

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO HENRIQUE REIS

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMA DE BIODIGESTOR DE
LAGOA COBERTA EM ÁREA RURAL PARA GERAÇÃO DE VALOR E
ENERGIA ELÉTRICA**

CURITIBA

2022

PAULO HENRIQUE REIS

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMA DE BIODIGESTOR DE
LAGOA COBERTA EM ÁREA RURAL PARA GERAÇÃO DE VALOR E
ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista, Curso de Especialização em Eficiência Energética e Geração Distribuída, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. André Bellin Mariano

CURITIBA

2022

Reis, Paulo Henrique

ABCD Estudo de viabilidade técnica e econômica da implantação e operação de sistema de biodigestor de lagoa coberta em área rural para geração de valor e energia elétrica / Paulo Henrique Reis. – Curitiba, 2022.

xx f.: il. (algumas color.); 29 cm.

Orientador: André Bellin Mariano.

Monografia (Especialização em Eficiência Energética e Geração Distribuída) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia.

1. Biodigestor. 2. Energia Elétrica. I. Título.

CDD XXX.X
CDU
XXX.XXX.XX



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA -
40001016317E1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Monografia de Especialização de PAULO HENRIQUE REIS intitulada: ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMA DE BIODIGESTOR DE LAGOA COBERTA EM ÁREA RURAL PARA GERAÇÃO DE VALOR E ENERGIA ELÉTRICA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de especialista está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 18 de fevereiro de 2022.

Andre Bellin Mariano
Presidente da Banca Examinadora

Prof. Dr. ANDRÉ BELLIN MARIANO
Docente do Depto. de Eng. Elétrica
Matrícula UFPR 205111

Vilson Roiz Gonçalves Rebelo da Silva
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Prof. Dr. Wilson Roiz Gonçalves Rebelo da Silva
PROFESSOR DO DEPTO. DE ENG. ELÉTRICA
Matrícula UFPR 70904

Dedico este estudo a todos os professores e mestres que se dedicam incansavelmente à árdua arte de ensinar.

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada e acima de tudo agradeço ao meu bom Deus pelas condições e oportunidades de desenvolvimento. À minha família pelo constante incentivo e apoio. Agradeço ao meu professor orientador Dr. André Bellin Mariano pelo compartilhamento de preciosas informações e conhecimentos, bem como pelo seu entusiasmo com a temática proposta. Agradeço ainda ao meu amigo Tiago A. Colzani por sempre elevar o nível dos debates e por compartilhar esta jornada de conhecimento comigo.

RESUMO

A demanda por alimentos no mundo é um dos grandes desafios da atualidade e o consumo de proteína animal tem se mostrado indispensável, conforme a escala ascendente de sua comercialização ao longo das últimas décadas. O Brasil é detentor de alguns dos maiores rebanhos e plantéis do mundo, o que traz consigo uma gigantesca responsabilidade no manejo da cadeia produtiva e seus impactos ambientais. O tratamento dos dejetos da suinocultura é extremamente necessário e encarar este efluente como um ativo capaz de gerar energia e fornecer fertilizantes abre inúmeras oportunidades de agregar valor à atividade suinícola. O objetivo deste trabalho foi determinar as condições técnicas para, através dos biodigestores de lagoa coberta, converter esta oportunidade em negócios exequíveis bem como mensurar sua viabilidade econômica. Para tanto, foram realizados cálculos contemplando a realidade de mais de 70% das propriedades rurais, simulando um plantel entre 600 e 1200 suínos, determinando o volume de dejetos gerado e o potencial de produção de biogás. Foi estimado ainda o volume de nutrientes disponíveis no digestato e a energia elétrica gerada com a queima do biogás, ficando ente 120 e 240 Kw/h/dia. De posse destes dados foi possível mensurar os custos evitados na propriedade e assim comparar a oportunidade com outros investimentos disponíveis no mercado. Os resultados apontaram para a viabilidade técnica e econômica dos projetos com tempo de retorno entre 4,6 e 5,7 anos e taxa interna de retorno entre 19% e 25%, o que agregaria valor às propriedades rurais e contribuiria efetivamente com a sustentabilidade do mercado de produção de carne suína.

Palavras-chave: Biogás, Biofertilizante, Energia Elétrica, Sustentabilidade.

ABSTRACT

Our global food system is currently one of the world's most critical challenges as well as animal protein's consumption proves to be indispensable, as per its increasing commercialization scale over the last decades. Brazil holds some of the largest herds and squads in the world, which demands high responsibility concerning the production chain management as well as its environmental impacts. Swine waste's treatment is extremely needed and to consider this effluent as a capable source of energy generating and fertilizers providing, brings up countless opportunities to add significant value to the swine's industry. Thus, this paper aimed to determine the technical conditions to convert, through biodigesters, such an opportunity into feasible business, as well as measuring its economic viability. To this end, calculations were performed contemplating the reality of more than 70% of rural properties, simulating a squad between 600 and 1200 pigs, determining the volume of waste generated and the potential for biogas production. The volume of nutrients available in the digestate and the electric energy generated from biogas' burning have also been estimated, ranging from 120 to 240 Kw/h/day. From such data, it was possible to measure the avoided costs in the property and thus compare the referred opportunity with other investments available in the market. The results indicated both technical and economic feasibility of projects with payback time estimated between 4.6 and 5.7 years with internal rate of return between 19% and 25%, which would add value to rural properties and effectively contribute to the sustainability of the pork production market.

Key words: Biogas, Biofertilizer, Energy Sustainability

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: PROCESSOS DE HIDRÓLISE, ACIDOGÊNESE, ACETOGÊNESE E METANOGÊNESE	18
FIGURA 2: DESENHO ESQUEMÁTICO DE REATOR UASB	23
FIGURA 3: ESQUEMA REPRESENTATIVO DA VISÃO INTERNA DO REATOR MODELO LAGOA COBERTA	24
FIGURA 4: BIODIGESTOR DE LAGOA COBERTA.....	25

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: REQUISITOS AMBIENTAIS DOS MICRORGANISMOS ANAERÓBIOS MESOFÍLICOS	19
TABELA 2: PONTOS IMPORTANTES PARA A ESCOLHA DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO ...	21
TABELA 3: POSSÍVEIS PROBLEMAS ENCONTRADOS NA OPERAÇÃO DE BIODIGESTORES, CAUSAS E MEDIDAS PARA SOLUCIONAR	26
TABELA 4: COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS	27
TABELA 5: PRODUÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE DEJETOS NAS DIFERENTES FASES PRODUTIVAS DOS SUÍNOS	28
TABELA 6: SENÁRIO HIPOTÉTICO QUE CONTEMPLA O CICLO COMPLETO DE PRODUÇÃO EM UMA PROPRIEDADE SUINÍCOLA COM 463 ANIMAIS.....	29
TABELA 7: OFERTA DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO CALCULADA A PARTIR DOS DEJETOS POR ANIMAL.....	30
TABELA 8: QUANTIDADE DE NPK QUE CADA CULTURA DEMANDA.....	31
TABELA 9: VOLUME DE DEJETOS LÍQUIDOS PRODUZIDOS POR ANIMAL E CATEGORIA POR DIA	34
TABELA 10: PORCENTAGENS DE MACRONUTRIENTES POR MATÉRIA-PRIMA.....	38
TABELA 11: CUSTO DE MATÉRIA PRIMA	39
TABELA 12: CUSTOS PARA AQUISIÇÃO E IMPLANTAÇÃO	40
TABELA 13: VOLUME DO BIODIGESTOR POR PROPRIEDADE	41
TABELA 14: VOLUME DE BIOGÁS PRODUZIDO	41
TABELA 15: QUANTIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA.....	42
TABELA 16: QUANTIDADE TEÓRICA DE NUTRIENTES CONTIDAS NO DIGESTATO.....	43
TABELA 17: PERDAS OU REMOÇÃO DE NUTRIENTES E EFICIÊNCIA.....	44
TABELA 18: PREÇO DE NUTRIENTES CORRELATOS	44

TABELA 19: REDUÇÃO DE CUSTOS COM NUTRIENTES	44
TABELA 20: CUSTO MENSAL EVITADO COM ENERGIA ELÉTRICA E NUTRIENTES	45
TABELA 21: INVESTIMENTO	46
TABELA 22: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	47

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1: VOLUME TOTAL DE DEJETOS AO DIA	36
EQUAÇÃO 2: PRODUÇÃO DIÁRIA DE BIOMETANO	37
EQUAÇÃO 3: PROPORÇÃO DE BIOMETANO.....	37
EQUAÇÃO 4: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO ANUAL DE N, P OU K EM KG/ANO	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	O PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA	15
2.1.1	Biodigestão.....	15
2.1.2	Parâmetros do processo.....	18
2.1.3	Biodigestores	20
2.1.4	Operação do reator.....	25
2.2	BIOGÁS	27
2.2.1	Definição.....	27
2.2.2	Riscos/segurança	27
2.3	DIGESTATO	28
2.3.1	Propriedades de fertilização	30
2.4	GERAÇÃO ELÉTRICA COM O BIOGÁS.....	31
2.5	REDUÇÕES CERTIFICADAS DE EMISSÃO - RCEs	32
2.6	MODELO DE ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	33
3	DESAFIOS	34
4	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	35
4.1	OBJETIVO GERAL	35
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	35
5	METODOLOGIA	35
5.1	DIMENSIONAMENTO DO REATOR	36
5.2	SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	36
5.3	GANHO FINANCEIRO ATRAVÉS DO DIGESTATO	37
5.4	ESTRUTURA DE CUSTOS PARA A IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	39
6	RESUTADOS E DISCUÇÕES	40

7	CONCLUSÃO	48
7.1	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	49
8	BIBLIOGRAFIA	50

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos no mundo tem imposto significativos desafios no aumento da eficiência na produção e melhor utilização de recursos. Para tal, e aliado ao natural desenvolvimento da sociedade, a demanda por energia vem sendo igualmente pressionada. Em contrapartida, a exigência de menores emissões de poluentes e melhor gestão de recursos naturais parece oferecer um paradoxo para o meio produtivo.

Países com extensas áreas agrícolas possuem grande potencial para implementar avanços em seus processos produtivos utilizando tecnologia ambientalmente amigável e aproveitando recursos que outrora eram desperdiçados, tal como a energia solar. O Brasil tem atuado com protagonismo nesse cenário implementando plantas industriais para a extração da energia apropriada pela fotossíntese da cana de açúcar com a destilação do álcool, como fonte de energia química, e energia elétrica pela queima do bagaço da cana já processada.

O Protocolo de Quioto foi ratificado em fevereiro de 2005 por 184 países delimitando as metas de redução de emissões mundiais de gases do efeito estufa (GEEs). Com isso, criou-se também o mercado de carbono que até então vinha caminhando voluntariamente com o pioneirismo de algumas empresas interessadas em aprender a lidar com esta nova commodity. A partir do momento em que o mercado de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) passou a apresentar um arcabouço institucional estabelecido, tornou-se relevante estudar como as empresas proponentes de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e os canais de comercialização constituídos por financiadores estão realizando as suas transações (Bernstorff, 2009).

Atualmente no sul do Brasil existe expressiva quantidade de propriedades rurais de pequeno e médio porte e até empresas que geram resíduos orgânicos com alto potencial energético (Por exemplo: Fezes e urina animal, restos de abate, palha de milho, folhas, outras biomassas, etc.).

De acordo com o Censo Agropecuário, Florestal e Agrícola publicado pelo IBGE (IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021) os três estados que compõem esta região possuem 853.314 estabelecimentos rurais com uma área média de 50 ha. Segundo este mesmo censo “no Brasil cerca de 70% dos estabelecimentos tem área entre 1 e 50 ha”, ou seja, em torno de 600 mil destes estabelecimentos enquadram-se como pequenas propriedades. Tais parcelas de solo não são próprias para o cultivo de culturas que possam ser diretamente utilizadas para a geração de energia. Além disso, observa-se baixos índices de subutilização do solo. Muitas destas propriedades não possuem soluções para o correto despejo de resíduos oriundos das criações de animais, próprias da região. No entanto, os efluentes em questão são compostos orgânicos com alto potencial energético e de nutrientes. Em 2017, o Brasil já contava com cerca de 172 milhões de cabeças de gado, 39 milhões de suínos e mais de 1,3 bilhão de galináceos (IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021), ocupando as primeiras colocações na lista de maiores produtores mundiais de proteína animal.

Observa-se também um interesse nacional na descentralização da matriz energética a partir da Geração Distribuída, inclusive com a publicação, por iniciativa da agência reguladora ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, de diversas resoluções e manuais fomentando o aumento da geração distribuída no país, a exemplo da Resolução Normativa nº 687/2015 que revisou a Resolução Normativa nº 482/2012.

A geração de biogás através de biodigestores é uma tecnologia disponível no mercado, porém o uso em propriedades de pequeno porte ainda é restrito.

Este estudo visa definir um modelo que apresente viabilidade técnica e econômica para a implantação e operação de sistema de biodigestor de lagoa coberta para geração de biogás e consequente geração de energia elétrica na modalidade de autoconsumo, bem como a apropriação de benefícios adjacentes, tais como a energia térmica, o biofertilizante e o tratamento de efluentes em pequenas e médias propriedades rurais no sul

do Brasil.

A disponibilidade de matéria para a geração de biogás e a implantação destes sistemas pode viabilizar o aproveitamento de inúmeras oportunidades de negócio, uma vez que além do expressivo número de propriedades nessa região que não aproveitam o potencial energético e econômico da biomassa, inclusive gerando passivos ambientais e/ou custos de tratamento de resíduos, como dejetos animais, restos de abate, etc., os proprietários destas terras em geral não dispõem de vasto conhecimento para a aplicação de modelos técnicos e econômicos que permitam a transformação deste passivo ambiental e do potencial da biomassa em um ativo energético e comercialmente viável.

Encontrar um modelo economicamente viável para a geração e o uso do biogás, além de maximizar os resultados financeiros, contribuirá para a sustentabilidade da matriz energética nacional e para o desenvolvimento do conhecimento no meio acadêmico.

Sendo assim há real oportunidade de contribuir com a sociedade apontando um modelo exequível técnica e economicamente para o uso de biogás destas propriedades, ampliando as possibilidades de investimentos.

Com base nos resultados alcançados será possível mensurar o potencial de geração energética de propriedades rurais, de acordo com os parâmetros propostos, e calcular resultados financeiros possíveis, seja na redução de custos, seja na monetização de produtos. Tal conhecimento deve auxiliar o processo de tomada de decisão de proprietários e investidores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA

2.1.1 Biodigestão

A biodigestão consiste no processamento de matéria orgânica por

meio da ação direta de microrganismos em ambiente com condições anaeróbias. As comunidades microbianas anaeróbias são constituídas por microrganismos pertencentes aos domínios Bactéria e Arquea, que vivem em ambientes onde o oxigênio molecular está ausente. Estas comunidades desempenham um papel fundamental na decomposição da matéria orgânica, num processo designado por digestão anaeróbia (Cavaleiro & Alves, 2020). De tal contexto é observada a emissão de gases, predominantemente dióxido de carbono CO₂ e metano CH₄, advindo processo de respiração celular.

O processo de biodigestão pode ser dividido e apresentado em 4 fases distintas, a saber: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos, em sintrofia, e podem requerer diferentes condições ambientais (do Amaral, et al., 2019).

A hidrólise é a etapa responsável pela degradação dos compostos de alta densidade molecular, tais como lipídios, polissacarídeos e proteínas. O resultado são substâncias orgânicas mais simples e solúveis, os monômeros. As enzimas extracelulares excretadas pelos microrganismos hidrolíticos são responsáveis pela ação de degradação em si, no entanto, a complexidade da matéria orgânica encontrada no substrato a ser processado pode interferir diretamente no tempo necessário para a hidrólise e até mesmo resultar em um processo incompleto.

Na acidogênese, os aminoácidos e açúcares resultantes da hidrólise são transportados para o interior das células, dessa maneira os monômeros obtidos na fase de hidrólise são degradados a ácidos orgânicos de cadeia curta, com moléculas de 1 a 5 carbonos. Geralmente as mesmas bactérias responsáveis pelas enzimas da hidrólise são também responsáveis pela acidogênese, compondo assim colônias que podem corresponder a 90% dos microrganismos presentes no biodigestor. Comumente são encontradas bactérias como *Lactobacillus* e *Clostridium* executando esta função.

Na acetogênese ocorre a oxidação dos elementos gerados na acidogênese, tornando-os substrato apropriado para o consumo das

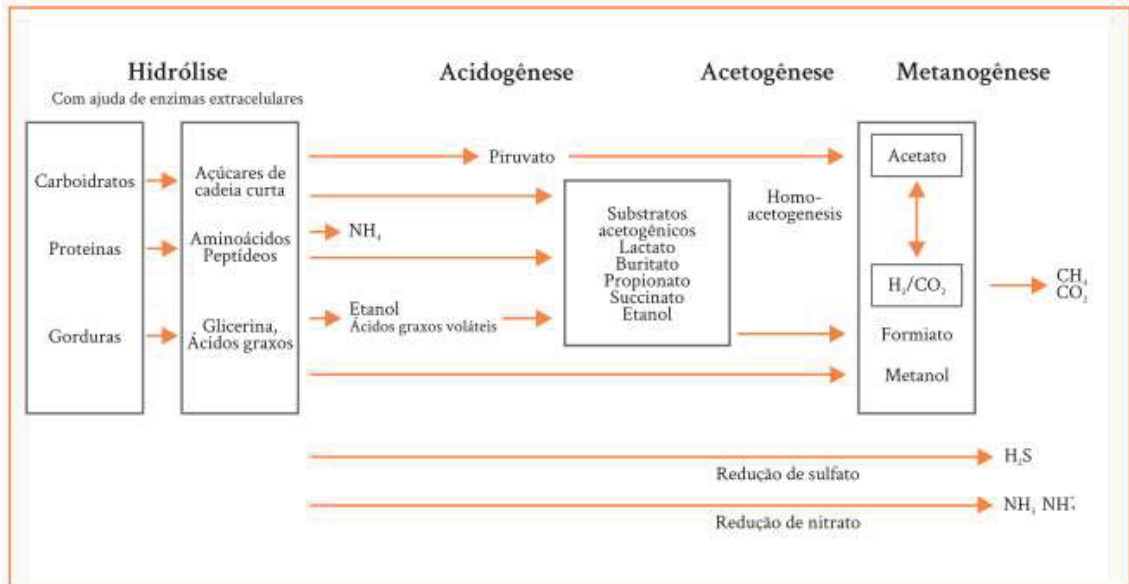
bactérias da metanogênese. As bactérias acetogênicas estabelecem relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Nessa etapa os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono (fórmico e acético), com a concomitante produção de hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias homoacetogênicas regem o equilíbrio da direção da reação de consumo de hidrogênio e gás carbônico para produção de acetato. Para que a formação de ácidos de cadeia curta seja termodinamicamente favorável, esta deve ocorrer associada ao consumo de hidrogênio gasoso pelas arqueas metanogênicas. A simbiose entre organismos dos grupos microbianos distintos possibilita que ambos apresentem crescimento, assegurando a viabilidade de produção de acetato a partir de ácidos orgânicos. (do Amaral, et al., 2019)

A metanogênese é um processo exclusivamente anaeróbico que ocorre por três vias principais: metanogênese redutora de CO_2 ou hidrogenotrófica, metanogênese acetotrófica ou acetoclástica e vias metilotróficas (Khanal, 2009). Segundo Campos (Campos, 1999) e Chernicharo (Chernicharo, 1997), as bactérias metanogênicas são divididas em dois grupos em função de suas afinidades com o substrato: um produz o metano a partir de ácido acético ou metanol, e o segundo a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. O resultado desta fase é essencialmente a mistura gasosa de CH_4 e CO_2 , conhecida como biogás. Traços de H_2 e H_2S também estão presentes no biogás e são relevantes na avaliação para seu uso.

As arqueas metanogênicas acetoclásticas são mais sensíveis às mudanças de pH e elevadas concentrações de amônia, a qual é característica de substratos agropecuários (diferente de esgoto sanitário). Esse fato pode implicar no predomínio das arqueas metanogênicas hidrogenotróficas. Na ausência das metanogênicas acetoclásticas, o acetato produzido durante a biodigestão é oxidado pelas bactérias homoacetogênicas produzindo CO_2 e H_2 Figura 1, os quais são utilizados como substrato pelas arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, produzindo

metano. (do Amaral, et al., 2019)

Figura 1: Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011)

2.1.2 Parâmetros do processo

O metabolismo dos microrganismos anaeróbios mesofílicos são dependentes de diversos fatores, com isso, para um ótimo processo de fermentação, múltiplos parâmetros devem ser considerados e controlados. (do Amaral, et al., 2019)

É válido ressaltar que os processos de biodigestão ocorrem simultaneamente dentro do um mesmo reator, o que eleva a importância da referenciada sintrofia nos resultados produtivo, conforme demonstrado na Tabela 1, e, portanto, na eficiência do processo.

A concentração de hidrogênio precisa ser equilibrada tanto em função das arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, que demandam moléculas do elemento para a formação de CH_4 , quanto por parte das bactérias responsáveis pela acetogênese, que podem ter seu crescimento inibido sob elevada pressão de hidrogênio.

Tabela 1: Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos

PARÂMETROS	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
TEMPERATURA	25 - 35	32 - 42
PH	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
RELAÇÃO C:N	out/45	20 - 30
CONCENTRAÇÃO DE MATÉRIA SECA (%)	<40	<30
POTENCIAL REDOX (MV)	+400 até -300	<-200
RELAÇÃO DE C:N:P:S NECESSÁRIA	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
ELEMENTOS TRAÇOS	-	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Fonte: adaptado de (Murphy, et al., 2013)

A pressão parcial de hidrogênio máxima depende das espécies de microrganismos envolvidos e também das características do substrato. Para conversão anaeróbia do propionato via ácido acético e dióxido de carbono/hidrogênio para metano, a janela energética é especialmente pequena. As baixas pressões parciais só podem ser mantidas se o hidrogênio formado for rapidamente e efetivamente removido pelos microrganismos consumidores de hidrogênio. (do Amaral, et al., 2019)

A temperatura é possivelmente um dos fatores mais relevantes no processo natural de seleção de espécies. Existem três faixas ótimas de temperatura para a metanogênese: psicrotrófica (4 – 15°C); mesofílica (20 – 40°C); e termofílica (45 – 70°C) (Chernicharo, 2007). Para o contexto climático brasileiro é possível afirmar que a maioria das arqueas metanogênicas que se desenvolvem em reatores anaeróbios são enquadradas na faixa mesofílica.

O pH do sistema é controlado pela concentração de dióxido de carbono na fase gasosa e HCO₃⁻ alcalino na fase líquida Tabela 1. Durante a biodigestão, o CO₂ é continuamente liberado como gás. Se o pH do sistema diminuir excessivamente, uma maior quantidade de CO₂ permanecerá dissolvido no meio reacional. Se o pH do sistema aumentar, o

CO₂ dissolvido formará ácido carbônico, assim íons de hidrogênio serão liberados (Deublein & Steinhauser, 2011). A faixa ótima de pH para esta associação é de 6,6 a 7,4, devendo ser evitados valores abaixo de 6 e acima de 8 (Chernicharo, 2007).

2.1.3 Biodigestores

O processo de biodigestão, do independente de sua principal finalidade, está diretamente relacionado à escolha do reator, seja em função do seu custo, tecnologia, parâmetros de operação, eficiência, tipo de substrato, espaço físico, dentre outros, conforme Tabela 2. A disponibilidade de mercado fornecedor de peças e serviços de manutenção é um dos fatores críticos para o sucesso de um empreendimento dessa natureza, haja visto a indesejável dependência cambial para importações, a morosidade inerente ao processo e a frequente impossibilidade econômica de obter-se manutenção por meio de equipes vindas do exterior. Conforme o item 2.1.1, o processo de biodigestão dependerá diretamente a ação dos microrganismos e a velocidade deste processo será influenciada pelos parâmetros do processo e pela configuração dos reatores.

Sob a ótica dos parâmetros de operação, segundo (do Amaral, et al., 2019), os biodigestores são caracterizados pelo regime de alimentação (batelada ou contínuo), forma de alimentação (ascendente ou laminar), concentração de sólidos no reator (digestão sólida >20%, semissólida 10 a 15% e úmida <10%) e sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura).

Os biodigestores conhecidos como tipo chinês e o tipo indiano não serão abordados em função de sua estrutura rudimentar e, apesar do baixo custo, baixa eficiência. Biodigestores em fase sólida também não são adequados para o que se propõe este estudo, dentre outros, em função de sua alimentação por batelada.

Tabela 2: 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 semi-contínua para fluxo em pistão/ digestores CSTR; Sistema de alimentação sólido ou líquido, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato.
TEMPERATURA DO REATOR	Riscos para patógenos	Temperatura mesofílica quando não há risco de patógenos; Temperaturas termofílica quando houver risco de patógenos (ex: lixo orgânico doméstico)
NÚMERO DE FASES	Composição de substratos, risco de acidificação	Sistema de uma fase quando não há risco de acidificação; Sistema de duas fases quando há substrato com elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação.
SISTEMA DE AGITAÇÃO	Matéria-prima seca para alimentação	Agitadores mecânicos para alta concentração de sólido no biodigestor; Sistemas de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor.

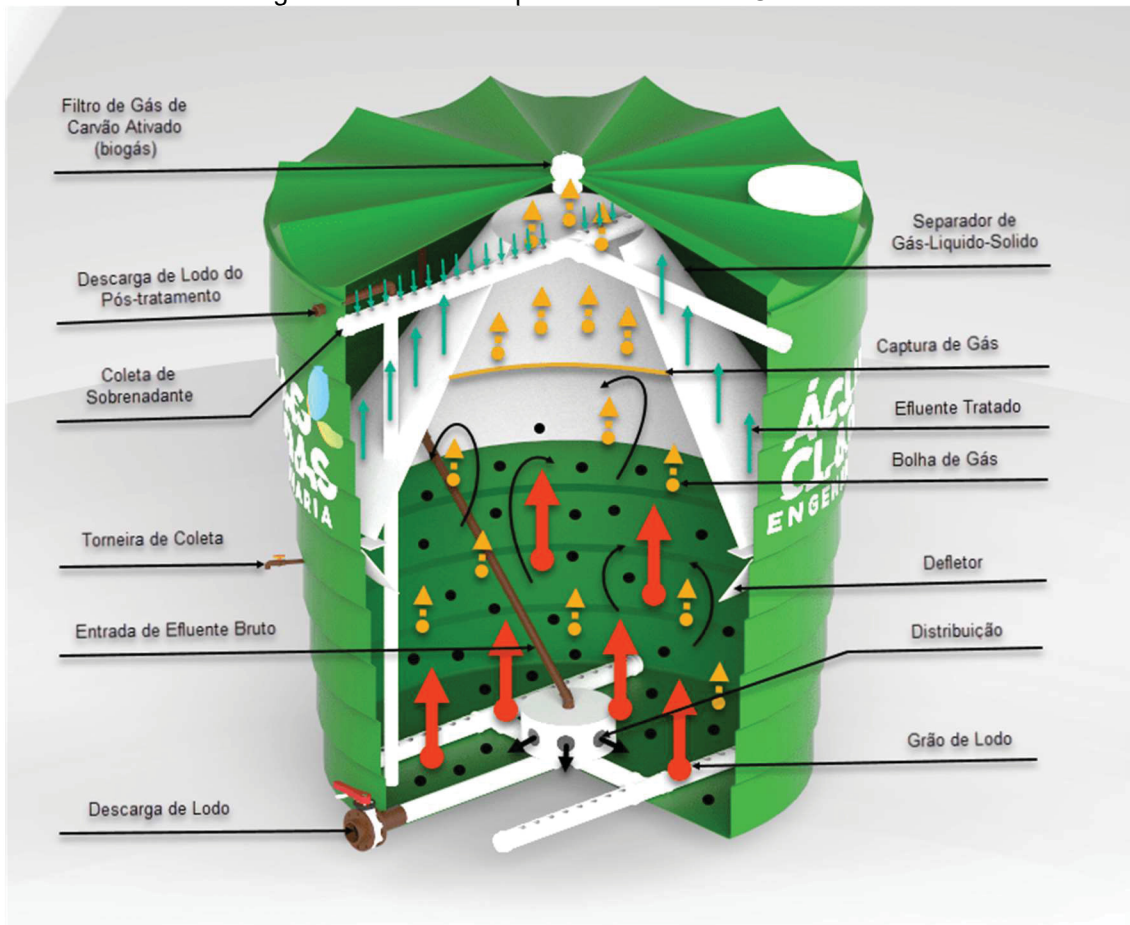
Fonte: (do Amaral, et al., 2019).

Os processos modernos de metanação são desenvolvidos para manter a biomassa ativa imobilizada no reator. Isso pode ser conseguido por formação de um lodo sedimentável combinado com a separação do gás (UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket e Anaerobic Baffled Reactor); biomassa aderida em um material particulado de alta densidade (Reator de Leito Fluidizado, Reator de Leito Expandido); aprisionamento do lodo no recheio do reator (Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente ou Descendente) (Saleh & Mahmood, 2004).

O biodigestor do tipo UASB, é caracterizado pelo fluxo ascendente do processo, como prevê sua denominação. O substrato flui a partir do leito de lodo, um ambiente de maior densidade e favorável à sedimentação, por uma manta de lodo, ambiente de menor densidade e menos favorável à sedimentação. Ambas as etapas compõem o compartimento de digestão,

conforme observa-se na Figura 2, por ser este um ambiente apropriado para o desenvolvimento de bactérias e microrganismos responsáveis pela biodigestão. A formação de bolhas de gás promove o característico movimento ascensional da matéria até a parte superior do reator, chegando ao separador trifásico (gases, sólidos e líquidos). A separação da porção mais densa direciona a matéria orgânica não digerida para o compartimento de decantação, o que faz com que ela retorne ao processo, melhorando a eficiência do conjunto. No processo de elevação, as bolhas formadas no compartimento de digestão ainda estão em sua fase líquida. Ao encontra a interface líquido-gás, o gás se desprende formando sua fase gasosa, aumentando drasticamente a diferença de densidade em relação à porção líquida. Esta diferença propicia a extração do biogás pela parte superior do reator, enquanto a porção líquida forma o efluente do processo, o qual é coletado e não mais retorna ao processo. Afim de inibir turbulência no compartimento de decantação, utiliza-se os defletores de gás para direcionar as bolhas para o separador trifásico.

Figura 2: Desenho esquemático de reator UASB



Fonte: CHERNICHARO (2007) e (Águas Claras Engenharia, 2022)

Em que pese os biodigestores de lagoa coberta (BLC)

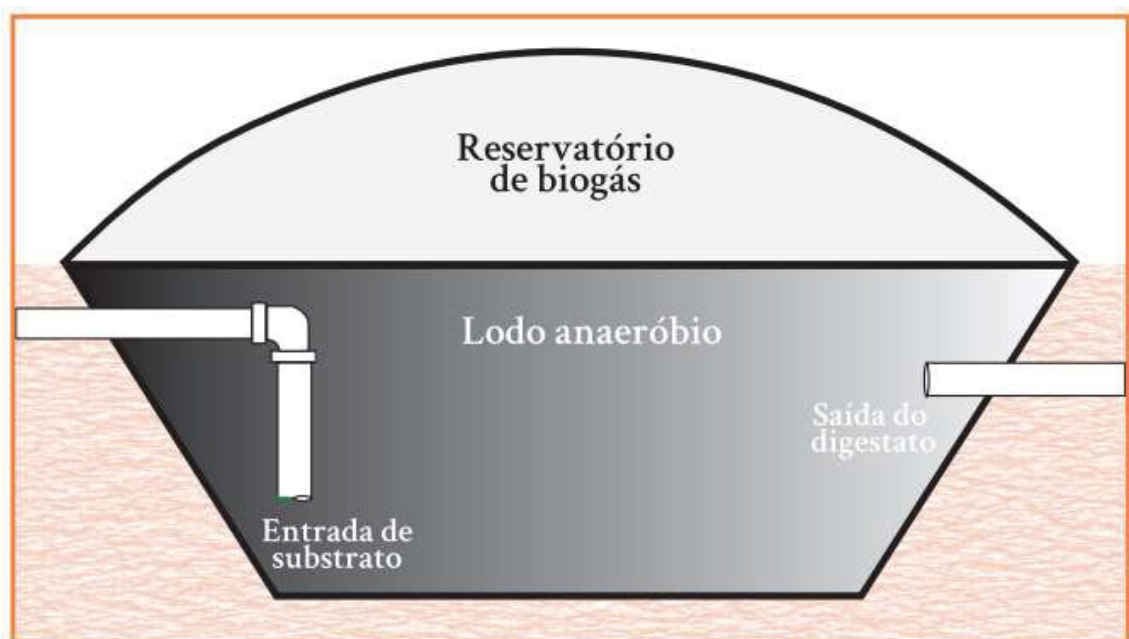
Figura 4 sejam reatores de primeira geração, sua eficiência é relativamente satisfatória, a complexidade operacional é baixa e os custos de aquisição e instalação são mais acessíveis aos pequenos empreendedores. A disponibilidade de peças e equipamentos em território nacional se soma às vantagens deste modelo, o que o leva a ser a escolha mais adequada para o desenvolvimento do estudo.

O BLC, também chamado de biodigestor de fluxo tubular, é um biodigestor contínuo horizontal de simples construção, que possui uma tecnologia moderna

Figura 4. Ele é constituído basicamente por duas partes: a superior, denominada campânula (ou campana), destinada a reservar o biogás produzido pela fermentação anaeróbica, e a parte inferior, denominada fossa, destinada à mistura líquida (excremento de animais mais água) que entra no sistema Figura 3. Durante a produção de biogás, a cúpula de material plástico maleável infla-se, acumulando o biogás. Conforme os dejetos vão sendo introduzidos no tanque do biodigestor, o material mais antigo vai sendo deslocado para o extremo oposto (JÚNIOR & SOUZA, 2009).

Sua largura é maior e sua profundidade é menor do que as dos biodigestores indiano e chinês, o que resulta em maior área de exposição solar. Portanto, eles são mais sensíveis às mudanças de temperatura. No entanto, possibilitam uma maior produção de biogás por volume de massa fermentada devido à sua forma. Por esta razão é recomendado que sejam operados em regiões mais quentes ou sejam equipados com sistemas de aquecimento ou protegidos do vento. O tempo de retenção hidráulico (TRH) nesse equipamento é em torno de 30 a 35 dias (BEZERRA, 2011).

Figura 3: Esquema representativo da visão interna do reator modelo lagoa coberta



Fonte: (do Amaral, et al., 2019).

Figura 4: Biodigestor de lagoa coberta



Fonte: (Anon., 2021)

Esse modelo de biodigestor, geralmente, é utilizado para tratamento de efluentes com baixa concentração de sólidos, até cerca de 3% (m.v-1) de sólidos totais, e uma baixa carga orgânica volumétrica (COV), entre 0,3 a 0,5 kgSV.m⁻³ reator.d-1. A produtividade de biogás por volume de reator encontra-se entre 0,03 e 0,15 m³ .m⁻³ reator.d-1 (CANTREL, et al., 2008).

2.1.4 Operação do reator

Inúmeros são os aspectos e fatores que influenciam diretamente na eficiência e operacionalidade dos sistemas de biodigestão, no entanto o fator humano certamente é o que mais frequentemente implica na inviabilidade de projetos teoricamente eficientes. A Tabela 3 demonstra alguns dos parâmetros observados, que denotam problemas no sistema, suas consequências diretas e possíveis maneiras de resolver o problema. Nota-se que a sobre alimentação, sub alimentação ou variação no tipo de substrato no sistema são frequentemente citados como causa ou solução para determinados problemas. Todos são fatores diretamente ligados ao manejo dos materiais e operação do reator.

Tabela 3: Possíveis problemas encontrados na operação de biodigestores, causas e medidas para solucionar

POTENCIAL DE REDOX PRÓXIMO A ZERO	Condição Anóxica ou Óxica	Medir OD Medir NOX Verificar a atividade do inóculo
EXCESSO DE ESCUMA E ESPUMA	Sobrecarga no sistema	Diminuir a carga orgânica volumétrica
ARRASTE DE SÓLIDOS	Vazão elevada	Diminuir a vazão do sistema
LODO COM COLORAÇÃO CINZA CLARO	Potencial de redox fora da condição de anaerobiose	Medir OD Medir NOX Verificar a atividade do inóculo
BIOGÁS NÃO QUEIMA	Baixa concentração de metano (inferior a 15)	Verificar a atividade do inóculo Diminuir a vazão de alimentação
FALTA DE ALCALINIDADE PH BAIXO	Qualidade do substrato	Suplementar a alcalinidade
SÚBITA REDUÇÃO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	Acúmulo de AOV	Diminuir vazão Ajustar alcalinidade
SÚBITA REDUÇÃO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	Sobrecarga ou subcarga no sistema Presença de agentes inibidores	Verificar vazão Verificar concentração de SV no substrato Avaliar se houve mudança na característica do substrato
ELEVADA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDO FIXO NO LODO (>50%)	Característica do substrato	Descarte controlado de lodo Pré-tratamento do substrato para a remoção de SF

Fonte: (do Amaral, et al., 2019)

2.2 BIOGÁS

2.2.1 Definição

O biogás é uma mistura gasosa composta majoritariamente por gás metano e dióxido de carbono, conforme Tabela 4. O metano por sua vez, corresponde à porção inflamável do composto, sendo o grande responsável pelo seu potencial calorífico, que pode variar entre 15 e 30 Mj N/m³, segundo Abatzoglou e Boivin, 2009 (ABATZOGLOU & BOIVIN, 2009). O dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais constituintes do biogás, correspondendo a um volume de 20 a 30% em substratos provenientes de resíduos da agricultura (WELLINGER, et al., 2013).

Tabela 4: Composição do Biogás

SUBSTÂNCIA	QUANTIDADE (%)
CH ₄	54-80
CO ₂	20-45
H ₂ S	Traços
N ₂	Traços

Fonte: o autor.

2.2.2 Riscos/segurança

O biogás, em função dos seus constituintes, já representa um perigo com riscos químicos e físicos atribuídos. A mistura gasosa que compõe o biogás apresenta propriedades asfixiantes (sufocamento). Outros aspectos como corrosividade e toxicidade do sulfeto de hidrogênio (H₂ S), toxicidade da amônia (NH₃), além da inflamabilidade do metano (CH₄) e hidrogênio (H₂) também devem ser considerados (do Amaral, et al., 2019).

O monitoramento constante do reator, gasômetro e dutos é fundamental para a precoce detecção de quaisquer vazamentos. Em reatores de primeira geração, pode-se utilizar uma solução de detergente a 2% com água aplicada nas conexões, válvulas, juntas de vedação e lona. A eventual formação de bolhas implicará em um vazamento de gás.

A eletricidade e o calor também devem ser considerados no projeto do reator e seus sistemas. O aterramento de dutos, por exemplo, pode evitar faíscas ou descargas. A instalação de sistema de prevenção de descargas atmosféricas pode se fazer necessário, a depender de cada região.

2.3 DIGESTATO

Os reatores de biodigestão, sobretudo os Biodigestores de lagoa coberta (BLC), recebem na entrada do seu processo o substrato diluído em água. O processo de digestão é realizado em seu interior e o efluente líquido final obtido recebe o nome de digestato. Trata-se de um fluido rico em macronutrientes, tais como N, P₂O₅ e K₂O (nitrogênio, pentóxido de fósforo e óxido de potássio). Um dos maiores desafios para a consolidação da biodigestão no Brasil é a correta destinação final de tais efluentes, que por sua vez podem colaborar com a redução nos custos com fertilizantes nas lavouras.

A produção de dejetos por categoria animal, de acordo com o Boletim Informativo de Pesquisa e extensão (Dartora, et al., 1998), observa as medidas e proporções descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos

CATEGORIA	ESTERCO (KG/DIA)	ESTERCO + URINA (KG/DIA)	DEJETOS LÍQUIDOS (LITROS/DIA)
SUÍNOS 25 A 100KG	2,3	4,9	7
PORCAS GESTAÇÃO	3,6	11	16
PORCAS LACTAÇÃO + LEITÕES	6,4	18	27
CACHAÇO	3	6	9
LEITÕES NA CRECHE	0,35	0,95	1,4
MÉDIA	2,35	5,8	8,6

Fonte: Adaptado de Oliveira (1993) (Oliveira, 1993)

Pra compreender a dinâmica produtiva de uma propriedade suinícola, observa-se o ciclo completo, de acordo com Oliveira, (Oliveira, 2002), conforme Tabela 6.

Tabela 6: Senário hipotético que contempla o ciclo completo de produção em uma propriedade suinícola com 463 animais

	MEMÓRIA DE CÁLCULO	DEJETO/DIA/ANIMAL
GESTAÇÃO:	42 matrizes x 2 partos/ano = 84 partos/ano x 121 dias (7 dias de vazio mais 114 de gestação) = 10.164 dias x 0,0162 m ³ /dia de dejetos = 164,66 m ³ /ano	0,0162 m ³ /dia
LACTAÇÃO:	42 matrizes x 2 partos/ano = 84 partos/ano x 28 dias de lactação = 2.352 dias x 0,027 m ³ /dia de dejetos = 63,50 m ³ /ano	0,027 m ³ /dia
MATRIZES VAZIAS:	42 matrizes x 67 dias = 2.814 dias/matriz x 0,009 m ³ /dia de dejetos = 25,33 m ³ /ano	0,009 m ³ /dia
CRECHE:	42 matrizes x 20 leitões/porca/ano = 840 animais/ano x 35 dias na creche = 29.400 dias x 0,0014 m ³ /dia de dejetos = 41,16 m ³ /ano	0,0014 m ³ /dia
CRESCIMENTO/TERMINAÇÃO:	42 matrizes x 20 terminados/porca/ano = 840 animais/ano x 112 dias na fase = 94.080 dias x 0,007 m ³ /dia de dejetos = 658,56 m ³ /ano	0,007 m ³ /dia
MACHOS:	1 macho x 365 dias x 0,009 m ³ /dia de dejetos = 3,29 m ³ /ano	0,009 m ³ /dia
PRODUÇÃO TOTAL DE DEJETOS DA CRIAÇÃO:	956,50 m ³ /ano ou 2,62 m ³ /dia	2,62 m ³ /dia

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2002.

O volume do biodigestor deve ser obtido pela razão entre volume de

dejetos líquidos gerados em um dia e o tempo de retenção hidráulico do reator (TRH) que, conforme item 2.1.2, para efeito de estudos pode ser considerado de 35 dias.

2.3.1 Propriedades de fertilização

A aplicação de fertilizantes ao solo, independente da fonte ter origem mineral ou orgânica, tem por objetivo suprir a demanda de nutrientes das culturas agrícolas a fim de que estas expressem o seu potencial produtivo. As plantas exploram o solo através do seu sistema radicular em busca por água e nutrientes que podem ter origem no próprio solo ou ser proveniente do fertilizante aplicado. Desta maneira, solos mais férteis demandam a aplicação de menores doses de fertilizantes do que solos que apresentam teores mais baixos de nutrientes disponíveis, visto que aqueles são capazes de suprir maiores quantidades de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Co, Ni e Zn) às plantas (do Amaral, et al., 2019).

Segundo (Rocha, et al., Junho / 2021), com base em dados primários, também é possível quantificar os macronutrientes N, P₂O₅ e K₂O (nitrogênio, pentóxido de fósforo e óxido de potássio) que cada produtor possivelmente geraria como resultado da biodigestão, ou seja, é possível estimar a quantidade de fertilizante NPK presente no efluente, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Oferta de nitrogênio, fósforo e potássio calculada a partir dos dejetos por animal

SISTEMA DE PRODUÇÃO	N (KG/ANO)	P₂O₂ (KG/ANO)	K₂O (KG/ANO)
TERMINAÇÃO	8,00	4,30	4,00
UPL	25,70	18,00	19,40
CICLO COMPLETO	85,70	49,60	46,90
CRECHE	0,40	0,25	0,35
GRSC (UPL)	25,70	18,00	19,40

Fonte: (Rocha, et al., Junho / 2021)

Segundo dados da (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO

SOLO; COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 2004), pode-se observar a demanda por nutrientes de culturas comuns encontradas no sul do Brasil para um ciclo anual, conforme Tabela 8.

Tabela 8: Quantidade de NPK que cada cultura demanda

CULTURA	N (KG/HA)	P₂O₂ (KG/HA)	K₂O (KG/HA)
MILHO	30	45	30
SOJA	0	30	45
TRIGO	20	30	20
LEGUMINOSAS - INVERNO	20	50	50
LEGUMINOSAS - VERÃO	20	50	50

Fonte: (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO; COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 2004)

É possível mensurar a área de cultivo necessária para absorver tais nutrientes segundo (Rocha, et al., Junho / 2021).

2.4 GERAÇÃO ELÉTRICA COM O BIOGÁS

O mercado fornecedor dispõe atualmente de vasta rede de oferta de geradores e grupo geradores adequados para a utilização direta do biogás, desde que em uma concentração minimamente adequada de metano em relação ao gás carbônico. Para efeito de referência, o estudo irá considerar o modelo ENGGGB 30 KVA – 60 Hz, da Enermac (Enermac, 2021). Este equipamento tem capacidade de gerar até 20 Kw/h demandando 14 m³/h de biogás ou 9 m³/h de biometano.

As propriedades rurais dedicadas à suinocultura possuem uma demanda relevante por energia elétrica para o manejo dos animais, ração, limpeza e aquecimento. O presente trabalho está voltado ao suprimento total ou parcial de energia elétrica na propriedade produtora do biogás através do

modelo de autoconsumo, sendo assim o custo de transporte do gás e as possibilidades de comercialização da energia elétrica não se aplicam neste contexto.

2.5 REDUÇÕES CERTIFICADAS DE EMISSÃO - RCEs

Em função dos inúmeros problemas ambientais atribuídos ao desenvolvimento de atividades industriais e ao contínuo processo de urbanização, foi proposto e acordado pelo protocolo de Kyoto três mecanismos para auxiliar a redução na emissão de gases do efeito estufa (GEE). Um destes foi o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o qual permite que países desenvolvidos invistam ou financiem projetos sustentáveis em países em desenvolvimento a fim de cumprirem os compromissos assumidos pelo acordo. Tais investimentos podem ser realizados quantificando a redução da emissão de gases do efeito estufa nos projetos e revertendo esse quantitativo a uma unidade comum, as Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) comumente conhecidas como crédito de carbono.

Para que gerem RCEs, os projetos de MDL passam por um rigoroso sistema de verificação, aprovação, registro, monitoramento, verificação e certificação tanto a nível nacional como internacional, de acordo com as normas dispostas na regulamentação internacional aplicável e pela legislação interna brasileira (ROCHA, 2003).

O Conselho Executivo do MDL é o órgão da Organização das Nações Unidas (ONU) responsável pela supervisão do MDL. Este conselho, dentre outras, certifica as Entidades Operacionais Designadas (“Autoridade Nacional Designada – AND”), que por sua vez são responsáveis pelo registro dos projetos de MDL e emissão das RCEs.

No Brasil, a AND é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima. A Comissão é presidida pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, vice presidida pelo Ministério do Meio Ambiente e composta, ainda, por representantes dos Ministérios das Relações Exteriores; da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; dos Transportes; das Minas e Energias; do

Planejamento, Orçamento e Gestão; do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior; e da Casa Civil. A secretaria executiva da Comissão cabe ao Ministério da Ciência e Tecnologia (Bernstorff, 2009).

A utilização de biodigestores na suinocultura atende perfeitamente o que se prevê no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, sendo assim passível de mensuração e incorporação de créditos de carbono. Estudos feitos por Bernstorff (Bernstorff, 2009) mostrou que esses projetos são necessários para a suinocultura brasileira, já que contemplam os aspectos ambientais e econômicos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e são viáveis para as condições climáticas do Brasil. Além disso, produzem a sustentabilidade desejada e uma boa rentabilidade financeira para empresas (Monteiro, et al., 2015, v9, n1,).

2.6 MODELO DE ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para o melhor entendimento dos aspectos e resultados econômicos da implantação e utilização de sistemas de biodigestão em propriedades rurais faz-se necessário o estabelecimento de diversos parâmetros para a obtenção dos resultados. As infraestruturas já existentes nas propriedades são distintas, bem como a disponibilidade de equipamentos e até mesmo mão de obra. A localização geográfica também influencia diretamente na apuração de resultados, haja vista o custo logístico ser relevante no processo. É necessário ainda observar parâmetros externos à propriedade e sua operação natural, tais como variação cambial, custo de energia elétrica, combustíveis e fertilizantes.

Segundo dados da Embrapa Aves e Suínos, com base em levantamento realizado na Sub-Bacia Hidrográfica do Lajeado Frágoso (SBHLF), no município de Concórdia, estado de Santa Catarina, pode-se inferir dados para os sistemas produtivos divididos em: crechário (CR), granja de reprodutores suínos certificada (GRSC), ciclo completo (CC), unidade de crescimento ou terminação (UCT) e unidade produtora de leite

(UPL).

Os parâmetros apresentados na Tabela 9, detalham os volumes de dejetos líquidos produzidos por animal e categoria por dia, conforme obtido junto ao (Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina , 2022).

Tabela 9: Volume de dejetos líquidos produzidos por animal e categoria por dia

TERMINAÇÃO (M³/DIA)	UPL (M³/DIA)	CICLO COMPLETO (M³/DIA)	CRECHE (M³/DIA)	GRSC (UPL) (M³/DIA)
0,0045	0,0228	0,0471	0,0023	0,0228

Fonte: (Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina , 2022)

3 DESAFIOS

Com base no que se observa no item 2 são identificados alguns pontos que constituem desafios relevantes para o entendimento e desenvolvimento da temática proposta.

Sistemas de biodigestão são conhecidos e utilizados no mundo a centenas de anos, no entanto devido ao cenário geopolítico da energia, outras fontes se mostraram mais vantajosas ao longo do tempo, tal como o petróleo e seus derivados. Estes fatos desincentivaram o aprimoramento de técnicas e mecanismos, bem como o desenvolvimento e difusão do conhecimento acerca do biogás. A baixa necessidade de consumo de energia térmica no Brasil se somou aos fatores que reduziram a importância deste ativo frente aos meios acadêmico-científicos, governamentais e empreendedores. Nota-se a dificuldade na obtenção de dados coesos com base em demonstrações práticas no mercado.

A forte influência que os sistemas sofrem, seja pelo manejo dos substratos, variação na alimentação dos animais, clima ou inabilidade dos operadores, torna o processo de comparação pouco eficiente o que leva à maior necessidade de investimentos em projetos específicos para cada

propriedade.

4 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é determinar quais as condições necessárias para a viabilidade técnica e econômica do uso de biodigestores de lagoa coberta para os efluentes da suinocultura em pequenas e médias propriedades rurais do sul do Brasil, visando a geração de energia elétrica, produção de biogás e biofertilizante com foco na minimização de impactos ambientais.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para elucidar o embasamento necessário ao objetivo geral, foram definidos os objetivos específicos abaixo descritos:

- a. Especificar e dimensionar o reator de acordo com o porte da propriedade e sua respectiva capacidade de geração de substrato;
- b. Especificar os sistemas necessários para a geração de energia elétrica mediante a queima do biogás em grupo gerador compatível atendendo a modalidade de autoconsumo;
- c. Quantificar o ganho financeiro através da utilização do digestato como fonte de nutrientes para a lavoura;
- d. Determinar a estrutura de custos necessária para a implantação e operação do sistema até a fase de comissionamento;

5 METODOLOGIA

A metodologia empregada no desenvolvimento desta monografia envolve a pesquisa bibliográfica acadêmico-científica, tomada de dados e informações junto ao mercado fornecedor com significativa representatividade em território nacional, consulta às fontes do mercado

financeiro e de capitais e a utilização de modelo de análise de viabilidade econômica.

5.1 DIMENSIONAMENTO DO REATOR

Para o dimensionamento do biodigestor de lagoa coberta foram utilizados os parâmetros de produção de dejetos por animal de 0,01238 m³/animal/dia, atribuídos à produção do tipo ciclo completo (gestação, lactação, creche, engorda e terminação), conforme (Mito, et al., 2018), a Equação 1, referenciada no item 2.6 e o TRH médio de 35 dias, conforme item 2.3.

O volume de dejetos suínos pode ser calculado para cada propriedade, segundo (Kunz & Oliveira, 2006) e (Mito, et al., 2018), conforme abaixo.

Equação 1: volume total de dejetos ao dia

$$Q=N^{\circ} \times PD \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

Q é o volume total de dejetos ao dia (m³/dia);

N^o é o número de animais de cada proprietário (número inteiro);

PD é o volume de dejetos líquidos produzidos por animal e categoria ao dia (m³/dia).

As considerações realizadas por (Mito, et al., 2018) trazem o volume médio de dejetos ao dia por animal a razão de 0,01238 m³/ animal. A razão entre este volume e o TRH em 35 dias conclui o volume necessário para o biodigestor de lagoa coberta. Admite-se ainda um TRH de 1 dia para a lagoa de entrada e 10 dias para a lagoa secundária.

5.2 SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O sistema de geração foi especificado com base na disponibilidade no mercado nacional, baixo nível de complexidade operacional, adequação aos parâmetros de qualidade da energia requeridos, baixo custo de aquisição, volume de biogás requerido para operação e adequação ao uso do biogás como combustível, conforme item 2.4. O estudo irá considerar o

modelo ENGGB 30 KVA – 60 Hz, da Enermac (Enermac, 2021). Este equipamento tem capacidade de gerar até 20 Kw/h demandando 14 m³/h de biogás ou 9m³/h de biometano. O custo evitado de energia elétrica admitido para os cálculos foi de R\$ 0,46 por KW/h.

Para estimar a produção diária de biometano por biodigestão, (Kunz & Oliveira, 2006) e (Mito, et al., 2018) sugerem o cálculo descrito a seguir.

Equação 2: Produção diária de biometano

$$\text{PrM} = \text{B}^\circ \times \text{SV} \times \text{Q} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: PrM é a produção diária de biometano (m³/dia);

B^o é a capacidade máxima teórica de produção de metano pelos dejetos suínos (0,32 m³/dia);

SV é a concentração de sólidos voláteis (35,38 g/l);

Q é o volume total de dejetos ao dia (m³/kg).

A metodologia proposta na Equação 2, utiliza os parâmetros de sólido voláteis (SV) e produção máxima teórica de metano pelos dejetos suínos (B^o) utilizou-se o volume de 0,32 m³/dia (Mito, et al., 2018).

Afim de estimar a produção diária de biometano em função da quantidade de biogás admite-se a proporção de 60% de biometano no biogás, conforme propõe (Mito, et al., 2018).

Equação 3: Proporção de biometano

$$\text{PrB} = \text{PrM} \times \text{C}^\circ \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

PrB é a produção diária de biogás (m³/dia);

PrM é a produção diária de biometano (m³/dia);

C^o é o coeficiente de conversão (≈1,67).

5.3 GANHOS FINANCEIROS ATRAVÉS DO DIGESTATO

A quantificação dos nutrientes contidos no digestato foi obtida com base nos parâmetros observados através da Tabela 7. A valoração dos

referidos nutrientes observou ainda a Equação 4, os valores de referência para nutrientes obtidos junto à Globalfert (Globalfert, 2022) e a taxa de paridade cambial de R\$ 5,33 por Dólar americano observada junto ao Banco Central do Brasil em 05/02/2022. Utilizou-se ainda a premissa de que a propriedade produtora de biogás possui uma demanda igual ou superior à quantidade de nutrientes obtida através do digestato afim de simplificar o modelo eliminando a necessidade de venda, custo com transporte e tributação. Trata-se, portanto de redução do custo operacional da propriedade.

A estimativa anual de produção de nutrientes a partir do digestato pode ser calculada, segundo (Rocha, et al., Junho / 2021), conforme abaixo.

Equação 4: Cálculo da estimativa da produção anual de N, P ou K em kg/ano

$$Q_i = N^{\circ} \times I_i \times P_i \times E_i \quad (\text{Eq.4})$$

Onde:

Q_i é a produção anual de nitrogênio, fósforo ou potássio (kg/ano);

I_i é o índice de oferta de nitrogênio, fósforo ou potássio (kg/ano);

P_i é o índice de perdas ou remoção de nitrogênio quando o seu tratamento ocorre em biodigestores (55%, 0% e 0%, respectivamente);

E_i é a eficiência agronômica do nitrogênio, fósforo ou do potássio (80%, 100% e 100%, respectivamente).

I pode ser o nitrogênio, o fósforo ou o potássio.

A quantificação de nutrientes obtida na Equação 4 se aplica especificamente para o substrato advindo da atividade suinícola.

Quanto à fonte de nutrientes (NPK) utilizada pelos produtores rurais, considera-se a ureia, fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio (KCl), que segundo o instituto de Potassa & Fosfato (INSTITUTO DE POTASSA & FOSFATO, 1998) são encontrados conforme Tabela 10.

Tabela 10: Porcentagens de macronutrientes por matéria-prima

MATÉRIA PRIMA	N (%)	P₂O₂ (%)	K₂O (%)
----------------------	--------------	---------------------------------------	---------------------------

UREIA	44	0	0
MAP	9	45	0
KCI	0	0	60

Fonte: (INSTITUTO DE POTASSA & FOSFATO, 1998)

Para a obtenção de parâmetros comparativos de custo de matéria prima (Tabela 11) foram observados dados constantes no site da GlobalFert (Globalfert, 2022), consultados em 05/02/2022, os quais são apresentados em dólares americanos, cuja cotação na mesma data foi de R\$ 5,33, segundo dados do Banco Central.

Tabela 11: Custo de matéria prima

MATÉRIA PRIMA	CUSTO EM DÓLAR AMERICANO	CÂMBIO	CUSTO EM REAL
UREIA	\$ 646	R\$ 5,33	R\$ 3.443
MAP	\$ 744	R\$ 5,33	R\$ 3.965
KCI	\$ 526	R\$ 5,33	R\$ 2.803

Fonte: O autor

Os valores observados sofrem natural influência pela variação cambial e pelo cenário geopolítico da energia, sobretudo do petróleo.

5.4 ESTRUTURA DE CUSTOS PARA A IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DO SISTEMA

Os parâmetros definidos para mensurar a estrutura financeira de um projeto dessa natureza, e sob estas premissas, levaram em conta uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 10,0% a.a. baseada na taxa média de retorno de aplicações no tesouro direto; valor financiável de 100,0%, com juros de 8,5% a.a., de acordo com o programa “Agricultura de Baixa Emissão de Carbono” do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES); vida útil dos equipamentos de 10 anos baseado nos dados de (Montoro, et al., 2014); período de pagamento do financiamento em 10 anos; depreciação de 10,0% a.a.; custos com operação e manutenção de 4,0% a.a. do valor total do investimento baseado em (Prati, 2010); utilização dos

indicadores Valor Presente Líquido (VPL) e Payback para análise de viabilidade sob a taxa de 10% a.a..

Os custos admitidos para a lagoa de entrada, reator e lagoa secundária se basearam em (Prati, 2010) e foram devidamente atualizados pelo INPC, conforme dados do IBGE. Os custos do gerador e custos de instalação foram obtidos conforme dados do fabricante (Enermac, 2021). Desta maneira obteve-se os valores conforme Tabela 12.

Tabela 12: Custos para aquisição e implantação

	UNIDADE DE REFERÊNCIA	VALOR
LAGOA DE ENTRADA	R\$/m ³	R\$ 246
BIODIGESTOR	R\$/m ³	R\$ 491
LAGOA SECUNDÁRIA	R\$/m ³	R\$ 14,74
GERADOR	R\$/ equipamento	R\$ 30.000

Fonte: O autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A região sul do Brasil contém grande quantidade de propriedades rurais de até 50 Ha, o que leva à conclusão de que se trata de pequenos agricultores e empreendedores rurais que tendem a diversificar suas fontes de renda dentro do que a propriedade pode oferecer. Desta maneira, para efeito de estudo admitiu-se o cenário possível de 4 plantéis diferentes, com 600, 800, 1000 e 1200 cabeças de suínos. Tal premissa possibilitou ainda a comparação da viabilidade do negócio de maneira mais ampla observando o comportamento da tendência dos resultados.

De posse dos dados referentes à quantidade de animais em cada propriedade foi possível, com base nos estudos de (Mito, et al., 2018), na Equação 1: volume total de dejetos ao dia e no TRH de 35 dias proposto por (BEZERRA, 2011), calcular o volume que o biodigestor deverá possuir para que consiga processar todo o dejetos obtido dentro do prazo de 35 dias,

culminando em um digestato inerte e no melhor volume de biogás possível, conforme Tabela 13.

Tabela 13: Volume do biodigestor por propriedade

Nº DE ANIMAIS	PD	TRH	VOLUME DO REATOR EM M³
600	7,43	35	260
800	9,91	35	346
1000	12,38	35	433
1200	14,86	35	520

Fonte: O autor

Nota-se o comportamento linear do aumento do volume diretamente proporcional ao aumento do plantel, haja visto que o processo de manejo dos animais, higienização das granjas e manejo dos dejetos não sofre alteração no cenário proposto. Para quantidades de animais significativamente maiores é possível que a aplicação de tecnologias de automação na distribuição de ração e nos processos de limpeza alterem a relação hora observada.

Uma vez que o volume do biodigestor e sua tecnologia são conhecidos é possível realizar o processo de estimar o volume de biogás que será obtido. Para tanto do volume de biogás produzido em cada cenário (Tabela 14) utilizou-se o volume de dejetos demonstrados na Tabela 13 e a Equação 2: Produção diária de biometano.

Tabela 14: Volume de biogás produzido

Nº DE ANIMAIS	PD	M³ DE BIOGÁS/DIA
600	7,43	84
800	9,91	112
1000	12,38	140
1200	14,86	168

Fonte: O autor

As premissas utilizadas para estimar a capacidade máxima teórica de produção de metano pelos dejetos suínos e a concentração de sólidos voláteis contido nesses dejetos tomam como verdade que a alimentação do

plantel será realizada à base de milho, no entanto observou-se que existe variação nos compostos utilizados na alimentação destes animais que podem sofrer influência direta da disponibilidade ou do custo de cada componente. Tal fato chama a atenção para a necessidade de adequação dos cálculos para a realidade encontrada em cada propriedade onde um possível projeto for implantado.

No que se refere a geração de energia elétrica, as premissas de baixo nível de complexidade operacional, disponibilidade no mercado nacional adequação aos parâmetros de qualidade da energia, baixo custo de aquisição e adequação ao uso do biogás foram plenamente atendidas com base em (Colzani, 2022) com a escolha do gerador Enermac - ENGGB 30 KVA – 60 Hz com capacidade de geração de até 20 Kw/h e consumo de biogás de até 14 m³/h. Buscou-se um sistema de geração de energia elétrica que pudesse consumir na sua totalidade o volume de biogás obtido para cada cenário e, conforme demonstrado na Tabela 15, o modelo escolhido atende aos 4 cenários.

Sendo conhecido o volume de biogás obtido no reator e nas especificações técnicas do sistema de geração de energia elétrica, calculou-se a quantidade de energia elétrica gerada para cada cenário, conforme Tabela 15.

Tabela 15: Quantidade de energia elétrica gerada

Nº DE ANIMAIS	M³ DE BIOGÁS/DIA	KW/H	M³/H	HORAS DE PRODUÇÃO	KW/DIA
600	84	20	14	6	120
800	112	20	14	8	160
1000	140	20	14	10	200
1200	168	20	14	12	240

Fonte: O autor

Para a geração de energia elétrica a partir do biogás admitiu-se que tal efluente possui uma proporção de 60% de metano em sua composição. Sabendo que o biodigestor tem seu funcionamento atrelado a

microrganismos vivos e que podem sofrer influência do meio, observa-se a possibilidade de haver alterações no desempenho do gerador, seja para maior ou menor produção de energia elétrica. Este mesmo parâmetro pode alterar a vida útil dos equipamentos envolvidos na geração de energia elétrica. Ainda sob as premissas estabelecidas, observa-se que o mesmo gerador é capaz de atender aos 4 cenários, fato que leva à conclusão de que seu custo é menos relevante no projeto à medida em que o plantel é majorado.

O Brasil possui uma das maiores áreas agricultáveis do mundo, abrigando as mais diversas culturas e variedades vegetais. Tal vocação e dimensão faz do país também um dos maiores consumidores mundiais de fertilizantes agrícolas. A utilização dos nutrientes contidos no digestato se mostra não apenas útil, como também necessária para a economia nacional. Para a melhor mensuração dos resultados financeiros e atendendo ao que se preconizou na metodologia, foi calculado o volume de nutrientes NPK provenientes do digestato e efetuou-se sua equivalência financeira em moeda nacional corrente. Foram utilizados os dados de cotação de compostos fertilizantes semelhantes junto à Globalfert (Globalfert, 2022), considerando a cotação do Dólar americano a R\$ 5,33, conforme dados obtidos junto ao Banco Central em 05/02/2022 (Tabela 18). Os dados de conversão da Tabela 7 foram utilizados para quantificar o volume de nutrientes no digestato, conforme Tabela 16.

Tabela 16: Quantidade teórica de nutrientes contidas no digestato

Nº DE ANIMAIS	PD	NUTRIENTES - N KG/ANO	NUTRIENTES - P₂O₂ KG/ANO	NUTRIENTES - K₂ KG/ANO
600	7,43	4800	2580	2400
800	9,91	6400	3440	3200
1000	12,38	8000	4300	4000
1200	14,86	9600	5160	4800

Fonte: O autor

O índice de perdas ou remoção de nitrogênio no tratamento do efluente em biodigestores utilizado foi de 55% (Tabela 17) e a eficiência

agronômica do nitrogênio, fósforo e potássio utilizada foi, respectivamente 80%, 100% e 100%, conforme (Rocha, et al., Junho / 2021).

Tabela 17: Perdas ou remoção de nutrientes e eficiência

N° DE ANIMAIS	PERDA DE N KG/ANO	PERDA DE P₂O² KG/ANO	PERDA DE K₂ KG/ANO	EFICIÊNCIA DE N KG/ANO	EFICIÊNCIA DE P₂O² KG/ANO	EFICIÊNCIA DE K₂ KG/ANO
600	-2399	0	0	1920	2580	2400
800	-3199	0	0	2560	3440	3200
1000	-3999	0	0	3200	4300	4000
1200	-4799	0	0	3840	5160	4800

Fonte: O autor

Para que fosse possível a comparação entre os nutrientes obtidos do digestato e os nutrientes obtidos dos compostos cotados, aplicou-se o critério de eficiência informado pelo importador ao volume calculado e a unidade de medida foi convertida em Kg de nutriente. Desta maneira foi possível a obtenção do custo dos nutrientes conforme Tabela 18.

Tabela 18: Preço de nutrientes correlatos

N° DE ANIMAIS	CUSTO REAL DA UREIA/KG	CUSTO REAL DO MAP/KG	CUSTO REAL DO KCL/KG
600	R\$ 7,83	R\$ 8,81	R\$ 4,67

Fonte: O autor

De posse dos dados referentes ao custo dos nutrientes disponíveis para a importação e do volume de nutrientes equivalentes disponíveis no digestato produzido, foi possível estimar a redução de custos com fertilizantes obtida para cada propriedade em seus respectivos senários.

Tabela 19: Redução de custos com nutrientes

N° DE ANIMAIS	REDUÇÃO DE CUSTO COM N R\$/ANO	REDUÇÃO DE CUSTO COM P₂O₂ R\$/ANO	REDUÇÃO DE CUSTO COM K₂ R\$/ANO	REDUÇÃO DE CUSTO COM NUTRIENTES R\$/MÊS
600	R\$ 15.031	R\$ 22.735	R\$ 11.214	R\$ 4.081
800	R\$ 20.039	R\$ 30.314	R\$ 14.952	R\$ 5.442
1000	R\$ 25.047	R\$ 37.892	R\$ 18.690	R\$ 6.802
1200	R\$ 30.055	R\$ 45.471	R\$ 22.428	R\$ 8.162

Fonte: O autor

Os dados de redução de custo, ou custo evitado, foram apresentados em anos, para efeito de cálculo da viabilidade econômica do projeto, e na última coluna apresentados de maneira consolidada em meses, afim de facilitar a leitura e entendimento da relevância que representam.

Por fim, para a determinação da estrutura de custos necessária para a implantação de um projeto sob as condições aqui descritas e admitidas, foram utilizadas as premissas estabelecidas no item 5.4.

O custo mensal evitado com energia elétrica e com fertilizantes para cada cenário são demonstrados na Tabela 20.

Tabela 20: Custo mensal evitado com energia elétrica e nutrientes

N° DE ANIMAIS	CUSTO MENSAL EVITADO COM EE	CUSTO MENSAL EVITADO COM NPK
600	R\$ 1.658,37	R\$ 4.081,75
800	R\$ 2.211,15	R\$ 5.442,16
1000	R\$ 2.763,94	R\$ 6.802,57
1200	R\$ 3.316,73	R\$ 8.162,98

Fonte: O autor

Nota-se que o resultado financeiro do custo evitado com nutrientes NPK se mostraram superiores aos resultados dos custos evitados de energia elétrica. É importante registrar que ambos não são concorrentes entre si, pois advém de processos distintos e contíguos da biodigestão. É relevante ainda registrar que a cotação internacional dos fertilizantes se encontra em franca ascensão ao longo dos últimos anos. A cotação do Real brasileiro frente ao Dólar americano também se mostra alta. Tal realidade pode ser alterada com o passar do tempo, bem como o custo da energia elétrica,

sendo assim, os resultados obtidos são válidos apenas sob as premissas aqui adotadas.

O investimento necessário para a implantação de projetos desta natureza se mostrou variável de maneira diretamente proporcional ao volume do biodigestor, no entanto o custo com aquisição e implantação do sistema de geração de energia elétrica se mostrou o mesmo para todos os senários, haja visto que o equipamento utilizado para os cálculos apresentou capacidade ociosa nos 4 senários.

Tabela 21: Investimento

N° DE ANIMAIS	BIODIGESTOR	GERAÇÃO
600	R\$ 130.651	R\$ 30.000
800	R\$ 174.202	R\$ 30.000
1000	R\$ 217.753	R\$ 30.000
1200	R\$ 261.303	R\$ 30.000

Fonte: O autor

Observou-se que o custo dos reatores para a biodigestão são os mais relevantes para o projeto. Sabendo-se que o volume do reator depende da relação entre o volume de dejetos e o TRH, é possível inferir que o investimento em tecnologia para a redução do TRH é válido, desde que seja inferior ao custo equivalente do reator por m³.

Diversos foram os parâmetros obtidos para compor os cálculos de viabilidade econômica do projeto. Destaca-se que, além dos dados técnicos inerentes ao plantel, ao biodigestor e ao gerador de energia elétrica, é de fundamental importância observar os dados e premissas financeiras descritos no item 5.4, pois tais parâmetros são utilizados para comparar o investimento em biodigestão com outros investimentos disponíveis no mercado, sendo assim, qualquer alteração no mercado pode tornar um projeto de biodigestão mais ou menos atrativo.

Tabela 22: Análise de viabilidade econômica

PARÂMETRO	600 ANIMAIS	800 ANIMAIS	1000 ANIMAIS	1200 ANIMAIS
TAXA DE DESCONTO (I)	10%	10%	10%	10%
VPL	R\$72.661,92	R\$118.692,35	R\$164.722,79	R\$210.753,22
TIR	19,73%	22,30%	23,92%	25,05%
PAYBACK (DESCONTADO)	5,78 anos	5,17 anos	4,84 anos	4,64 anos

Fonte: O autor

O tempo de retorno do investimento calculado para os quatro cenários se mostra razoável, ficando abaixo dos 6 anos em todos os cenários. É válido ressaltar que seria desejável um payback próximo aos 3 anos, frente a outras possibilidades de investimento. O VPL retornou positivo para todos os cenários, demonstrando em conjunto com a TIR, a viabilidade econômica.

É importante ressaltar que os resultados obtidos são válidos apenas para as condições encontradas no cenário proposto neste trabalho. São inúmeros os fatores que podem alterar completamente os resultados encontrados, dentre os quais destaca-se alguns:

- O preço da energia elétrica e sua disponibilidade é um dos mais relevantes fatores de atratividade deste tipo de projeto, haja vista ser um insumo de alto custo. No entanto é sabido que o Brasil ainda sofre influências diretas e imprevisíveis em mercados, tais como o de energia, sendo assim, um projeto de biodigestão pode se tornar rapidamente inviável, a exemplo do impacto que o Proálcool teve neste mesmo mercado à sua época;
- A cotação do dólar americano frente à moeda corrente nacional é determinante pois influencia diretamente no retorno obtido quanto ao custo evitado com a aquisição de nutrientes importados;
- A cotação do barril de petróleo e do gás natural também atuam diretamente na atratividade do projeto, visto que são

concorrentes diretos enquanto fonte de energia e no caso do gás também enquanto fonte de fertilizantes. Nota-se que no momento em que este estudo é realizado existem diversos conflitos a nível mundial que tem pressionado os preços do gás natural, petróleo e respectivos derivados, o que certamente influenciou nos resultados obtidos;

- A demanda mundial por proteína animal é o grande motor que incentiva a atividade suinícola no Brasil. É válido frisar que tal demanda pode sofrer influência de diversas naturezas, tais como dificuldades e barreiras logísticas no escoamento da produção, embargos econômicos no comércio internacional e embargos sanitários, tal como se observou no período da gripe suína;
- O mercado de créditos de carbono ainda é distante da realidade dos pequenos produtores e empreendedores, mas este ativo tem ganhado relevância e certamente pode exercer influência positiva neste tipo de projeto, à medida que se torne mais fácil e prática a certificação dos projetos e a comercialização dos certificados.

7 CONCLUSÃO

A utilização do biogás em propriedades rurais certamente mostra-se uma boa opção à disposição de empreendedores que tenham interesse em minimizar os custos das propriedades sob diversas frentes. A energia elétrica se apresenta como um insumo caro e extremamente relevante para o manejo de animais e demais atividades no meio rural. A demanda por maquinários pesados e nem sempre eficientes, a necessidade de aquecimento para criações, bombeamento de água e fertilizantes são apenas alguns exemplos que comprovam a relevância do insumo. A agricultura de baixo carbono é outro aspecto que vem tomando crescente importância na tomada de decisão tanto por parte do meio rural, quanto pela indústria e pelos agentes financeiros.

A utilização de biodigestores de lagoa coberta para tratamento e manejo dos dejetos da atividade suinícola se mostra eficiente e rentável, atuando na produção de biogás (insumo para a geração de energia elétrica), no tratamento de efluentes poluidores adequando as propriedades às rigorosas normas ambientais e na disponibilização de nutrientes importantes para as lavouras, atuando sob a ótica da logística reversa no ciclo natural da atividade rural.

À partir do que foi estudado e demonstrado, é possível compreender os fatores e condições necessários para obtenção da viabilidade técnica e econômica de um projeto de biodigestão em área rural à partir do tratamento dos dejetos da atividade suinícola.

Nos 4 cenários apresentados a taxa interna de retorno se mostrou positiva e o payback compatível com o porte dos empreendimentos, o que leva à conclusão inequívoca pela viabilidade da biodigestão em propriedades suinícolas com geração de energia elétrica de qualidade para o autoconsumo e redução da dependência internacional dos insumos.

7.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Alguns temas certamente podem complementar este breve estudo, tais como:

1. Um estudo comparativo entre os principais substratos energéticos em relação à produtividade de diferentes tecnologias de biodigestão;
2. Estudo sobre a influência operacional e financeira na utilização de aquecimento em biodigestores de lagoa coberta em favor da redução do TRH trabalhando no ponto ideal de maior produtividade dos microrganismos;
3. Estudo da aplicação e viabilidade econômica da utilização de microalgas no processo de purificação do biogás viabilizando a obtenção de biometano;
4. Estudo comparativo da utilização da cana de açúcar em

biodigestores em comparação com a produção de álcool, levando em consideração os custos dos ativos a serem implantados;

5. Estudo macroeconômico da viabilidade de políticas efetivas de subsídio e/ou não tributação para energia do biogás frente à promoção da estabilidade das redes rurais de energia elétrica, redução da importação de insumos agrícolas favorecendo a balança comercial e melhor manejo de dejetos potencialmente poluentes.

8 BIBLIOGRAFIA

ABATZOGLOU, N., & BOIVIN, S. (2009). **Biofuels, Bioproducts and Biorefining. A review of biogas purification processes.**, v. 3, N.1, p. 42-71.

ANEEL – Agência Nacional de energia Elétrica. (2015). **Resolução Normativa nº 687/2015.** *Diário Oficial da União*, seção 1, p. 45, v. 152, n. 230 .

Bernstorff, C. (2009). **Créditos de carbono e mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL: captura de metano no tratamento de dejetos suínos.** *Mestrado Profissionalizante em Engenharia Ambiental*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

BEZERRA, P. (2011). **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural.** Em *Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural*. (p. 108). São Paulo: Ícone.

Campos, R. J. (1999). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** Em R. J. Campos, *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. (p. 464). Rio de Janeiro: ABES.

CANTREL, K. B., DUCEY, T., RO, K. S., & HUNT, P. G. (2008). **Livestock waste-to-bioenergy** . *Bioresource Technology*, v. 99, p. 7941-7953.

Cavaleiro, A. J., & Alves, M. (2020). Digestão anaeróbia. *Revista de Ciência Elementar*, 1-6.

Chernicharo, C. A. (1997). **Princípios de tratamento biológico de águas residuárias volume 5: Reatores anaeróbios**. Em C. A. Chernicharo, *Princípios de tratamento biológico de águas residuárias volume 5: Reatores anaeróbios* (p. 246). Belo Horizonte: UFMG.

Chernicharo, C. A. (2007). **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG.

Colzani, T. A. (2022). **DEFINIÇÃO DE UM MODELO TÉCNICO PARA COMERCIALIZAÇÃO DE BIOMETANO E ENERGIA ELÉTRICA EM PEQUENAS E MÉDIAS PROPRIEDADES RURAIS** . Curitiba: UFPR.

Dartora, V., Perdomo, C. C., & Tumelero, I. L. (março de 1998). **Boletim Informativo de Pesquisa e extensão. MANEJO DE DEJETOS DE SUÍNOS**. Concórdia, SC, Brasil: EMBRAPA.

Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

do Amaral, A. C., Steinmetz, R. L., & Kunz, A. (2019). **FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA, PURIFICAÇÕES DO BIOGÁS, USO E TRATAMENTO DO DIGESTATO**. Concórdia, SC: Embrapa.

Enermac. (08 de 11 de 2021). **Enermac**. Fonte: Enermac: www.enermac.com.br

Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul. (2014). ***Técnicos para o Licenciamento Ambiental de Novos Empreendimentos Destinados à Suinocultura. Rio Grande do Sul: FEPAM.***

Globalfert. (05 de 02 de 2022). *Globalfert*. Fonte: Globalfert: <https://globalfert.com.br/>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (23 de 04 de 2021). ***Censo Agropecuário, Florestal e Agrícola 2017.*** Fonte: <http://censos.ibge.gov.br/agro/2017>: <http://censos.ibge.gov.br/agro/2017>

INSTITUTO DE POTASSA & FOSFATO. (1998). *Manual internacional de fertilidade do solo*. Piracicaba: POTAFOS.

Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina . (09 de 02 de 2022). ***<https://in.ima.sc.gov.br/>***. Fonte: <https://in.ima.sc.gov.br/>: <https://in.ima.sc.gov.br/instrucaoNormativa/downloadPDF/11>

JÚNIOR, L. J., & SOUZA, C. F. (2009). ***Construção e operação de biodigestores***. Viçosa - MG: CPT.

Khanal, S. K. (2009). ***Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications***. Cyngapura: Wiley-Blackwel.

Kunz, A., & Oliveira, P. A. (2006). ***Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás***. *Revista de Política Agrícola*, 28-35.

Mito, J. Y., Kerkhoff, S., Silva, J. L., Vendrame, M. G., & Kunz, A. (2018). ***Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil***. Concórdia - SC: EMBRAPA.

Mito, J. Y., Kerkhoff, S., Silva, J. L., Vendrame, M. G., Steinmetz, R. L., & Kunz, A. (2018). ***Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil***. Concórdia, SC: EMBRAPA.

Monteiro, M. K., Vieira, A. S., Aragão, J. M., & Soares, J. d. (2015, v9, n1,). **PROPOSTA DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA MENSURAÇÃO DOS CRÉDITOS DE CARBONO DA SUINOCULTURA BRASILEIR.** *RGSA - Revista de Gestão Social e Ambiental*, 82 - 96.

Montoro, S. B., Lucas Jr., J. d., & Santos, D. F. (2014). **Sustentabilidade Energética e Ambiental: Viabilidade Econômica da Implantação de Biodigestores Anaeróbios para Tratamento de Dejetos Bovinos.** *XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.*

Murphy, J., Wellinger, A., & Baxter, D. (2013). ***The Biogas Handbook.*** Woodhead Publishing.

NEEL – Agência Nacional de energia Elétrica. (2012). **Resolução Normativa nº 482/2012.** *Diário Oficial da União*, 19.04.2012, seção 1, p. 53, v. 149, n. 76 .

Nordeste rural – negócios do campo. (17 de outubro de 2021). Fonte: **Nordeste rural – negócios do campo:** <http://nordesterural.com.br/uso-do-biodigestor-para-aproveitamento-dos-residuos-na-proprieda>

Oliveira, P. A. (1993). **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos.** Concórdia, SC, Brasil: EMBRAPA/CNPSA.

Oliveira, P. A. (2002). **Produção e manejo de dejetos.** *CURSO DE CAPACITAÇÃO EM PRÁTICAS AMBIENTAIS SUSTENTÁVEIS.* Concórdia, SC, Brasil: EMBRAPA.

Prati, L. (2010). ***Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Gerado por Biodigestores.*** Curitiba: UFPR.

Quinquiolo, P. F., Giza, F. J., Kolling, E. M., & Filippini, G. (2015). *Análise de Custos de Implantação de um Motogerador Movido a Biogás – Estudo de Caso. XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.*

Rocha, J. D., Fonseca, M. F., Miele, M., Miranda, C. R., Monticelli, C. J., Bernardo, E. L., . . . Pedrão, R. S. (Junho / 2021). **Inteligência territorial aplicada ao manejo. *Inteligência territorial aplicada ao manejo.***

ROCHA, M. T. (2003). **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo . Tese (Doutorado)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.** Piracicaba, SP, Brasil: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

Saleh, M. M., & Mahmood, U. F. (2004). **ANAEROBIC DIGESTION TECHNOLOGY FOR INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT. *Eighth International Water Technology Conference, IWTC8,*** (pp. 817 - 833). Alexandria, Egypt.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO; COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. (2004). **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** Porto Alegre: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO; COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO.

WELLINGER, A., MURPHY, J., & BAXTER, D. (2013). **The biogas handbook: science,** Cambridge: Woodhead Publishing.