

$$V_{FB} = V_C \cdot TRH \quad (3)$$

Onde

V_{FB} = Volume da fossa do biodigestor (m^3);

V_C = Volume da Carga diária (m^3 /dia);

TRH = Tempo de retenção hidráulica (dias);

Após encontrado o volume da fossa do biodigestor foi possível determinar o volume geométrico da câmara (VGB), assim como as suas dimensões (Equação 4) (Figura 8). É recomendado ainda que o volume final da instalação seja 20% maior do que o volume total calculado, para que um nível de segurança seja assegurado (ALVES, 2017).

$$V_{GB} \cdot 1,20 = \frac{(a+b)}{2} \cdot hf \cdot Lf \quad (4)$$

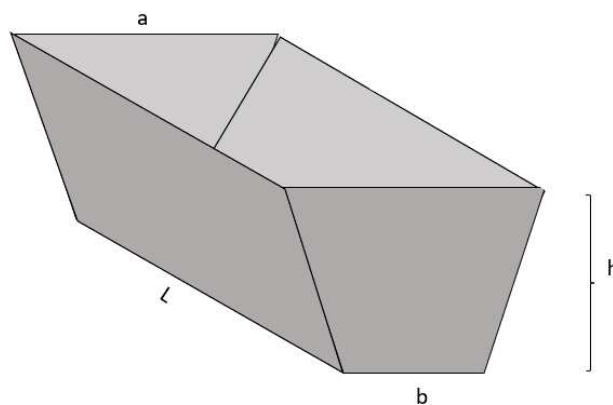
Onde:

a e b= medidas da base superior e inferior, respectivamente, do trapézio que forma a seção transversal da fossa;

hf = altura útil da fossa;

Lf = comprimento longitudinal da fossa.

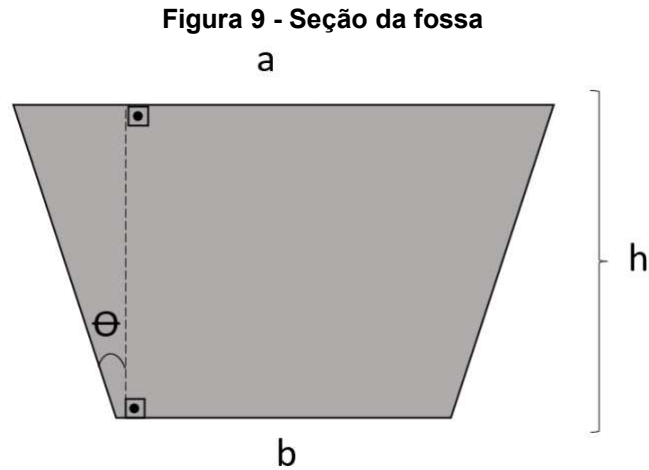
Figura 8 - Exemplo do formato do biodigestor lagoa coberta



Fonte: Autoria própria (2022)

Para Alves (2017), a talude (ângulo de inclinação das paredes) será o valor médio de 110° (Figura 9). Desta maneira, o ângulo θ , que é igual a subtração do ângulo reto dos 110° , será igual a 20° . Para a altura, foram consideradas as seguintes

relações conforme a Tabela 2, a seguir. Já para a relação entre comprimento (L) e a largura (a) foi igual a 1:5 (FEIDEN *et al.*, 2004).



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 2 - Valores ideais para diferentes faixas de volume do biodigestor lagoa coberta

Volume do biodigestor (m ³)	Altura do biodigestor (m)
Até 100	1,5
Entre 100 e 500	2,5
Entre 500 e 2000	3,5
Acima de 2000	4,5

Fonte: Adaptado de Alves (2017)

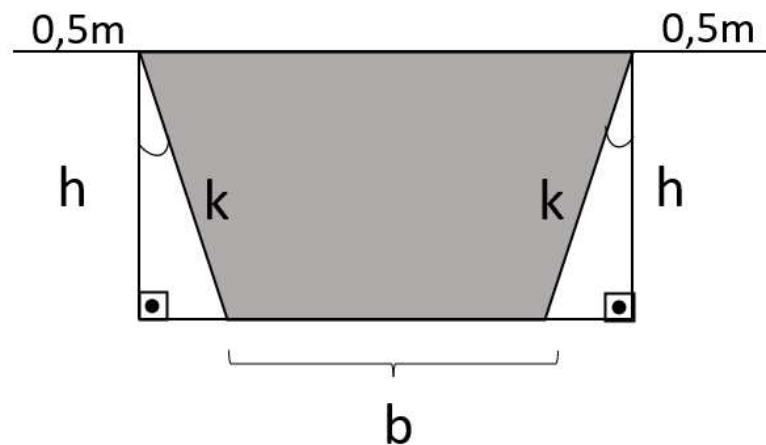
Ao substituírmos as correlações na equação 5, temos que:

$$V_{GB} = \frac{(a+b)}{2} \cdot h \cdot 5 \cdot a \quad (5)$$

Para encontrarmos os valores de a e b da equação foi utilizada a ferramenta *solver* do Excel.

Foi calculado o dimensionamento da lona de PVC para a impermeabilização do solo utilizando o perímetro da fossa como exemplificam as Figuras 10 e 11 a seguir:

Figura 10 - Vista frontal do biodigestor para dimensionamento da lona de impermeabilização



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 11 - Vista lateral do biodigestor para dimensionamento da lona de impermeabilização



Fonte: Autoria própria (2022)

Para ser encontrada a medida de comprimento (CI) e largura (LI) da lona foram utilizadas as equações 6, 7 e 8 a seguir:

$$L_l = 1,05 \cdot (0,5 + k + b + k + 0,5) \quad (6)$$

$$C_l = 1,05 \cdot (0,5 + h + L + h + 0,5) \quad (7)$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{k} \quad (8)$$

Dentro das equações acima, o valor de 0,5 m refere-se à medida das bordas de fixação da lona no solo, enquanto o valor de 1,05 m é uma medida de segurança para evitar danos provenientes de dilatações e contrações no material.

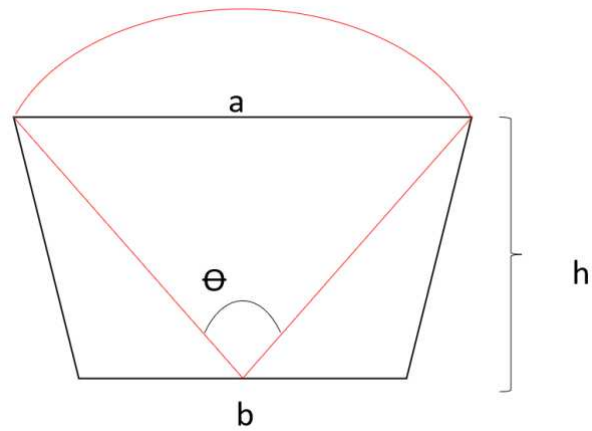
4.6.2 Dimensionamento do gasômetro

É recomendado que os gasômetros atendam pelo menos 50% da capacidade de produção de biogás diária da propriedade. Para calcular esta capacidade, deve-se obter a demanda diária de gás, curva de variação da demanda em função das horas do dia e a taxa de produção de gás pelo biodigestor (AZEVEDO *et al.*, 2004). Como faltam dados do período de queima do biogás pelo moto-gerador, foi considerado o volume do gasômetro como o mesmo volume de produção diária de biogás.

Por conseguinte, após definir o volume do gasômetro, foram realizados os cálculos para saber a área da lona de vedação. Este cálculo foi realizado através da ferramenta *solver* no Excel. As relações trigonométricas são mostradas a seguir.

A Figura 12 demonstra um corte transversal dentro do biodigestor onde foi feito um arco e um triângulo ligando as áreas de a e b, formando um ângulo θ . Para descobrir a área do arco e triângulo interno é necessário a resolução das equações 9, 10 e 11, respectivamente. A diferença das duas áreas calculadas multiplicada pelo comprimento L do biodigestor fornece o volume do gasômetro.

Figura 12 - Exemplo do arco e ângulo formado no biodigestor para o cálculo do gasômetro



Fonte: Autoria própria (2022)

$$A_c = \frac{\theta \cdot \pi r^2}{360^\circ} \quad (9)$$

Onde:

A_c = Área do arco (m^2);

θ = Ângulo do arco (m);

r = Raio do arco (m).

$$A_t = \frac{a \cdot h}{2} \quad (10)$$

Onde:

A_t = Área do triângulo (m^2);

a = Largura maior do biodigestor (m);

h = Altura do biodigestor (m).

$$V_g = (A_c - A_t) \cdot L \quad (11)$$

Onde:

V_g = Volume do gasômetro calculado (m^3);

A_c = Comprimento do biodigestor (m).

Para calcular-se o comprimento da lona de vedação (Equação 12), deve-se variar os valores do ângulo θ , o raio r e a altura h , assim encontrando os valores de raio e ângulo ideais para se chegar no volume do gasômetro desejado.

$$C_{arco} = \frac{(\theta \cdot 2\pi \cdot r_d)}{360^\circ} \cdot 1,15 \quad (12)$$

C_{arco} = Comprimento do arco da lona de vedação (m);

θ = Ângulo do arco desejado (m);

r_d = Raio do arco desejado (m).

Por fim, foi calculado a área da lona de vedação utilizando o comprimento encontrado do biodigestor na seção anterior (Equação 13).

$$A_{vedação} = (C_{arco} \cdot L) \cdot 1,15 \quad (13)$$

$A_{vedação}$ = Área da lona de vedação (m^2);

C_{arco} = Comprimento do arco da lona de vedação (m);

L = Comprimento do biodigestor (m).

Segunda Silva (2010), a ligação do biodigestor até o grupo gerador pode ser feita por uma tubulação de PVC de 100mm e a lona flexível de 1mm, de mesmo material.

4.7 Potencial de produção de metano

A estimativa do potencial de produção de biogás da propriedade estudada foi calculada a partir do estudo realizado pela Embrapa (MITO *et al.*, 2018) e dos cálculos

disponibilizados por Chen (1983), sendo esse o modelo matemático mais similar aos resultados obtidos de forma prática em laboratório. Para chegar-se ao potencial de produção de metano são utilizadas as seguintes equações 14, 15, 16 e 17:

$$PdM = \frac{Bo \cdot SV}{TRH} \cdot \left(1 - \frac{k}{TRH \cdot \mu m - 1 + k}\right) \quad (14)$$

Onde:

Pdm = Produtividade em m³ de metano por m³ do biodigestor ao dia (m³CH₄m⁻³biodia⁻¹)

Bo = Capacidade de produção de metano pelo dejetto (m³CH₄kg_{SV}⁻¹)

SV = Concentração de sólidos voláteis (g_{sv}L⁻¹)

TRH = Tempo de retenção hidráulica (dia)

K = coeficiente cinético (adimensional)

μm = Velocidade máxima de crescimento específico (dia⁻¹)

$$k = 0,5 + 0,0043 \cdot e^{0,051 \cdot SV} \quad (15)$$

Onde:

K = coeficiente cinético (adimensional)

SV = Concentração de sólidos voláteis (g_{sv}L⁻¹)

$$\mu m = 0,013 \cdot T - 0,0129 \quad (16)$$

Onde:

μm = Velocidade máxima de crescimento específico (dia⁻¹)

T = Temperatura (°C)

$$PrM = PdM \cdot V_{Bio} \quad (17)$$

Onde:

PrM = Produção diária de metano (m³CH₄ dia⁻¹)

PdM = Produtividade de metano (m³CH₄ m⁻³bio.dia⁻¹)

Vbio = Volume do biodigestor (m³)

Importante salientar que esta metodologia não utiliza como dimensão da produção de biogás o tamanho do rebanho, mas sim a capacidade do biodigestor. Logo, foi necessário realizar um racional de qual o melhor volume para o biodigestor escolhido.

Para o desenvolvimento dos cálculos, é necessário a posse de parâmetros qualitativos. Estes parâmetros serão encontrados de duas maneiras: a partir de ensaios laboratoriais, que fornecerá maior exatidão de acordo com a propriedade e dieta animal escolhida, ou podem ser encontrados estimativas na literatura. Os valores a serem encontrados segundo a metodologia escolhida são: capacidade de produção de metano do dejetos, concentração de sólidos voláteis, tempo de retenção hidráulica, temperatura e volume do biodigestor (MITO *et al.*, 2018).

4.8 Potencial de produção de biofertilizante

Segundo Chechin (2021), a taxa de aplicação do biofertilizante em solo para plantio deve ser relacionada com a necessidade de nutrição da planta. Considerando os valores de rendimento de tal trabalho, densidade do digestato como 0,84 gramas/cm³ e que a aplicação do digestato deve ser de 10 toneladas por hectare, realizamos a quantificação equivalente de biofertilizante utilizado na propriedade em questão.

4.9 Bombas e motores

A escolha do motor-gerador (Fotografia 5) deve-se basear na quantidade de biogás gerado pela planta, em sua finalidade de uso do biogás, capital disponível para investimento, manutenção e perante os demais equipamentos escolhidos. (SUZUKI *et al.*, 2011). Por isso, as necessidades em cada caso foram analisadas e buscadas em literatura o grupo gerador que se encaixava nas necessidades de nosso projeto.

Fotografia 5 - Exemplo de motor gerador a biogás de 20 kVa



Fonte: India Mart (2022)

4.10 Produção elétrica

Segundo o Guia Prático do Biogás (2010), a capacidade de calor do metano é de 9,97 kWh/m³, esse valor é utilizado para calcular a eficiência elétrica da planta, como mostra a equação 18. Cada moto-gerador tem sua eficiência de conversão, no caso do caso do Ciclo Otto é de aproximadamente 25% (COLDEBELLA *et al.*, 2006). Tais orientações foram utilizadas para a quantificação elétrica da planta.

$$EE = PrM \times p \times Ef \quad (18)$$

Onde:

EE – Potencial de geração elétrica (kW)

PrM – Volume de metano (m³/h)

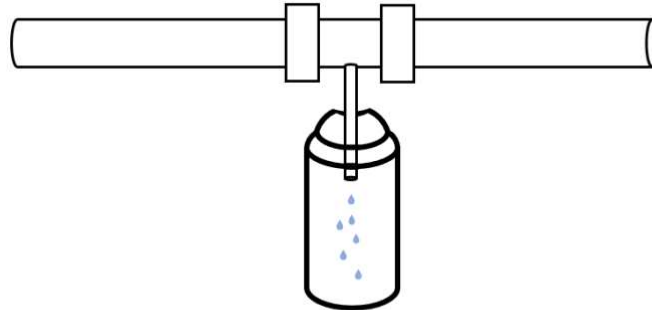
p – Potencial calorífico (kWh/m³)

Ef - Eficiência do motor Ciclo Otto

4.11 Purificação do biogás

Para etapa de purificação, foi-se utilizado o sistema desenvolvido por Pecora (2006). Nele ocorre uma drenagem em conjunto com processos de absorção. Neste modelo, antes do biogás ser alimentado à tubulação do sistema, ele passa por um recipiente conectado em “T”. Este recipiente está mais baixo do que a tubulação e por gravidade consegue reter a água que se condensa na tubulação, como mostra a figura 13.

Figura 13 - Exemplo da aplicação do dreno



Fonte: Autoria própria (2022)

Após o dreno, o gás passa por dois tubos absorventes: o primeiro contendo cavaco de ferro com o objetivo de retirar o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e o segundo, sílica gel branca e azul, que retira a umidade. Segundo a autora, este sistema quando instalado na linha de captação de biogás mostrou-se eficiente.

4.12 Layout da planta

Para a montagem do layout, foi utilizado o *Software Lucidchart*, onde primeiramente foi escolhido o modelo a ser seguido (linear, celular, funcional ou híbrido). Identificado o melhor modelo e com o fluxograma já estabelecido, determinada a posição de todos os equipamentos e visão geral da instalação. A definição correta do layout fabril é de suma importância pois otimiza a circulação de pessoas, produtos e materiais, acarretando economia de tempo e dinheiro (STEVENSON, 2001).

4.13 Análise econômica

No presente trabalho, foi desenvolvida uma análise financeira a partir de dois principais cálculos utilizados para tomada de decisões ou investimentos: o *Payback* e Valor Presente Líquido (VPL).

Segundo o livro “Fundamentos da engenharia econômica e da análise econômica de projetos” de Oswaldo Fadigas Fontes Torres, o *payback* é o tempo levado para recuperar o dinheiro investido. São analisadas todas as entradas e saídas

financeiras do investimento e calculado em quanto tempo a aplicação retornará o capital inicial gasto, no caso deste trabalho, a construção da planta de biogás.

O valor monetário apresenta diferente peso ao longo do tempo, ou seja, o valor real de algo está relacionado com a data que está em discussão e o VPL (Equação 19) é um cálculo que gera uma equivalência de valores em períodos diferentes. Se tal valor for positivo em um tempo determinado pelo investidor é um indício que o projeto deve seguir. O VPL deve ser baseado em uma taxa de juros que represente a variação de atratividade do mercado perante o produto, taxa mínima de atratividade. Este trabalho utilizou a taxa básica de juros da economia brasileira (Selic), que contabilizou 13,73% em 10/2022, segundo o site do governo federal.

$$VPL(i) = \sum_{k=0}^{k=n} \frac{V_k}{(1+i)^k} \quad (19)$$

Onde:

VPL = valor depreciado

V_k = Valor existente em dado instante k

k = tempo em análise

i = percentual de variação

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da propriedade

Além de diretrizes encontradas em literatura, como base para esse estudo, foi selecionada uma propriedade a favor de fornecer os dados necessários para o desenvolvimento do presente trabalho. O critério utilizado foi que ela ainda não gerasse biogás e que estivesse situada em Carambeí– PR, sendo essa considerada a maior cidade produtora de leite no ranking top 100 Brasil, segundo o portal de referência leiteira *MilkPoint*.

A fazenda escolhida possui o nome de Bela Vista e a coleta de dados foi realizada a partir de entrevistas com o proprietário. Possui como principais atividades econômicas a pecuária e agricultura, com presença de um rebanho de 160 cabeças de gado leiteiro e 500 hectares de plantação de milho, soja, feijão, trigo, cevada e aveia, dependendo da sazonalidade.

Para a criação do rebanho leiteiro, ela conta com instalações de confinamento do tipo *free stall*, em que seu gado permanece 100% do tempo em área controlada e com a presença de uma esterqueira. Sua manutenção é realizada 3 vezes ao dia, contando com a raspagem de toda a área e utilizando o mínimo de água possível. A propriedade (Fotografia 6) possui área útil para instalação de uma planta de biogás e os responsáveis afirmam que o foco de utilização dos produtos é na conversão elétrica e substituição de adubo químico por biofertilizante.

Fotografia 6 – Vista aérea da propriedade rural estudada



Fonte: Fazenda Bela Vista (2012)

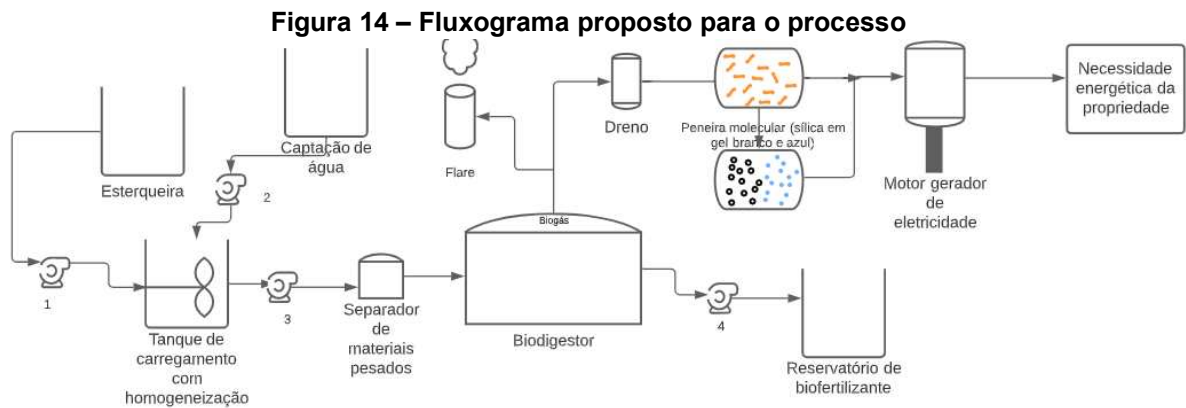
5.2 Caracterização dos resíduos disponíveis

Segundo a metodologia de Tavares (2006), cada bovino produtor de leite produz cerca de 57,68 L de dejetos por dia. Considerando que a propriedade de estudo possui 160 cabeças, o total de produção de dejetos é de 9,23 m³ de dejetos por dia.

Além do volume disponível, para o processo de biodigestão ser determinado, também foi necessário o levantamento dos itens mencionados no tópico 4.6. Segundo o Guia Prático do Biogás (2010) o dejetos bovino líquido (aquele proveniente da higienização das vivências dos animais e diluído com água) é sensivelmente alterado pela adição de água, sendo 75% menos eficiente na produção de metano do que o dejetos sólido. Contudo, é essa diluição que torna viável e mais prática a utilização do resíduo no processo, sendo que a consistência dos resíduos secos impede que ele seja processado com qualquer equipamento de carregamento de sólidos oferecido no mercado. Com isso e a baixa concentração de sólidos totais, este trabalho foi direcionado para uma digestão líquida.

5.3 Fluxograma de processo proposto

Através do software *LucidChart* foi proposto um fluxograma do processo linear (Figura 14), que conta com etapas de pré tratamento, digestão e posterior purificação.



Fonte: Autoria própria (2022)

A etapa de pré tratamento é formada basicamente pelo tanque de diluição e separador por gradiente de materiais pesados, o qual selecionamos uma prensa tipo rosa com filtro, indicado pelo catálogo de tecnologias e empresas de biogás (THIEME *et al.*, 2015). Devido à natureza dos dejetos é dispensável um tratamento contra patógenos. Através de bombas centrífugas o esterco e a água são despejados em um tanque com agitação, onde ocorre a diluição dos dejetos. Após esta etapa, foi adicionado um separador de materiais pesados entre o biodigestor e o tanque para que agentes como serragem, pedras, metais e outros possíveis objetos sejam retidos. Ele estará acoplado à tubulação, ou seja, enquanto o líquido estiver passando do tanque ao biodigestor ele estará em processo de filtração.

Ocorrido o pré tratamento, o volume a ser inoculado parte para o biodigestor, onde passará por uma aclimação inicial em batelada por 30 dias. Depois deste período a geração de biogás será constante e será adotado um regime de alimentação contínua, com volumes iguais sendo adicionados e retirados do biodigestor. O gás produzido irá posteriormente para a etapa de purificação ou o excedente encaminhado para combustão dentro do *flare*. Não obstante foi idealizado um reservatório de biofertilizante, que funciona basicamente como um tanque pulmão

para o digestato antes de ele ser direcionado ao seu fim de fertilizante. O envio para esse reservatório também utilizará bombas.

Como última etapa, o gás passa por uma purificação simples, onde será retirada a umidade por um dreno e o sulfeto de hidrogênio do gás a partir de membranas moleculares de sílica em gel e cavaco de ferro. Não foi idealizada uma etapa para retirar o gás carbônico pois para o fim de combustão no motor gerador não é necessário um nível de pureza tão elevado de metano. Após a purificação o gás é direcionado ao motor, que após a combustão gera eletricidade que pode ser aproveitada dentro da propriedade.

Vale ressaltar que a adição de bombas no fluxograma se fez necessário por conta do nivelamento igualitário que a propriedade possui. Caso houvesse algum desnível próximo aos pontos focais de coleta de matéria prima e distribuição de energia seria possível utilizar a gravidade a nosso favor e baratear o processo.

5.4 Escolha do biodigestor

Para a escolha do melhor modelo de biodigestor foi utilizado o racional apresentado no Quadro 1 deste trabalho. De acordo com a caracterização do resíduo, sua disponibilidade diária, clima da região e teor de umidade as seguintes características foram selecionadas:

Por causa do baixo teor de sólidos característico de dejetos de bovinos de leite e seu baixo risco de acidificação, será uma alimentação líquida e com apenas uma fase. Como a disponibilidade de dejetos é diária, após uma primeira batelada para aclimatação da microbiota do digestor a alimentação será contínua, com entradas diárias do novo substrato disponível e saída de digestato em igual proporção. A falta de risco de patógenos permitirá que a digestão seja em temperaturas mesofílicas. Por fim, como o teor de sólidos é baixo, a falta de agitação no biodigestor é viabilizada.

De acordo com as especificações levantadas, o modelo de biodigestor que mais se adequa às características e necessidades da propriedade é o tipo Lagoa Coberta/ Canadense/ Fluxo tubular. Com este modelo, temos uma baixa necessidade de investimento e manutenção, além de necessitar um baixo grau de especialização por parte dos gestores do processo.

5.5 Dimensionamento do biodigestor

O dimensionamento levou em conta aspectos como operação nominal, projeção de crescimento da produção, espaço disponível e layout presente.

Para nosso biodigestor modelo lagoa coberta, foram considerados os seguintes aspectos:

Para a definição do dimensionamento, primeiro foram seguidas as direções apontadas na seção 4.6.1. Sabe-se que o volume diário de resíduo gerado pelos animais é de $9,23 \text{ m}^3$. Aplicando este valor dentro da equação 20 foi possível obter o volume de carga diária de resíduo com a quantidade necessária de água a ser utilizada para a diluição. Segundo a literatura, o fator de diluição utilizado para dejetos bovinos é de 1:1.

$$V_{Cd} = V_{H_2O} + V_{Dejetos} = 9,23 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) + 9,23 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) = 18,46 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) \quad (20)$$

Desta forma, o biodigestor poderá ser abastecido diariamente com $18,46 \text{ m}^3$ de dejetos. Para o cálculo do volume total da fossa foi seguido o tempo de retenção hidráulica recomendado pela literatura para bovinos (30 dias) e utilizada a equação 21:

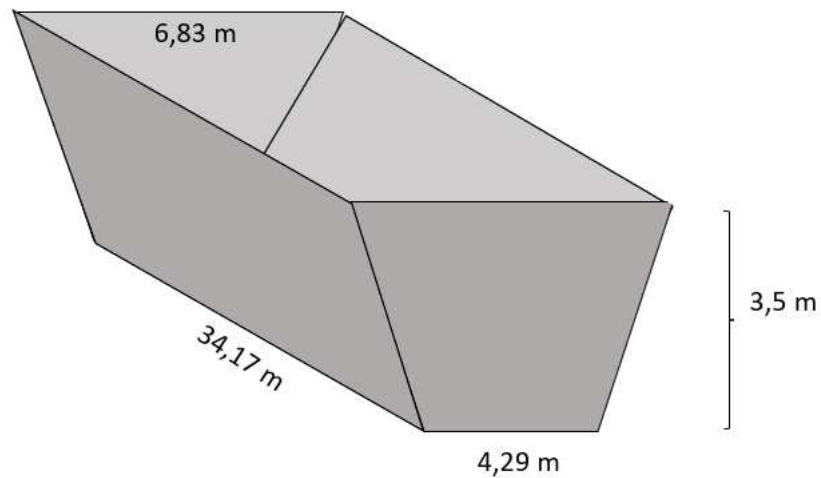
$$V_{FB} = V_{Cd} \cdot TRH \cdot 1,20 = 18,46 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) \cdot 30(\text{dia}) \cdot 1,20 = 664,8 \text{m}^3 \quad (21)$$

De acordo com a seção 4.6.1, o volume total superior a 500m^3 requer uma altura de fossa de 3,5m. Com este valor foi possível, utilizando a ferramenta *solver do Excel*, encontrar os valores de a e b na equação 22.

$$V_{GB} = \frac{(a+b)}{2} \cdot h \cdot L \rightarrow 664,8 (\text{m}^3) = \frac{(a+b)(\text{m})}{2} \cdot 3,5(\text{m}) \cdot 5 \cdot a(\text{m}) \quad (22)$$

Utilizando a equação acima, os valores de a, b e L resultaram em 6,83 m, 4,29 m e 34,17m, respectivamente (Figura 15). Conseqüentemente, para a lona de impermeabilização do solo os valores de largura e comprimento serão, respectivamente, 13,36m e 44,27m.

Figura 15 - Exemplo do modelo e dimensões finais do biodigestor



Fonte: Autoria própria (2022)

5.6 Potencial de geração de biogás

Segundo a metodologia escolhida, o potencial de produção real de metano (PdM) foi resultante das equações 23, 24, 25 e 26.

$$k = 0,5 + 0,0043 \cdot e^{0,051 \cdot SV} = 0,5 + 0,0043 \cdot e^{0,051 \cdot SV (g_{sv} L^{-1})} = 0,56 \quad (23)$$

$$\mu m = 0,013 \cdot T - 0,0129 = 0,013 \cdot 37^{\circ}C - 0,0129 = 0,47 (dia^{-1}) \quad (24)$$

$$PdM = \frac{Bo \cdot SV}{TRH} \cdot \left(1 - \frac{k}{TRH \cdot \mu m^{-1} + k}\right) =$$

$$= \frac{0,15 (m_{CH_4}^3 \cdot kg_{sv}^{-1}) * 50,54 (g_{sv} \cdot L^{-1})}{30 (dias)} * \left(1 - \frac{0,56}{30 (dias) * 0,4681 (dia^{-1}) - 1 + 0,56}\right) =$$

$$= 0,29 (m_{CH_4}^3 \cdot m_{bio}^{-3} \cdot dia^{-1}) \quad (25)$$

$$PrM = PdM \cdot V_{Bio} = 0,29(m_{CH_4}^3 m_{bio}^{-3} dia^{-1}) \cdot 554(m^3) = 159,69 (m_{CH_4}^3 dia^{-1}) \quad (26)$$

Como segundo a literatura o biogás é composto por cerca de 60% de metano, o valor ajustado da produção para biogás foi de 266,15 m³ de biogás/ dia, o que totalizou **7.985 m³ de biogás por mês.**

5.7 Dimensionamento do gasômetro

Para o gasômetro, foi estabelecido na metodologia que seu volume será igual ao potencial de produção diária de biogás de 266,15 m³. Com isso, utilizando a ferramenta *solver do Excel*, obteve-se os valores de 88,62° e 5,05 m para o ângulo do arco e tamanho do raio, respectivamente. Conseqüentemente, através da equação 27 foi possível encontrar o comprimento do arco da lona de vedação.

$$C_{arco} = \frac{(\theta_d \cdot 2\pi \cdot r_d)}{360^\circ} \cdot 1,15 = \frac{(88,62(graus) \cdot 2\pi \cdot 5,05(m))}{360(graus)} \cdot 1,15 = 8,98(m) \quad (27)$$

Para a área da lona do gasômetro foi necessário utilizar a equação 13 para multiplicar o comprimento do arco pelo comprimento do biodigestor adicionando mais 15% para fixação da lona no terreno. O valor resultante desta área foi de 352,83m².

5.8 Balanço de consumo energético

A energia elétrica consumida na propriedade vem de 2 fontes distintas, com a geração de energia de placas solares e com a rede de distribuição de energia elétrica local. O gasto total advém da soma de energia utilizada com luz e equipamentos elétricos do uso de 6 casas, bombas e motores, sistema de aquecimento boiler, pasteurizador, equipamentos utilizados na instalação do confinamento bovino e demais máquinas da fazenda.

Foi constatado que a quantidade de energia utilizada da rede elétrica perante as faturas mensais da distribuidora foi de 6.948 kW.

A planta produtiva de biogás possui seu próprio gasto energético, com isso, foi-se necessário mapear e quantificar o consumo energético dos principais equipamentos que fazem seu uso (Tabela 3). Levando em conta o dimensionamento do biodigestor e quantidade de energia gerada com os resíduos em questão, foi

selecionado um motor de Ciclo Otto que forneça 20 kVA de potência nominal. Já que, segundo SUZUKI *et al.* (2011), esse modelo é o motor de combustão interna mais utilizado na geração e biogás. Quanto a seleção das bombas e homogeneizador, foram analisadas aquelas condizentes com o material a ser bombeado, volume de fluídos em escoamento e tempo de uso.

Tabela 3 - Levantamento de quantidade, potência, tempo de utilização e consumo diário de equipamentos

Equipamento	Quantidade	Potência (W)	Tempo de utilização por dia (h)	Consumo diário (W)
Bomba centrífuga 1 e 2	2	250	2,05	1.025
Bomba centrífuga 3 e 4	2	1.500	0,61	1.830
Homogeneizador	1	1.500	3,00	4.500
Motogerador	1	3.960	24,00	95.040

Fonte: Autoria própria (2022)

Para obter o consumo mensal da planta de biogás, foi-se aplicado os valores do quadro 7 na equação 1, multiplicando a potência pelo período de utilização de cada equipamento, com resultante apresentando na equação 28:

$$C = \sum \frac{(Q \cdot P \cdot t \cdot 30)}{1000} = 30,75 + 54,9 + 135 + 2.851,2 = 3.071,85 \text{ kW} \quad (28)$$

Considerado tal valor e o de energia elétrica comprada da rede de distribuição, a produção elétrica mínima esperada para a propriedade atingir a autossuficiência é de 10.020 kW/mês.

A partir da equação 18, foi calculada a geração de energia útil do biogás (60% CH₄) do motor Otto (Equação 29), considerando a eficiência do motor, o potencial calorífico do metano e de sua quantidade gerada na presente planta.

$$EE = Pr M \times p \times Ef = 6,65 \left(\frac{m^3}{h} \right) \times 9,97 \left(\frac{kWh}{m^3} \right) \times 0,25 = 16,58 kW \quad (29)$$

A geração calculada foi de 16,58 kW/h, totalizando em 11.940,82 kW mensais. Realizada a subtração de tal quantidade de energia produzida com a quantidade de necessária para atingir a autossuficiência (10.020 kW/mês), foi concluído que a planta supre as necessidades da propriedade e ainda gera um excedente de 1.920,82 kW/mês.

Como a planta possui geração de energia extra, ela pode comercializar tal valor para a companhia elétrica ou não enviar o biogás para o gerador e utilizá-lo para outro fim, como para queima de uso residencial ou aquecimento de equipamentos. Para o presente trabalho, foi considerado o envio de gás excedente para substituição de GLP e queima no *flare*.

5.9 Geração de biofertilizante

Para manter a retenção hidráulica estável, foi considerado que o fluxo é contínuo no digestor, ou seja, o volume que entra sai na mesma proporção. Então, o volume de digestato gerado é o volume dejetos diluídos inserido na fermentação diariamente (18,46 m³). Ou seja, são produzidos 553,8 m³ de biofertilizante mensalmente.

Com informações de distribuição no solo e densidade do digestato, disponibilizados por Chechin (2021), a propriedade precisaria de 10.000 toneladas anuais de biofertilizante para suprir suas demandas. Como ela produz 5.582,30 toneladas, concluiu-se que o produzido supre 55% da nutrição de solo da propriedade. Gerando grande redução de custo com fertilizantes químicos.

5.10 Análise de investimento

Foi visto que são diversos os benefícios técnicos de instalação da planta de biogás para propriedades rurais, mas também é de suma importância que o projeto tenha viabilidade financeira. Tais cálculos foram realizados com apoio da ferramenta Microsoft Excel que disponibiliza fórmulas para cálculo de *payback* e VPL, e também, baseados em orçamentos de sites online, como *Market place*.

O fluxo de caixa foi montado a partir do valor estimado de investimento para instalação da planta. Foram adicionados os principais equipamentos do fluxograma e

buscados valores de catálogo para tal simulação. Para os valores de entradas, foi utilizado apenas dados referentes ao que propriedade deixará de gastar com energia elétrica, gás de cozinha e biofertilizante. Esse último item tem grande impacto já que a propriedade disponibiliza um capital médio anual de 1 milhão de reais no uso de fertilizantes. Por fim, consideramos o valor de manutenção como saída, sendo esse referente a um salário-mínimo de um funcionário que fará todo o manuseio e controle da plataforma.

O fluxo de caixa realizado da propriedade rural em foco foi representado pela Tabela 4, contando com a presença 4 bombas, tubulação considerando distância média de 3 metros entre os equipamentos, lona utilizada para impermeabilização do solo e na cobertura do gasômetro, medidores de pressão e vazão, homogeneizador do tanque de carregamento de dejetos, membranas moleculares que filtrarão o biogás, dreno de retirada de umidade, grupo gerador utilizado para fazer a conversão de energia, concretagem do biodigestor e dos dois tanques utilizados na planta e um interruptor de transferência.

Tabela 4 - Fluxo de caixa do projeto dentro da propriedade rural

(continua)

	Mês 0	Mês 1	Mês 36
1. Investimento inicial			
Bomba 1 e 2	R\$ 1.179,80		
Bombas 3 e 4	R\$ 2.519,80		
Tubulação	R\$ 1.290,00		
Lona do gasômetro e impermeabilização	R\$ 14.595,00		
Medidores (pressão, vazão)	R\$ 5.916,00		
Homogeneizador	R\$ 28.403,50		
Membranas moleculares	R\$ 620,00		
Separador de metais	R\$ 6.500,00		
Dreno	R\$ 229,00		
Motor-gerador	R\$ 56.807,00		
Instalação/Construção	R\$ 129.231,04		
Interruptor de transferência	R\$ 1.786,00		
2. Total das entradas de caixa			
BioGLP		R\$ 299,46	R\$ 299,46
Energia elétrica		R\$ 1.500,00	R\$ 1.500,00
Biofertilizante		R\$ 45.833,33	R\$ 45.833,33

Tabela 5 - Fluxo de caixa do projeto dentro da propriedade rural

(conclusão)

	Mês 0	Mês 1	Mês 36
3. Saídas de Caixa			
Manutenção/central de controle		R\$ 1.212,00	R\$ 1.212,00
4. Total das saídas	-R\$ 247.291,14	-R\$ 1.212,00	-R\$ 1.212,00
5. Total das entradas	R\$ -	R\$ 47.632,79	R\$ 47.632,79
6. Fluxo de caixa	-R\$ 247.291,14	R\$ 46.420,79	R\$ 46.420,79
7. Fluxo de caixa acumulado	-R\$ 247.291,14	-R\$ 205.870,35	R\$ 1.423.857,47

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir de tal relação, o *payback* apresentado foi de 6 meses. Ou seja, a partir desse período a produção do biodigestor suprirá os gastos com sua implementação e dará não apenas retornos financeiros como também promoverá a sustentabilidade. O VPL foi calculado a partir de fórmula disponibilizada pela ferramenta *Microsoft Excel* com um tempo determinado de 36 meses que o proprietário selecionou. Quando positivo, o VPL significa que o projeto é viável, quando negativo, o investimento não é rentável dentro do período selecionado. Como os cálculos retornaram um valor alto e positivo de R\$ 87.513,80, o projeto de implementação de biogás na fazenda Bela Vista é viável.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em conta o favorável cenário para a produção de biogás, a crescente demanda por ampliação da matriz energética e o grande impacto financeiro positivo que a biodigestão anaeróbia pode causar, a instalação de uma usina de biogás para essa propriedade rural é de fato viável.

A propriedade possui alternativas sustentáveis para geração de energia e almeja a autossuficiência energética. Com a implantação do gerador movido a biogás ela conseguirá suprir esta demanda. Além disso, gerará grandes ganhos com produção de biofertilizante para suas lavouras.

Financeiramente falando, o projeto apresentou números positivos e em pouco tempo teria o retorno de investimento. Como o objetivo de uso da planta é de longo prazo, a implantação se torna completamente viável.

A implementação de um projeto como o proposto neste trabalho é de grande valia para o produtor, que com isso consegue atingir uma independência energética da concessionária, economia financeira, melhor tratamento dos seus resíduos evitando passivos ambientais e a possibilidade de agregar sustentabilidade à sua marca.

Com este trabalho foi esperado que o caminho para a implementação de uma usina de biogás dentro de propriedades produtoras de leite seja facilitado, que as vantagens de se trabalhar com bioenergia sejam explicitadas e que a região dos campos gerais (Paraná) se torne cada vez mais expoente em energia limpa.

Embora o escopo do presente trabalho seja abrangente, ainda há a oportunidade de desenvolver alguns tópicos que os autores não abordaram. Logo, são sugeridos os seguintes desenvolvimentos para possíveis futuros trabalhos nesta linha:

- **Dimensionamento** de toda a tubulação do processo juntamente com suas bombas e motores;
- Incrementar na utilização de matéria orgânicas possíveis resíduos vegetais de vizinhos ou da própria produção;
- Estudar a possibilidade de aquecimento do biodigestor com serpentinas utilizando o próprio calor gerado pelo moto-gerador;
- Estudar a possibilidade de implementação de agitação no biodigestor;
- Estudar a expansão do uso de biogás para motor veicular.

REFERÊNCIAS

A. C, V. H.; LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente**. Campina Grande/PB, p. 328. 1994.

ABIOGÁS. **O Potencial Brasileiro do Biogás**. ABIOGÁS. São Paulo. 2021.

AL SEADI, T. *et al.* **Biogas digestate quality and utilization**. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. Woodhead Publishing Series in Energy, p. 267-301, 2013.

ALIBABA. **Motor Elétrico, 10kw 20kw 50kw 150kw 200kw 1mw Para Planta De Energia Biogas Natural Conjunto De Preço, 2022**. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/p-detail/10kw-62080723530.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.650a50352il25X>. Acesso em: 26 nov. 2022.

ALVES, A. M. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular**. 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2017.

ALVES JUNIOR, J. C. **Estimativa da produção de biogás a partir de dejetos suínos: Avaliação e comparação entre metodologias, aplicadas a um estudo de caso**. 2019. 36 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia de Energia – Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

ALVES, R. G. C. M. **Tratamento e valorização de dejetos da suinocultura através de processos anaeróbios: operação e avaliação de diversos reatores em escala real**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. 2007. 172p.

AZEVEDO, M.; *et al.* **Cogeração de energia utilizando o biogás do esgoto sanitário realizado na Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR**. 2004. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Medianeira, 2004.

BARROS, Evandro Carlos. **Gestão Ambiental na Produção de Suínos e Aves: Destino dos resíduos**. [S. l.]: Embrapa Suínos e Aves, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/Curso+Suinocultura+-+Destino+dos+res%C3%ADduos.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2022.

BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. **Engenharia Econômica**. Grupo A, 2010. E-book. ISBN 9788563308986. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788563308986/>. Acesso em: 01 nov. 2022.

BRASIL. Ministério da Economia. **Taxa de Juros Selic**. Receita Federal, 01 nov. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/pagamentos-e-parcelamentos/taxa-de-juros-selic>. Acesso em: 12 nov. 2022.

CHECHIN, M. **Avaliação do uso agrônômico do digestato como biofertilizante oriundo da digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental). Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2021.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural Wastes**, v. 8, p. 65-81, 1983. ISSN 2.

CIBIOGÁS. Biogás MAP. **Energias Renováveis**, 2021. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiODc2NThhOGltOTc2Ny00ZDc1LWI5MTMtYjYwZTRiYjFiOWQ3liwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

CIBIOGÁS. Produção de Biogás: o que são biodigestores e como produzir biogás? **Energias Renováveis**, 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blogpost/producao-de-biogas-o-que-sao-biodigestores-e-como-gerar-biogas/>>. Acesso em: 23 jun. 2022.

COLDEBELLA, Anderson, SOUZA, Samuel Nelson Melegari de, SOUZA, Juliano de *et al.* **Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., Campinas-SP, 2006.

COMISSION, E. **A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050**. Comissão Europeia. Bruxelas, p. 16, 2008.

CONSUMO, M. &. Sustentabilidade influencia na decisão de compra de 9 a cada 10 consumidores. **Mercado & Consumo**, 2021. Disponível em: <<https://mercadoeconsumo.com.br/2021/05/28/sustentabilidade-influencia-nadecisao-de-compra-de-9-a-cada-10-consumidores/>>. Acesso em: 11 jun. 2022.

EDWIGES, T.; MULLER, R.; MARTINEZ, D.. **FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE SUBSTRATOS AGROINDUSTRIAIS**. UNIDO. [S.l.], p. 37, 2020.

FEIDEN, A.; *et al.* **Avaliação da eficiência de um biodigestor tubular na produção de biogás a partir de águas residuárias de suinocultura**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel – PR, 2004.

FERNANDES, F. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. **Estabilização e higienização de biossólidos**, Jaguariúna, p. 45-68, 2003.

GALL, J. **Free Stall é sistema de confinamento que garante a produção leiteira.** Agro 2.0, 2019. Disponível em: <https://agro20.com.br/free-stall/>. Acesso em: 1 dez. 2022.

GEOSSINTÉTICOS, Geomembrana. **Melhor preço de lona para lago.** São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.geomembrana.com.br/melhor-preco-de-lona-para-lago.php>. Acesso em: 1 dez. 2022.

GOMES, Michelle Garcia. **PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BAGAÇO DE CANA-DEAÇÚCAR APÓS PRÉ-TRATAMENTO COM ÁCIDO CÍTRICO DILUIDO.** Programa de pós-graduação em biocombustíveis, [s. l.], 1 ago. 2019.

GROSELLI, A. C. **ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM DIFERENTES SISTEMAS E FASES DE CRIAÇÃO DE SUÍNOS NO OESTE DO PARANÁ.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel. 2018.

IBGE. Produção Agropecuária. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producaoagropecuaria/>. Acesso em: 10 jun. 2022.

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Summary for Policymakers.** Intergovernmental Panel on Climate Change. Suíça. 2022.

LojadoMecanico, **Bomba D' Água Centrífuga 1/3CV 250W Bivolt - FERRARI-SCM-16**, 2022. Disponível em: <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/81839/33/619/bomba-d-agua-centrifuga-13cv-250w-bivolt-ferrari-scm-16>. Acesso em: 26 nov. 2022.

LojadoMecanico **Bomba D Água Centrífuga 2CV 2.1/2 Pol. 30.000 L/h Bivolt - FERRARI-AAB1030006**, 2022. Disponível em: <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/109847/33/619/bomba-d-agua-centrifuga-2cv-212-pol-30000-lh-bivolt-ferrari-aab1030006>. Acesso em: 26 nov. 2022.

MAIS, Target. **Biodigestor: o que é?** Blog Recolast, 2018. Disponível em: <https://www.recolastambiental.com.br/blog/uncategorized/biodigestor-o-que-e/>. Acesso em: 1 dez. 2022.

MART, India. **20 KVA Biogas Generator.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/3-5-kva-biogas-generator-15912038097.html>. Acesso em: 1 dez. 2022.

MILKPOINT. **Top 100: os maiores produtores de leite do Brasil, 2022.** Disponível em: <https://www.milkpoint.com.br/top100/2022/#>. Acesso em: 28 nov. 2022.

MITO, J. Y. de L. *et al.* **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil.** Concórdia, SC: EMBRAPA, 2018.

MOTA, V. C. *et al.* **Confinamento para bovinos leiteiros: Histórico e características.** Pubvet, v. 11, p. 424-537, 2017.

NEUMANN, C.; SCALICE, R. **Projeto de Fábrica e Layout.** 2a Edição. ed. Rio de Janeiro: ISBN, 2015.

NOGUEIRA, L. A. H. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações.** 2. ed. [S.l.]: [s.n.], 2003.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Gestão do digestato para a utilização como biofertilizante na produção vegetal.** Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022. E-book. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil).

PAES, F. A. S. V. *et al.* **Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 15, p. 1081-1090, 2013. ISSN 4.

PATERSON, M. *et al.* Implementation Guide For Small-Scale Biogas Plants: A farmers handbook. **BioEnergy Farm II -Manure, the sustainable fuel for the farm,** Alemanha, 21 mai. 2015.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da usp – estudo de caso.** Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY. PENNSYLVANIA STATE EXTENSION, 2014. **Short History of Anaerobic Digestion,** 2014. Disponível em: <<https://extension.psu.edu/a-short-history-of-anaerobicdigestion>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

PEREIRA, A. V. S. *et al.* **Dimensionamento de biodigestor para resíduos bovinos de uma pequena unidade rural do município de angicos/RN.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC. Palmas/TO, 17 a 19 set. 2019.

PGA, P. G. A.-. **Usina Termoelétrica a Biogás,** 2021. Disponível em: <<https://pgambiental.com.br/usina-termoeletrica-a-biogas/>>. Acesso em: 4 jun. 2022.

PIERRI, L. *et al.* **Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais do Paraná.** Revista Ceres, Viçosa, v. 63, n. 2, p. 129137, 2016.

PIGOSSO, A. **FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS, USO E TRATAMENTO DO DIGESTATO.** Embrapa. Concórdia. 2022.

PILLON, C. *et al.* **Diagnóstico das propriedades suinícolas da área de abrangência do consórcio.** Embrapa Aves e Suínos. Concórdia. 2003.

POMPERMAYER, R. S.; PAULA JUNIOR, D. R. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos.** Encontro de Energia no Meio Rural, p. 27-34, 2000. ISSN 3.

PROBIOGÁS (Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil). **Caderno 3: Oportunidades de negócio para a comercialização do fertilizante sólido procedente do tratamento de material digerido de uma planta de biogás.** Brasil: Ministério das Cidades, 2015. 25 p.

ROCHA, Camila Marçal da. **PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO DE RESÍDUOS ALIMENTARES.** Orientador: Sue Ellen Costa Bottrel. 2016. Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Juiz de Fora, 2016.

ROHSTOFFE, F. N. **Guia Prático do Biogás.** Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Gülzow. 2010.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. **Biogas: Developments and perspectives in Europe.** Elsevier, Itália, 28 março 2018. 458-471.

SENAI. **Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o estado do Paraná.** Senai/PR. Curitiba, p. 144. 2016.

SILVA, F. P. **Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura.** Cascavel, 2015.

SNIS. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília. 2021.

SOUZA, L. M.; FREITAS, F. A. D.; GONÇALVES, S. C. **BIODEGRADABILIDADE PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL*.** **Divers@ Revista Eletrônica Interdisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 26-38, jan/jun, 2018.

STEVENSON, W. J. **Administração das Operações de Produção.** LTC. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

TEIXEIRA, M. B. **Manejo de esgotos sanitários: Alternativas para o loteamento popular em Porto Alegre**. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

THIEME, E. *et al.* **Catálogo de tecnologias e empresas de biogás**. Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

TORRES, O. F. F. **Fundamentos da Engenharia Econômica e da Análise Econômica de Projetos**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

UEM, Universidade Estadual de Maringá. **Tipos de bombas**. Maringá, 2014. Disponível em: <http://armariodaeq.blogspot.com/2014/10/bombas-bombas-sao-maquinas-operatrizes.html>. Acesso em: 1 dez. 2022.

VIANCELLI, A. *et al.* **Produção animal e recursos hídricos Tecnologias para manejo de resíduos e uso eficiente dos insumos**. Brasília. 2019.

ZHANG, LIGUO & LI, JIANZHENG & BAN, QIAOYING & HE, JUNGUO & JHA, AJAY KUMAR. **Metabolic pathways of hydrogen production in fermentative acidogenic microflora**. Journal of microbiology and biotechnology. 22. 668-73. 2012.