

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE**

JÚLIA CAROLINA BEVERVANSO BORBA FERRARESE

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO ABATE DE BOVINOS**

**São Paulo
2021**

JÚLIA CAROLINA BEVERVANSO BORBA FERRARESE

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO ABATE DE BOVINOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Orientador:
Prof. Dr. Ildo Luis Sauer
Coorientadoras: Dra. Camila Agner D'Aquino
Dra. Samantha Christine Santos

Versão Corrigida

(Versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca
Digital de Teses e Dissertações da USP)

São Paulo

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Ferrarese, Júlia Carolina Bevervansa Borba

Potencial de geração de energia a partir da digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos oriundos do abate de bovinos. / Júlia Carolina Bevervansa Borba Ferrarese; orientador: Ildo Luís Sauer. —São Paulo, 2021.
100 f.: il. 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ferrarese, Júlia Carolina Bevervanso Borba

Título: Potencial de Geração de Energia a partir da digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos oriundos do abate de bovinos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Ildo Luis Sauer

Aprovado em: 16/11/2021

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Ildo Luis Sauer

Instituição: IEE/USP

Presidente da banca

Prof. Dr.: Theo Syrto Octavio de Souza

Instituição: PHA – EP/USP

Julgamento: Aprovada

Assinatura:

Dra.: Vanessa Pecora Garcilasso

Instituição: IEE/USP

Julgamento: Aprovada

Assinatura:

Profa. Dra.: Paula Rúbia Ferreira Rosa

Instituição: UFSCar

Julgamento: Aprovada

Assinatura:

Dedico este trabalho à minha filha Beatriz
e ao meu marido Daniel que me acompanham
nesta jornada

AGRADECIMENTOS

Por trás deste trabalho está o apoio de muita gente e sem o qual nada disto teria sido possível.

Primeiramente, agradeço à minha família. À minha mãe Josemary Ferrarese com quem eu posso contar em todos os momentos e ao meu pai Aldo Ferrarese Filho (in memoriam) que sempre foi exemplo de profissional e pessoa. Às minhas irmãs Sany Rose, Tamara, Heliane e Amanda que sempre buscaram ajudar no que fosse necessário.

Ao meu marido e minha filha que acompanharam de perto todo o processo de criação desse trabalho e me apoiaram nessa conquista.

Ao Professor Dr. Ildo Luis Sauer, pela competência, atenção, paciência, disponibilidade em ajudar, sempre proporcionando novas descobertas e conhecimentos e que, além de compartilhar seus conhecimentos comigo foi um dos meus maiores incentivadores e a quem agradeço imensamente

Às coorientadoras Samantha Santos e Camila D'Aquino que me forneceram uma base sólida de conhecimento na área de biogás e sempre estiveram disponíveis para as dúvidas.

A todos da equipe CPLEN, Nilton, Alcantaro, Márcio, Welson, Carlos, Paulo, Alexandre, Bruno, Alice, Túlio, Erick e Julieta por estarem sempre disponíveis e auxiliando quando precisei.

Aos meus amigos do IEE, Renata, Luciano, Adriana, Juliana, Vilma, Mirtes, Jisa, Sassa e Leandro pelas conversas e pelos 'bolinhos' que tornaram os dias mais divertidos.

Ao abatedouro AFRISUL, representado pelo gerente da planta, Sr. Zé Carlos Oliveira Silva que sempre foi muito atencioso na preparação e envio do material para os ensaios e ao assistente administrativo, Sr. Erick Santos que disponibilizou os dados de consumo de energia e combustível.

Ao Programa de Pós-graduação em Energia do IEE e todos os professores que, ao longo desta caminhada, contribuíram com orientações e ideias essenciais para que eu conseguisse trilhar este caminho com motivação e sucesso, permitindo meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço à Universidade de São Paulo, em especial ao Instituto de Energia e Ambiente, por me proporcionar um ambiente criativo e amigável para os estudos.

Agradeço o apoio financeiro recebido do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP) e da Enel Distribuição São Paulo, em parceria com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através da Chamada 001/2016 - Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: "Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior", Projeto número 00390-1086/2018.

Enfim, meu muito obrigada a todos que não foram aqui citados, mas que de alguma forma, ofereceram palavras de carinho, apoio, incentivo. Vocês me incentivaram e apoiaram em um momento muito importante de minha vida.

“Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”

Laurent Lavoisier

RESUMO

As fontes de energia são recursos fundamentais para o crescimento econômico e social de um país, e há forte relação entre o desenvolvimento das sociedades e o aumento de seu consumo. Com a crescente demanda por energia, associada à necessidade de redução de gases de efeito estufa, cada vez mais se buscam novas alternativas de inclusão de energia renovável na matriz energética. O setor agropecuário brasileiro se apresenta como vetor crucial do crescimento econômico brasileiro e a produção de carne bovina para a exportação representa 3% do total das exportações, representando 6% do PIB do país e 30% do PIB do Agronegócio. Os resíduos de abatedouros são compostos de altos níveis de matéria orgânica, principalmente proteínas e lipídios e precisam de tratamento adequado para não haver contaminação do solo e águas subterrâneas. O tratamento adequado de efluentes, dejetos dos animais e resíduos orgânicos podem contribuir para a redução da emissão de metano na atmosfera, que é até 28 vezes mais nocivo que o CO₂, além de possibilitar aumento na renda através da geração de energia. O biogás gerado em biodigestores a partir de dejetos animais e outros resíduos orgânicos agropecuários têm características combustíveis que favorecem sua aplicação para geração de energia elétrica, térmica e/ou automotiva. É neste contexto que se insere esta pesquisa, cujo objetivo principal foi demonstrar em escala laboratorial o potencial do uso dos subprodutos oriundos do processo de abate de bovinos na geração de energia a partir do biogás e reportar a possibilidade de uso energético *in situ* desta fonte de energia renovável. A partir dos resultados obtidos nos testes de Potencial Bioquímico de metano, para o estudo de caso do abatedouro, foi verificado um abatimento no consumo de energia elétrica de 20% para os resíduos sólidos de abatedouro e 29,4% para a mistura dos resíduos sólidos do abatedouro com dejetos de bovinos, enquanto para a geração de energia térmica através da cogeração a economia verificada foi da ordem de 11% para os resíduos sólidos de abatedouro e 16% para a mistura de resíduos sólidos de abatedouro com dejetos de bovinos. No cálculo de *Payback* com abate de 250 animais por dia, demonstrou o retorno do investimento inicial no período de 2 anos e 9 meses.

Palavras chaves: biogás, digestão anaeróbia, resíduos sólidos, abatedouros, energia, elétrica, térmica.

ABSTRACT

Energy sources are fundamental resources for a country's economic and social growth. There is a strong relationship between the development of societies and the increase in energy consumption. With the growing demand for energy associated with the reduced greenhouse gases requirement, new alternatives to include renewable energy in the energy matrix are increasingly being sought. The Brazilian agricultural sector presents itself as a crucial vector of Brazilian economic growth and the beef production for export represents 3% of total exports, representing 6% of the country's GDP and 30% of the GDP of Agribusiness. Slaughterhouse residues are composed of high levels of organic matter, mainly proteins, and lipids, and must be treated adequately to not contaminate the soil and groundwater. Proper treatment of effluents, animal waste, and organic residues contributes to reducing the emission of methane into the atmosphere (a gas that contributes to the greenhouse effect), in addition to increasing income through energy generation. Biogas generated in biodigesters from animal waste and other organic agricultural waste has combustible characteristics that favor its application for the generation of electrical, thermal, and automotive energy. In this context, this research is inserted, whose main objective was to demonstrate on a laboratory scale the potential of the use of by-products from the cattle slaughter process in energy generation from biogas and to report the possibility of in situ energy use of this energy source renewable. The results obtained in the Biochemical Potential of Methane tests, for the slaughterhouse case study, it was verified a reduction in the consumption of energy supplied by the utility of 20% for the slaughterhouse solid waste and 29.4% for the waste mixture slaughterhouse solids with cattle manure, while for the generation of thermal energy through cogeneration, the savings were around 11% for slaughterhouse solid waste and 16% for the mixture of slaughterhouse solid waste with cattle manure. The calculation of Payback with the slaughter of 250 animals per day, demonstrated the return on the initial investment in 2 year and 9 months.

Keywords: biogas, anaerobic digestion, solid waste, slaughterhouses, energy, electrical, thermal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de Energia no Brasil e no Mundo	13
Figura 2: Repartição da oferta interna de energia.....	14
Figura 3: Repartição de Outras Renováveis	15
Figura 4: Porcentagem de emissões de gases do efeito estufa por setor produtivo no Brasil em 2019.....	16
Figura 5: Série histórica do Abate de Bovinos no Brasil	19
Figura 6: Fluxograma do processo de abate de bovinos.....	22
Figura 7: Fluxograma da digestão anaeróbia.....	29
Figura 8: Cadeia de produção de biogás e seus usos.....	32
Figura 9: (a) Sistema de determinação do potencial metanogênico via AMTPS, (b) Biogas Batch System e (c) Eudiômetro.....	33
Figura 10: Fluxograma das etapas envolvidas no desenvolvimento deste trabalho	37
Figura 11: Aparência do inóculo e amostras	38
Figura 12: Massa dos resíduos bovinos registrado no abatedouro	40
Figura 13: Aparência da amostra matriz (SBP).....	42
Figura 14: Esquema do sistema analisador de potencial de biogás	49
Figura 15: Componentes do analisador de biogás, medidor de vazão e aparência do software	50
Figura 16: Esquema para a realização do teste de estanqueidade do sistema de fermentação em batelada.....	51
Figura 17: Fluxograma do ensaio e usos do biogás gerado a partir de resíduos de abatedouro	51
Figura 18: Produção acumulada no ensaio de BMP.....	53
Figura 19: Produção acumulada do Branco ao longo do tempo.....	54
Figura 20: Produção acumulada do Controle ao longo do tempo	55
Figura 21: Produção acumulada da amostra SBP ao longo do tempo.....	56
Figura 22: Produção acumulada da amostra ABP ao longo do tempo.	56
Figura 23: Entrada da empresa AFRISUL	61
Figura 24: Mapa da localização do frigorífico AFRISUL.....	61
Figura 25: Perdas de energia dos combustíveis nos motores de combustão interna	67
Figura 26: Detalhe das lagoas facultativas do abatedouro e frigorífico AFRISUL.....	70
Figura 27: Sistema de lagoas cobertas para a produção de biogás	71
Figura 28: Curva de produção de biogás para as amostras com e sem sangue	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Produtos e subprodutos do abate de um bovino de 400kg _____	23
Tabela 2: Distribuição do consumo de energia elétrica em abatedouros de acordo com a operação _____	24
Tabela 3: quantidade média dos principais resíduos gerados em abatedouros de bovinos __	27
Tabela 4: Produção de metano a partir da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos e subprodutos de abatedouros de bovino e suíno _____	31
Tabela 5: Artigos referente à padronização de metodologias para realização de teste BMP em bancada _____	34
Tabela 6: Proporção dos resíduos (em Kg e % em relação a massa do animal), de acordo com o animal e o tipo de material _____	38
Tabela 7: Animais abatidos em 2020 e a proporção por tipo de animal _____	41
Tabela 8: Proporção de cada resíduo utilizado no ensaio de BMP _____	42
Tabela 9: Método de ensaio para caracterização das amostras _____	44
Tabela 10: Características físico-químicas dos substratos e inóculo _____	44
Tabela 11: Metodologias pesquisadas _____	45
Tabela 12: Parâmetros da fórmula _____	47
Tabela 13: Montagem dos reatores cada reator _____	52
Tabela 14: Produtividade acumulada de biogás registrada pelo software Rigamo _____	57
Tabela 15: Produção média de biogás por amostra _____	57
Tabela 16: Composição do biogás _____	58
Tabela 17: Volume médio de gás metano e dióxido de carbono por amostra _____	59
Tabela 18: Produtividade de gás metano por grama de sólidos voláteis comparado ao potencial teórico _____	59
Tabela 19: Consumo de Energia no abatedouro AFRISUL no ano de 2020 _____	62
Tabela 20: PCI de diferentes gases combustíveis _____	63
Tabela 21: Cálculos do abatimento no consumo de energia elétrica do abatedouro _____	65
Tabela 22: Cálculos do abatimento no consumo de energia térmica do abatedouro _____	68
Tabela 23: Dimensionamento do biodigestor e cálculo do tempo de retorno de investimento	73
Tabela 24: Caracterização físico-química _____	77
Tabela 25: Quantidade de material utilizado para cada amostra _____	77
Tabela 26: Caracterização físico-química ao final do ensaio _____	78
Tabela 27: Eficiência de remoção em relação ao DQO _____	78
Tabela 28: Eficiência de remoção em relação ao DBO _____	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

°C Graus Celsius

a Número de átomos de hidrogênio na molécula

AMPTS Automatic Methane Potential Test System

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

b Número de átomos de oxigênio na molécula

BMP *Biomethane Potential* (Potencial bioquímico de metano)

C Carbono

CH₄ Metano

CO₂ Dióxido de carbono

CSTR Reator Contínuo de Tanque Agitado

DQO Demanda Química de Oxigênio

DA Digestão anaeróbia

e Número de átomos de enxofre na molécula

H hidrogênio

H₂ Hidrogênio

H₂S Ácido sulfídrico

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEE Instituto de Energia e Ambiente

kg Quilograma

kWh Quilowatt-hora

l Litro

m Massa

m³ Metros cúbicos

mg Miligrama

ml Mililitros

MM Massa molar

MWh Megawatt-hora

n Número de átomos de carbono na molécula

N Número de mols

Nm³ Normal metro cúbico

Q Vazão

ST Sólidos totais

SV Sólidos Voláteis

ton Tonelada

TRH Tempo de Retenção Hidráulica

USP Universidade de São Paulo

Vi Volume de gás produzido observado no dispositivo

VN volume do gás seco no estado normal

z Número de átomos de nitrogênio na molécula

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA	2
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	18
2.1. Objetivo Principal	18
2.2. Objetivos específicos	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. Bovinocultura de Corte	19
3.2. Processo Produtivo	20
3.3. Consumo de Energia	23
3.4. Resíduos oriundos do processo produtivo	25
3.4.1. Tratamento dos resíduos	25
3.5. Digestão Anaeróbia	28
3.5.1. Digestão Anaeróbia de Resíduos Bovinos e usos do biogás	30
3.6. Ensaio de Determinação do Potencial Bioquímico do Metano - BMP	33
4. METODOLOGIA	37
4.1. Coleta de amostra e Substrato	37
4.2. Preparo do Substrato	41
4.3. Caracterização físico-química	43
4.4. Delineamento experimental	44
4.5. Determinação do Potencial Teórico	45
4.6. Análise do Potencial Bioquímico de Metano (BMP)	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1. Resultados do ensaio BMP	53
5.2. Potencial energético dos resíduos produzidos no abatedouro – estudo de caso	60
5.2.1. Cálculo da Energia Elétrica	63
5.2.2. Cálculo de Energia térmica disponível por cogeração	65
5.3. Implantação do sistema de recuperação energética e Estimativa de <i>Payback</i> Simples	68
5.4. Avaliação do impacto da presença do sangue na produção de biogás	77
6. CONCLUSÕES	83
6.1. Sugestão de trabalhos futuros	84
7. REFERÊNCIAS	86

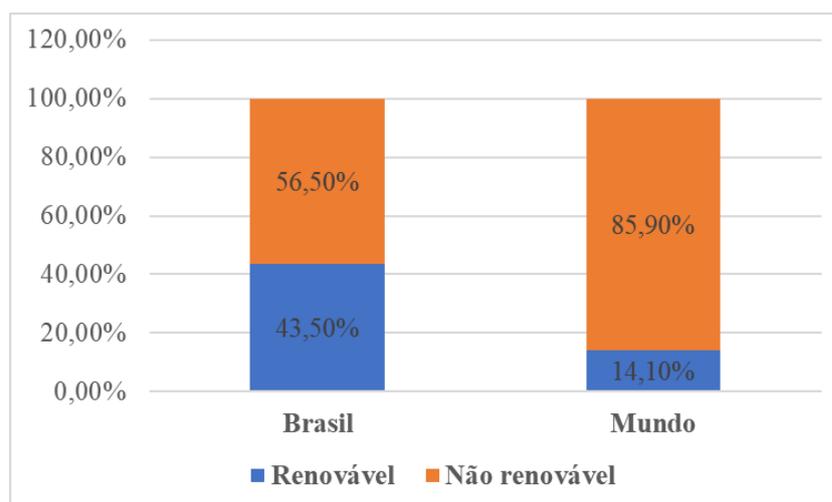
ANEXO I - Procedimento para realização dos testes de estanqueidade do Sistema de Fermentação em Batelada do Laboratório de Biocombustíveis do IEE/ USP _____	96
ANEXO II – Gráfico dos testes de estanqueidade realizados nos conjuntos utilizados no ensaio BMP _____	100
Anexo III – Orçamento Rastro e ERBR para implantação do biodigestor com sistema de cogeração _____	114

1. INTRODUÇÃO

As fontes de energia são recursos fundamentais para o crescimento da economia de um país e há uma forte relação entre o desenvolvimento das sociedades e o consumo de energia. (CARVALHO, 2014). Para o caso de países em desenvolvimento, como o Brasil, este é um fator crítico, que pode afetar distintos setores da sociedade e da economia. Atualmente a produção e consumo de energia à nível mundial são fortemente baseadas em combustíveis fósseis altamente poluentes, que geram Gases de Efeito Estufa (GEE).

Ao passo que novas fontes de energia foram descobertas pela humanidade, foram surgindo novos sentidos para a evolução da sociedade (CARVALHO, 2014). Dessa forma, as fontes de energia se mostram imprescindíveis para o crescimento da economia dos países. Atualmente, os combustíveis fósseis são a principal fonte de energia no mundo e a contribuição de fontes renováveis é bastante inexpressiva ainda, apesar do aumento dos últimos anos, principalmente da fonte solar. É preciso, portanto, estimular a produção de fontes renováveis de energia. Neste sentido, o Brasil está em uma posição mais confortável do que o resto do mundo, já que a oferta interna de energia proveniente de fontes renováveis no País em 2018 foi de 56,5%, enquanto a média mundial naquele ano foi de 14,1% (EPE, 2021). A Figura 1 compara o consumo de energia renovável e não renovável no Brasil e no Mundo.

Figura 1: Consumo de Energia no Brasil e no Mundo



Fonte: Adaptado de EPE (2018)

Porém, a dependência massiva de uma fonte, como o caso brasileiro da energia hidroelétrica é um risco à segurança energética nacional, devido à alta exposição às condições climáticas. O Operador Nacional do Sistema (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e

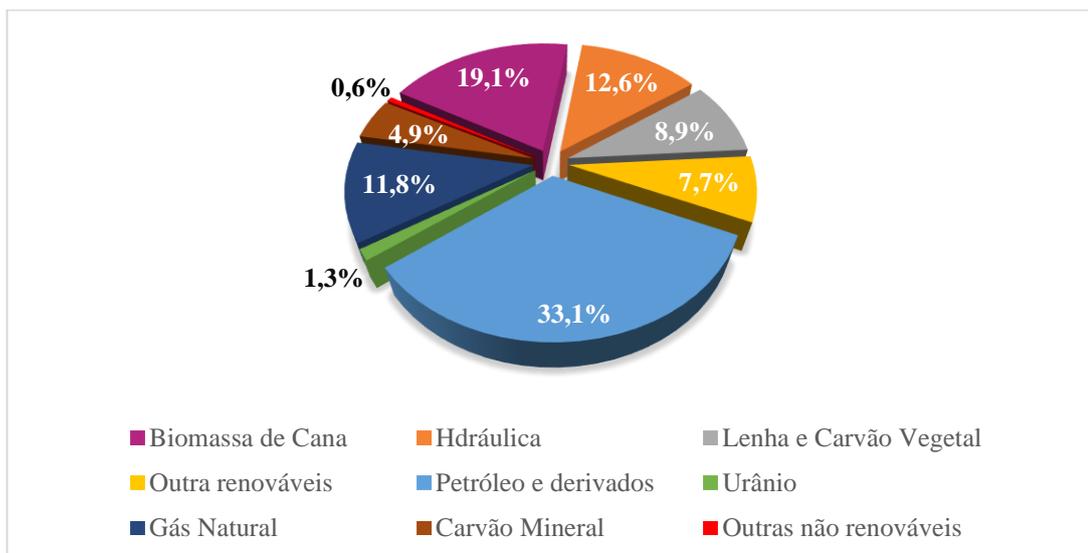
controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Segundo o ONS, a capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente por usinas hidrelétricas, distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas. Porém, as usinas térmicas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro.

Para tanto, introduzir outras fontes de energia matriz energética nacional pode contribuir para redução do custo de operação das usinas termoelétricas para suprir a demanda interna por energia elétrica e que repassado aos consumidores finais por meio das bandeiras tarifárias além de diminuir a dependência da geração de energia às condições climáticas.

Nesse âmbito, gradativamente as energias renováveis e alternativas à energia hidrelétrica centralizada têm se mostrado um papel essencial e, dentre essas fontes está o biogás. Segundo o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional de 2021 (BEN, 2021), as energias renováveis representaram 48,4% do total de energia consumida, sendo outras renováveis 7,7%. A Figura 2 apresenta a repartição da oferta interna de energia.

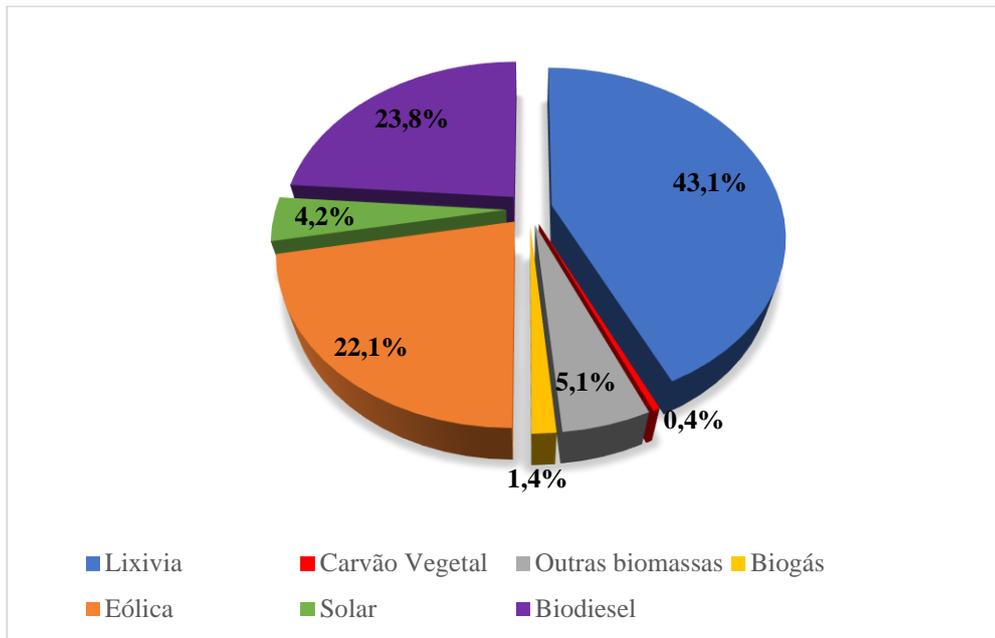
Figura 2: Repartição da oferta interna de energia



Fonte: Adaptado de EPE – Balanço Energético Nacional (2021)

Na fatia outras renováveis, o biogás representa apenas 1,4% apesar de ter apresentado aumento de 15,7% do ano de 2019 para 2020 de acordo com o relatório síntese do Balanço Energético Nacional de 2021. A figura 3 demonstra a repartição da fatia outras renováveis.

Figura 3: Repartição de Outras Renováveis



Fonte: Adaptado de EPE – Balanço Energético Nacional (2021)

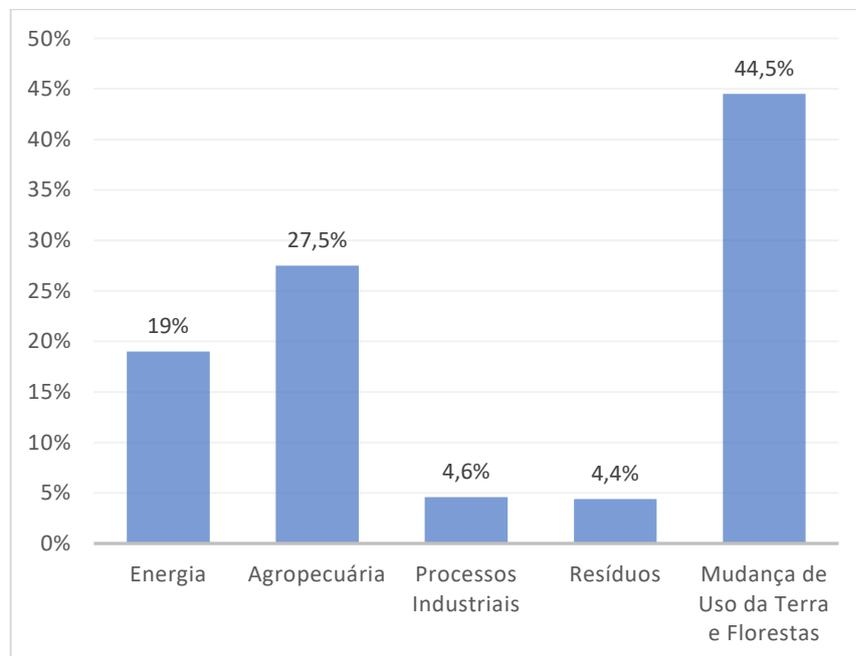
Apesar de o Brasil contar com uma matriz energética mais limpa do que a matriz global, se espera que o aumento da oferta para atender à crescente demanda interna de energia continue a ser renovável e, ainda, cada vez mais limpa. Apesar dos recentes incentivos para uso dos recursos renováveis de energia, o biogás ainda apresenta diversas barreiras a serem enfrentadas a fim de ampliar o seu uso no país, que apresenta um grande potencial a partir da agropecuária.

No ano de 2020, o agronegócio alcançou participação de 26,6% no Produto Interno Bruto do Brasil (PIB) de acordo com o CEPEA (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada) em parceria com a CNA (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil). Dentre as atividades do setor, a produção agropecuária representou 7% do PIB. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC) a exportação de carne bovina foi responsável por 4% do total das exportações de 2020. O setor agropecuário tem grande importância na economia brasileira, porém também é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa.

De acordo com relatório do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG,2020), no ano de 2019 o setor agropecuário foi responsável por 27,5%

das emissões de gases de efeito estufa (GEE), lançando na atmosfera 598.672.055 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e). A grande emissão do setor é causada sobretudo pelo tamanho do rebanho bovino. Na soma das emissões agropecuárias com as demais relacionadas ao setor agro, pode-se dizer que a atividade rural foi responsável por 72 % das emissões, diretas ou indiretas demonstrando que, o país não conseguiu mudar a trajetória das emissões para se assemelhar com a curva de países desenvolvidos, na qual o setor de energia é o maior emissor. A figura 4 apresenta a representação por setor produtivo de emissões de gases do efeito estufa no Brasil em 2019.

Figura 4: Porcentagem de emissões de gases do efeito estufa por setor produtivo no Brasil em 2019



Fonte: Adaptado de SEEG (2020)

Além da emissão de GEE, podemos destacar entre os efeitos ambientalmente negativos causados pela atividade agropecuária, a destruição de ecossistemas naturais, degradação do solo e de recursos hídricos e o manejo dos resíduos sólidos.

A pecuária extensiva pode causar a degradação do solo através da compactação e erosão, além da contaminação de recursos hídricos através dos dejetos. O manejo adequado dos resíduos sólidos, considerando os dejetos e os oriundos do processo de abate, deve ser realizado a fim de minimizar os efeitos poluentes da atividade, considerando-se que todos os resíduos produzidos na pecuária são em grandes escalas.

O desafio é conciliar os aspectos ambientais envolvidos, aliando os diversos aspectos para o desenvolvimento do país como o aumento no consumo de água e energia, associado à geração de resíduos urbanos e rurais. Levando-se em conta essa problemática, o tratamento dos resíduos oriundos da criação e terminação animal é uma necessidade. Os abatedouros e frigoríficos são grandes geradores de resíduos sólidos e líquidos, que caso não sejam adequadamente tratados podem vir a causar poluição ambiental dos solos e corpos hídricos. Entretanto, o aproveitamento destes resíduos para a produção de energia pode ser uma alternativa, aliando o tratamento dos resíduos sólidos, diminuindo o consumo de energia elétrica ou de combustíveis.

A digestão anaeróbia dos resíduos a partir de microrganismos, com consequente produção de biogás se apresenta como uma solução viável para a produção de energia. O biogás é composto majoritariamente por gás metano (CH_4) e dióxido de Carbono (CO_2) pode ser utilizado tanto para a produção de energia elétrica quanto para a produção de energia térmica. Adicionalmente, o líquido resultante desse processo biológico, pode ser utilizado como biofertilizante em substituição aos fertilizantes minerais.

São diversas as potencialidades do biogás a serem consideradas. É uma fonte de energia renovável, armazenável, podendo gerar energia elétrica ou como combustível e com possibilidade de produção regional descentralizada e descarbonização do sistema de abastecimento de energia, devido às vantagens de serem tecnologicamente maduras, implementáveis em escalas locais e regionais e virtualmente inesgotáveis (SIDDIKI, et al., 2021) s. Entretanto ainda existem diversos desafios a serem enfrentados, tanto para difundir o seu uso no país.

É nesse contexto que se insere esta pesquisa, cuja proposta foi realizar uma análise técnica da eficiência do aproveitamento energético do biogás a partir dos resíduos sólidos orgânicos e sem valor comercial gerados em abatedouros de bovinos para ser utilizado para a produção de energia térmica e elétrica (cogeração) para suprir a demanda energética do local.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Principal

Demonstrar em escala laboratorial o potencial do uso dos subprodutos oriundos do processo de abate de bovinos na geração de energia a partir do biogás e reportar a possibilidade de uso energético *in situ* desta fonte de energia renovável.

2.2. Objetivos específicos

- Evidenciar o cenário do mercado brasileiro da produção e principalmente de abate de animais, ressaltando a cadeia produtiva da carne bovina, o manejo, gerenciamento e destino dos resíduos e subprodutos e o consumo de energia no processo de produção;
- Caracterizar físico-quimicamente os substratos a serem utilizados como fonte orgânica para a geração de energia na forma de biogás;
- Mensurar, qualitativamente e quantitativamente, a produção de biogás proveniente da digestão anaeróbia a partir dos subprodutos do abatedouro através de ensaios laboratoriais em batelada, com reatores instrumentados com medidores de coleta de dados em tempo real;
- Demonstrar o potencial energético dos ensaios laboratoriais em equivalência à escala real de um estudo de caso de uma indústria frigorífica e analisar a aplicação do biogás produzido na forma de energia elétrica ou térmica *in situ*.
- Realizar o estudo da viabilidade econômica do Projeto de instalação de biodigestores no abatedouro

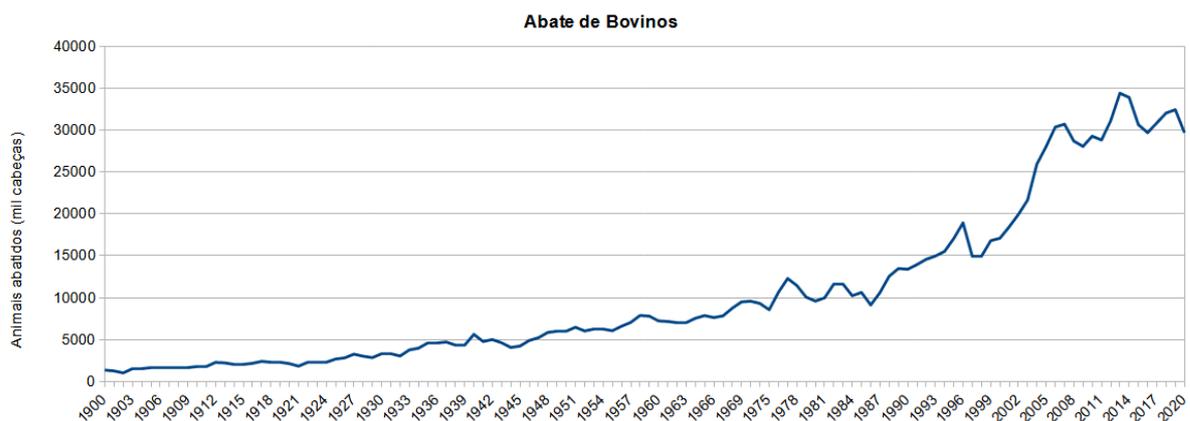
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Bovinocultura de Corte

O agronegócio é composto por setores de produção primária, como a agropecuária, que fornecem matéria-prima para a indústria de processamento e commodities (LERMEN, et al., 2018). No Brasil, o agronegócio em 2020 alcançou 26,6% do PIB nacional, segundo dados do CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, em parceria com o NCA - Confederação Nacional da Agricultura.

A bovinocultura se apresenta como um importante segmento do agronegócio brasileiro sendo que, no setor agroindustrial, é o que mais movimenta as exportações no Brasil, o que posiciona o país como um dos maiores exportadores mundiais de carne (bovina, suína e avícola) (Lima et al., 2020). No ano de 2020 foram abatidas no total 29,7 milhões de cabeças de gado sob algum tipo de serviço de inspeção sanitária federal, estadual ou municipal (IBGE, 2021). Houve queda, após três anos sucessivos de crescimento, retornando aos níveis de produção de 2016. Porém, apesar desse cenário, o Brasil, desde 2004 tem papel de liderança nas exportações mundiais e de acordo com a Secretaria de Comércio Exterior do Ministério da Economia, as exportações de carne bovina *in natura* alcançaram um nível inédito em 2020. A Figura 5 apresenta a série histórica do abate de bovinos desde 1900.

Figura 5: Série histórica do Abate de Bovinos no Brasil



Fonte: IBGE, 2021

De acordo com Smith et al. (2018), a demanda por carne bovina como fonte de proteína está aumentando em todo o mundo e os aspectos do processo produtivo têm diferentes significados nas diversas regiões geográficas e socioeconômicas do mundo. Os recursos

naturais, incluindo disponibilidade e os usos do solo, recursos hídricos, sazonalidade de precipitações, o acesso à alimentação animal, e a robustez da economia são os principais determinantes da percepção da sustentabilidade da carne bovina.

A alta demanda por carnes bovinas proporciona o desenvolvimento econômico e social, mas também produz grandes quantidades de resíduos que são altamente poluentes. Desde a criação do gado no campo até o beneficiamento da carne, são produzidas grandes quantidades de resíduos ricos em proteínas, lipídios, fibras e carboidratos (Aziz et al, 2019) que podem ser convertidos em gás metano através da digestão anaeróbia para geração de energia e biofertilizantes. O processo da digestão anaeróbia a partir de resíduos apresenta-se como solução para um sistema de produção mais sustentável por fornecer um método poderoso para reciclagem de recursos e fechamento do ciclo de produção.

3.2. Processo Produtivo

A atividade da bovinocultura de corte inicia-se com a aquisição dos bezerros que podem vir da própria fazenda ou a partir de fornecedores. A forma da produção pode ser intensiva, com sistema de confinamento completo, semiextensiva onde há o fornecimento de alimentação complementar além da pastagem e a extensiva, quando os animais ficam soltos em pastos.

No Brasil, o manejo do gado é predominantemente extensivo, com uma pequena fração do gado de corte terminado em confinamento. A produção brasileira de carne bovina tem um dos menores custos, mas também as menores taxas de produtividade (por hectare) do mundo. Além disso, cerca de 50,0% da área de pastagem existente está degradada. Todos os estados brasileiros criam gado de corte, com a raça Nelore representando a maioria dos bovinos de corte produzidos, mas utilizando sistemas de manejo muito diferentes em diferentes áreas do país (Souza et al. 2019).

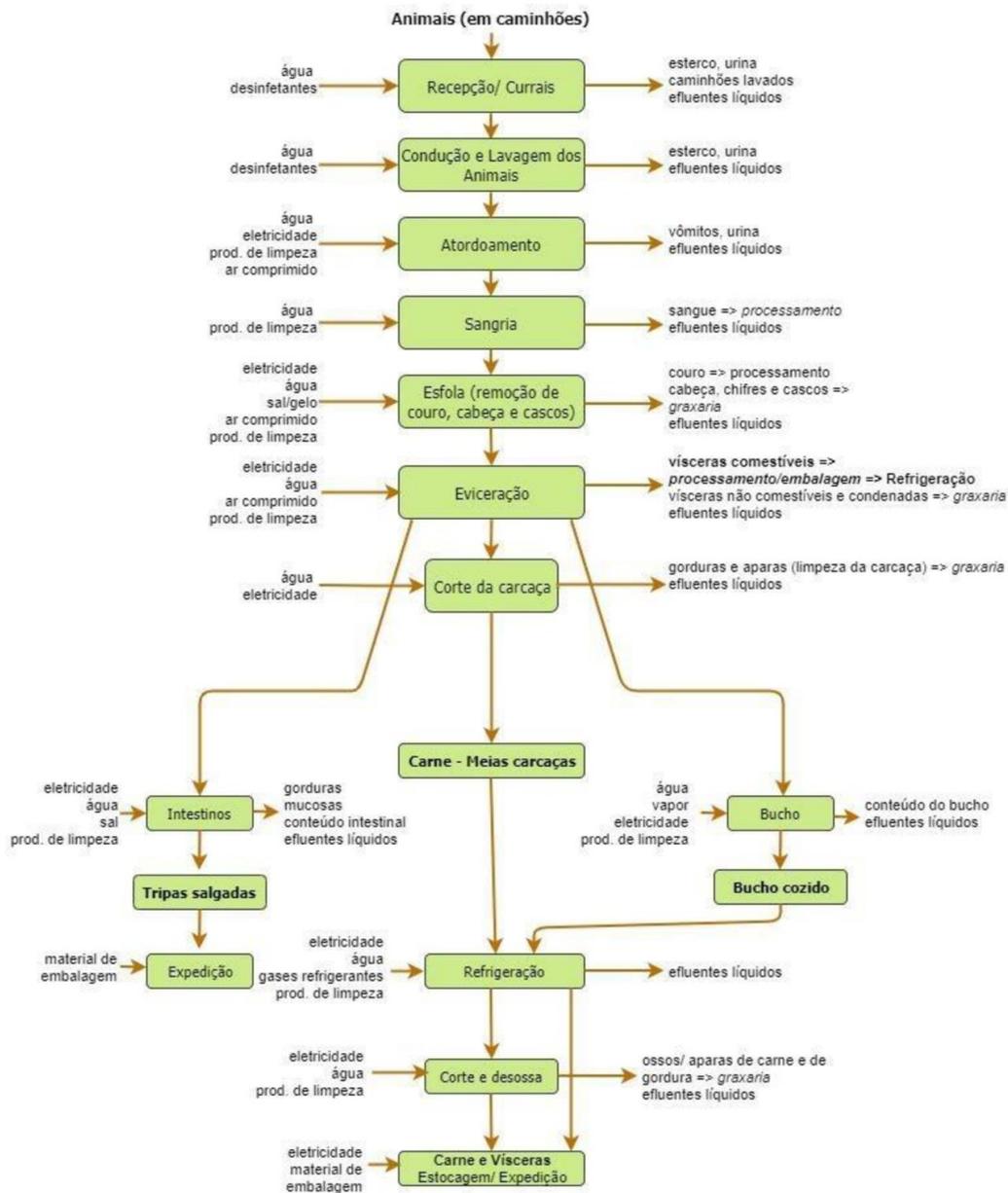
São considerados aptos para o abate quando os animais alcançam cerca de 430 a 530 kg e o tempo de permanência no sistema intensivo abrange por volta de 109 a 198 dias (EMBRAPA, 2008). A alimentação dos animais é composta principalmente por alimentos volumosos como pastagens naturais, capineiras e silagens, energéticos como o milho, sorgo, arroz, proteínas, minerais, vitaminas e aditivos. Em relação aos dejetos produzidos, no caso de animais que estão confinados, é possível realizar o manejo enquanto para os animais semiconfinados ou livres em áreas de pasto, é inviável algum sistema de tratamento para os dejetos.

Em decorrência do processo de abate de bovinos há produção de diversos subprodutos e resíduos que necessitam passar por processamento específico ou serem descartados como efluentes líquidos. Frequentemente, a finalidade e o destino dos resíduos ou subprodutos do abate dependem de características locais, tal qual a existência de mercado e de logística adequada entre as operações. De qualquer forma, a destinação adequada necessita ser realizada a fim de atender às leis e normas vigentes, tanto sanitárias, quanto ambientais. Quando não há o tratamento adequado, os efluentes podem causar danos ao meio ambiente, como a contaminação de solos e águas superficiais e subterrâneas. Anualmente, no mundo são produzidas grandes quantidades de resíduos oriundos da pecuária e de abatedouros, o que provoca grande poluição ambiental (HADI, et al., 2014).

Para este trabalho, é necessário o entendimento do funcionamento e classificação das unidades de abate de animais. A figura 6 apresenta um fluxograma do processo de abate de bovinos, que de acordo com a classificação proposta pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) pode ser realizado em unidades chamadas de abatedouro, que apenas realizam o abate do animal, produzindo carcaças e vísceras comestíveis ou frigoríficos, que podem ser de dois tipos, os que realizam o abate de animais e separam a carne, as vísceras e as industrializam produzindo seus derivados e subprodutos e os que não abatem animais e realizam apenas o processamento de carcaça e vísceras oriundas de abatedouros e as industrializam produzindo seus derivados e subprodutos. A graxaria é a parte responsável pelo processamento dos subprodutos e dos resíduos gerados nos abatedouros e frigoríficos, e em açougues.

Os animais, ao chegarem aos locais de abate, são deixados em currais de recepção onde permanecem em repouso e jejum pelo período de 16 até 24 horas para que possam se recuperar do “stress” causado pelo transporte e para diminuir o conteúdo estomacal e intestinal. Os caminhões que realizaram o transporte dos animais são lavados em área próprias e os efluentes lançados na Estação de tratamento de esgoto (ETE) da unidade. Encerrado o período de descanso dos animais, eles são conduzidos por uma área cercada que vai se afunilando até a sala de abate. Durante o trajeto os animais são lavados com água clorada e os efluentes também devem ser direcionados para a ETE da unidade.

Figura 6: Fluxograma do processo de abate de bovinos



Fonte: Adaptado de (CETESB, 2008)

A etapa seguinte consiste no atordoamento dos animais, realizado usualmente com uma marreta pneumática que deixa o animal inconsciente. Nesta fase, é normal os animais vomitarem, o que faz necessário outra limpeza com jato d'água. A etapa seguinte é a sangria, que é realizada com o animal suspenso. O sangue que escorre é coletado em calhas e direcionado para tanques. As etapas que se seguem são a esfola e remoção da cabeça, evisceração, corte da carcaça e refrigeração. Caso a unidade realize o corte e a desossa, as

carcaças resfriadas são divididas em pedaços menores para comercialização e processamento de produtos derivados. As partes não comestíveis são enviadas à graxaria (CETESB, 2008). A Tabela 1 apresenta a porcentagem de produtos e subprodutos de um animal com massa de 400 kg.

Tabela 1: Produtos e subprodutos do abate de um bovino de 400kg

	Massa (kg)	Percentual da massa do animal (%)
Peso vivo	400	100
Carne desossada	155	39
Material não comestível para graxaria (ossos, gordura, cabeça, partes condenadas, etc.)	152	38
Couro	36	9
Vísceras comestíveis (língua, fígado, coração, etc)	19	5
Sangue	12	3
Outros (conteúdos estomacais e intestinais, perdas, etc)	26	7

Fonte: Adaptado de (CETESB, 2008) *apud* UNEP; DEPA; COWI, 2000

3.3. Consumo de Energia

O consumo de energia para qualquer processo produtivo é um aspecto de extrema relevância e a cadeia produtiva de carne bovina é um grande consumidor. O aquecimento de água demanda grandes quantidades de calor enquanto os diversos motores e equipamentos elétricos que compõem os sistemas de iluminação, exaustão, refrigeração ou máquinas elétricas de cada fase da produção demandam energia elétrica.

No entanto, a principal demanda de um abatedouro é energia térmica, representando cerca de 80 a 85% do montante necessário e, normalmente, gerada pela queima de combustíveis em caldeiras. O consumo de energia elétrica, por sua vez, representa entre 15 a 20% da demanda total. O principal consumo de energia elétrica deve-se principalmente pela grande utilização de refrigeradores ou câmaras frias. A distribuição do consumo de energia elétrica de um abatedouro é descrita na Tabela 2.

Tabela 2: Distribuição do consumo de energia elétrica em abatedouros de acordo com a operação

Operação	Percentual de energia total consumida	
		(%)
Refrigeração		59
Sala de Caldeiras		10
Processamento de subprodutos		9
Área de Abate		6
Geração de ar comprimido		5
Área de desossa		3
Outros		8

Fonte: Adaptado de (CETESB, 2008) *apud* UNEP, DEPA, COWI, 2000

O aumento da eficiência energética em uma unidade abatedora é importante para aumentar a lucratividade, considerando a elevação dos preços da energia. FRITZON E BERNTSSON (2005 E 2006) apresentaram opções tecnicamente interessantes para tornar os abatedouros mais eficientes em energia. Nesses artigos os autores investigaram o potencial de redução do uso de energia, tanto a demanda de calor quanto o uso de eletricidade no sistema de refrigeração, na indústria de abate e processamento de carnes e a eficiência energética no processo produtivo (e a possibilidade de redução de emissões de CO₂). Os autores relataram que, nas condições estudadas (regionais, sazonais, econômicas) fez-se interessante optar pelo aumento da rede de trocadores de calor ou em bombas de calor nas plantas, com consequentes reduções entre 5% e 35% das emissões totais de CO₂, sendo a redução mais econômica das emissões de CO₂ alcançada, trocando óleo combustível pelo gás natural.

WARE e POWER (2016) avaliaram o potencial de recuperação de energia em um abatedouro de gado utilizando a digestão anaeróbia e concluíram que as demandas térmicas e elétricas das instalações industriais poderiam ser atendidas com a energia gerada pela combustão do biogás. VILVERT et al. (2020) avaliaram o potencial de produção de metano e biogás em um frigorífico na região Sul do Brasil e concluíram que o uso de lagoas anaeróbias cobertas atenderia parcialmente à demanda energética, representando 16% do total, além de trazer vantagens ambientais como redução de emissão de gases de efeito estufa e maior eficiência no sistema de tratamento.

3.4. Resíduos oriundos do processo produtivo

No processo produtivo da carne bovina, os subprodutos e resíduos oriundos das diversas etapas do processo são destinados à graxaria para o processamento. São considerados resíduos todas as sobras resultantes do processo produtivo e que são impróprias para o consumo humano, tais como sangue, ossos, cascos, chifres, gorduras, aparas de carne, animais ou suas partes condenadas pela inspeção sanitária e vísceras não-comestíveis. Há também a produção de resíduos líquidos resultantes da lavagem dos animais, dos ambientes e máquinas utilizadas no processo.

3.4.1. Tratamento dos resíduos

I Efluente líquido

O Brasil possui abundante disponibilidade de água, em quantidade e qualidade que auxilia no quadro competitivo dos produtos de origem animal brasileiros. A Agência Nacional de Águas (ANA) 2019 contabilizou que a agricultura brasileira foi responsável por 79% do consumo total de água, a irrigação por 68,4% e a ingestão de animais por 10,8%. Do total do consumo animal, o gado bovino representa 88%, seguido por suínos 5% e aves domésticas 2% (FLACHSBARTH, et al., 2015).

O uso da água é essencial nas indústrias de processamento de carnes, onde possui diversas funções. A grande quantidade de consumo de água na indústria de abatedouros é devido aos diversos processos industriais e à demanda específica de água (LOGANATH, et al., 2020). Esse alto consumo, leva a grandes volumes de efluentes, com cerca de 80–95% da água consumida sendo lançada na forma de efluente líquido. Esta água residual é caracterizada por alta Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), em grande parte devido à presença de componentes ruminais, esterco, óleos e graxas (OG) e sangue (VILVERT, et al., 2020)

Costumeiramente os efluentes líquidos do abatedouro são divididos em duas linhas chamadas de linha “verde” e de linha “vermelha”. Os efluentes da linha verde são resultantes de áreas onde não ocorrem processos com lavagem de sangue e os da linha vermelha são os efluentes de áreas com resíduos de sangue. Apesar de serem bastante parecidos, a separação

das linhas é feita com o objetivo de facilitar e promover maior eficiência no tratamento primário de forma a remover os sólidos em suspensão no efluente.

Após a remoção dos sólidos em suspensão, o efluente de ambas as linhas é encaminhado ao tanque de equalização com a finalidade de atenuar os picos de cargas poluentes para otimizar o processo na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). A seguir é realizado o tratamento secundário, onde geralmente predominam os mecanismos biológicos sendo constituído primeiramente de uma etapa anaeróbia, para conversão dos compostos mais complexos em compostos mais simples, para posterior assimilação em uma etapa aeróbia. Ainda, em função das exigências legais locais, pode ser realizado o tratamento terciário que proporciona a remoção de sólidos, nutrientes e organismos patogênicos (Cetesb, 2008).

BUSTILLO-LECOMPTE E MEHRVAR (2015) apresentaram em um artigo de revisão, os avanços nas características, tratamento e gerenciamento de efluentes de abatedouros e frigoríficos e destacaram um progresso significativo no tratamento anaeróbio de alta taxa, remoção de nutrientes, Processos Oxidativos Avançados (POAs), e a combinação de tratamento biológico e POAs para o tratamento do efluente e concluíram que a seleção de determinada tecnologia depende das características do efluente, da tecnologia disponível e do cumprimento das regulamentações. Aziz et al (2019) apresentaram uma revisão com o objetivo de fornecer informações apenas sobre o tratamento biológico (anaeróbio e aeróbio) de águas residuárias de abatedouro e apresentam como vantagens do tratamento anaeróbio a alta remoção de matéria orgânica, menor produção de lodo, baixa necessidade de energia, execução de taxas de carregamento mais altas e considerável produção de biogás.

II Resíduos sólidos

Grandes quantidades de resíduos sólidos são geradas nos abatedouros e necessitam de um tratamento específico tendo em vista que a maioria desse resíduo é altamente putrescível e pode causar odores se não forem processadas nas graxarias ou removidas rapidamente (CETESB, 2008). São considerados resíduos sólidos os gerados no processo produtivo conforme descritos na Tabela 3 e, os resíduos gerados em operações auxiliares como os provenientes da ETE, cinzas das caldeiras, resíduos de manutenção como solventes e óleos lubrificantes, sucatas metálicas, embalagens, pallets, etc. O manejo, armazenamento e disposição desses resíduos devem ser controlados para que não contaminem o solo e águas superficiais e subterrâneas.

Tabela 3: quantidade média dos principais resíduos gerados em abatedouros de bovinos

Resíduos (origem)	Quantidade (kg/cabeça, bovino de 250kg de peso vivo)	Percentual em relação ao animal (%)
Esterco	4,5	1,8
Material não comestível para graxaria (ossos, gordura, cabeça, partes condenadas, etc - abate)	95	38
Conteúdo estomacal e intestinal (bucharia e triparia)	20-25	8-10
Sangue (abate)	15-20 litros	6-8*

* Considerando-se a densidade do sangue sendo 1 g/mL

Fonte: Adaptado de (CETESB, 2008)

Os resíduos de abatedouros são compostos de altos níveis de matéria orgânica, principalmente proteínas e lipídios. Diversos estudos relataram como tendo alto potencial de produção de biometano, porém, a maioria tem sido conduzida no sentido do tratamento dos efluentes líquidos dos abatedouros.

HEJNFELT e ANGELIDAKI (2009) relataram ser um substrato difícil para a digestão anaeróbia por causar degradação da proteína que libera amônia, que em altas concentrações é sugerida como inibidora para os microrganismos anaeróbios. Além disso, os lipídios também podem causar problemas na digestão anaeróbia por causa de sua tendência a promover espuma flutuante e ao possível acúmulo de intermediários de degradação inibidores, como ácidos graxos de cadeia longa (LCFAs).

A co-digestão de resíduos de matadouros com outros resíduos das atividades agroindustriais tem sido proposta como solução para os problemas da biodigestão. Para SALAMA et. al. (2019), a co-digestão de materiais com alto teor de gordura com outras matérias-primas pode favorecer o equilíbrio da relação carboidrato, proteína e lipídio para recuperação eficiente de metano. PAGÉS-DIAZ et. al. (2014) realizaram um estudo com várias combinações de resíduos para a co-digestão e obtiveram melhor rendimento de metano quando adicionaram partes iguais de resíduos sólidos do abatedouro com resíduos sólidos urbanos, dejetos e mistura de várias culturas. BOROWSKI et. al. (2018) estudaram a co-digestão mesofílica de resíduos de matadouros com resíduos alimentares utilizando lodo de esgoto como

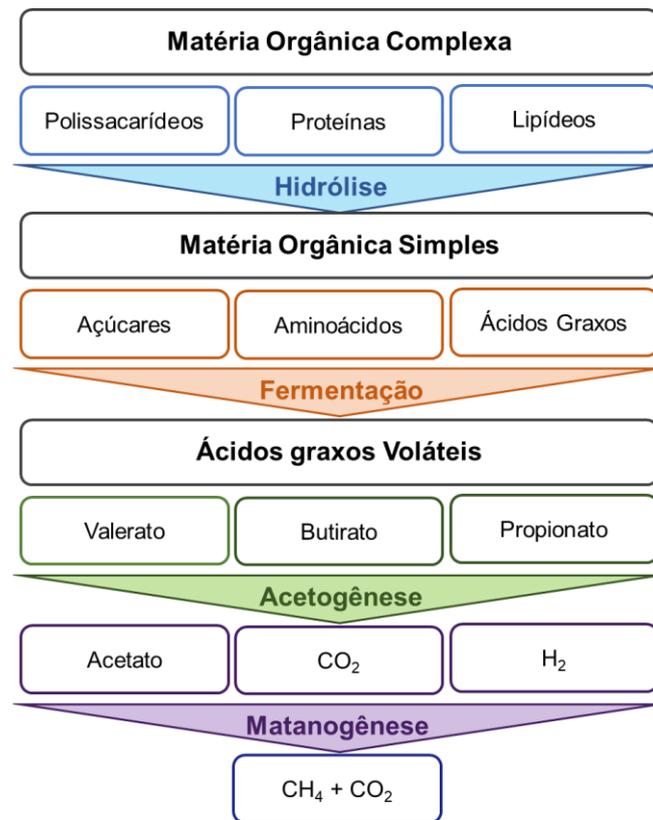
inóculo e obtiveram maior rendimento de metano comparados aos resíduos digeridos individualmente.

Recentemente WANG et. al. (2021) realizaram uma avaliação do ciclo de vida do tratamento de resíduos de matadouro nos Estados Unidos usando sistemas de digestão anaeróbia. Os resultados indicaram que a digestão anaeróbia dos resíduos do abatedouro pode reduzir substancialmente as emissões de GEE da indústria de carne, bem como produzir bioenergia para fornecer segurança energética nos EUA.

3.5. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) é o processo de transformação dos resíduos orgânicos através de microrganismos em gás metano e dióxido de carbono. É um processo que acontece naturalmente, mas que pode ser explorado de forma útil para a redução dos resíduos em condições controladas, gerando produtos como o biogás e o digestato que pode ser utilizado como biofertilizante. Ocorre em quatro fases, nas quais os compostos orgânicos complexos são convertidos em formas mais simples, principalmente metano e dióxido de carbono. As quatro fases consecutivas são chamadas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A Figura 7 apresenta o fluxograma da digestão anaeróbia. As fases individuais são conduzidas por diferentes grupos de microrganismos em uma relação parcialmente sintrófica e que necessitam de diferentes condições do meio.

Figura 7: Fluxograma da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de (CHERNICHARO, 2007)

Hidrólise: a matéria orgânica sólida como proteínas, celulose e gorduras, é transformada em matéria orgânica solúvel na presença de bactérias anaeróbias e facultativas. Os carboidratos por serem moléculas mais simples são degradados rapidamente, enquanto as proteínas e lipídios levam um pouco mais de tempos. Já a lignocelulose e a lignina são degradados lentamente e de forma incompleta.

Acidogênese ou Fermentação: transformação da matéria orgânica solúvel resultante da fase hidrolítica, em ácidos orgânicos de cadeia curta (C1 a C5) como ácido butírico, ácido propiônico, acetato e o ácido acético, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. Essa transformação acontece rapidamente e é realizada por bactérias anaeróbias e facultativas.

Acetogênese: os produtos gerados na acidogênese são transformados em ácido acético e hidrogênio pelas bactérias acetogênicas.

Metanogênese: transformação do ácido acético em metano e dióxido de carbono na presença de arqueias metanogênicas

Alguns parâmetros operacionais e ambientais como o pH, taxa de carga orgânica (OLR), tempo de retenção hidráulica (TRH), suplementação de micronutrientes, toxicidade de amônia, proporção da relação entre carbono e nitrogênio (C/N) e temperatura influenciam a relação entre os microrganismos e conseqüentemente, o desempenho e estabilidade da digestão anaeróbia (PASALARI, et al., 2021)

A temperatura é um fator significativo, causando diversos efeitos na comunidade microbiana. Temperaturas baixas durante o processo reduzem o crescimento dos microrganismos causando inibição do sistema e conseqüentemente, baixa produção de metano. Temperaturas altas também vão atuar como inibidoras do processo, reduzindo a produção de metano por favorecer a produção de substâncias tóxicas às metanogênicas, como a amônia.

Para otimizar a distribuição de nutrientes do meio, favorecendo as diversas interações de bactérias e evitar toxicidade, tem sido utilizada a co-digestão anaeróbia com diversos tipos de substrato. Conhecer as interações das comunidades microbianas e as respostas às variações ambientais e operacionais pode abrir caminho para aumentar a eficiência e estabilidade do processo (PASALARI, et al., 2021).

Outra técnica que tem sido amplamente empregada como forma de otimizar a DA é implementar um processo de pré-hidrólise, no qual é realizado algum tratamento dos resíduos, previamente à digestão anaeróbia. As técnicas mais utilizadas são o tratamento químico, termoquímico, bioquímico e mecânico. Porém, é necessário ter precaução quanto à utilização dos pré-tratamentos, pois apesar das vantagens, elas também podem ocasionalmente impactar negativamente principalmente em relação ao custo elevado e dificuldade na operação dos biodigestores.

3.5.1. Digestão Anaeróbia de Resíduos Bovinos e usos do biogás

A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos provenientes de abatedouros se destaca como forma de promover a reciclagem e geração de energia, além do fato de que a natureza das transformações biológicas durante o processo de digestão fornecer como subproduto o digestado com potencial fertilizante. Também foi considerado como uma das melhores alternativas para recuperação de energia dos subprodutos e resíduos de matadouro (ANGELIDAKI, et al., 2009) (MARTINEZ-SOSA, et al., 2009) (PALATSI, et al., 2011). A vantagem do tratamento anaeróbio é a alta remoção de matéria orgânica com baixa produção de lodo, baixo consumo de energia e produção de biogás. O alto teor de gordura e proteína

significa que os resíduos de matadouro são considerados um bom substrato para o processo de digestão anaeróbia, devido ao alto rendimento esperado de metano. No entanto, taxas de hidrólise lentas e processo inibitório foram relatados.

Recentemente, LOGONATH e SENOPHIVAH-MARY (2020) descreveram em uma revisão o estado da arte da produção de energia elétrica a partir do biogás gerado de resíduos sólidos e efluentes industriais de matadouros com relação a todos os tipos de reatores anaeróbios e destacaram os fatores que afetam a produção de biogás na indústria de frigoríficos. O BMP (*Biochemical Methane Potential*) dos resíduos do matadouro e águas residuais pode ser aumentado pelo processo de co-digestão através da adição da fonte de carbono residual juntamente com os métodos de pré-tratamento químico/biológico para lipídios e proteínas.

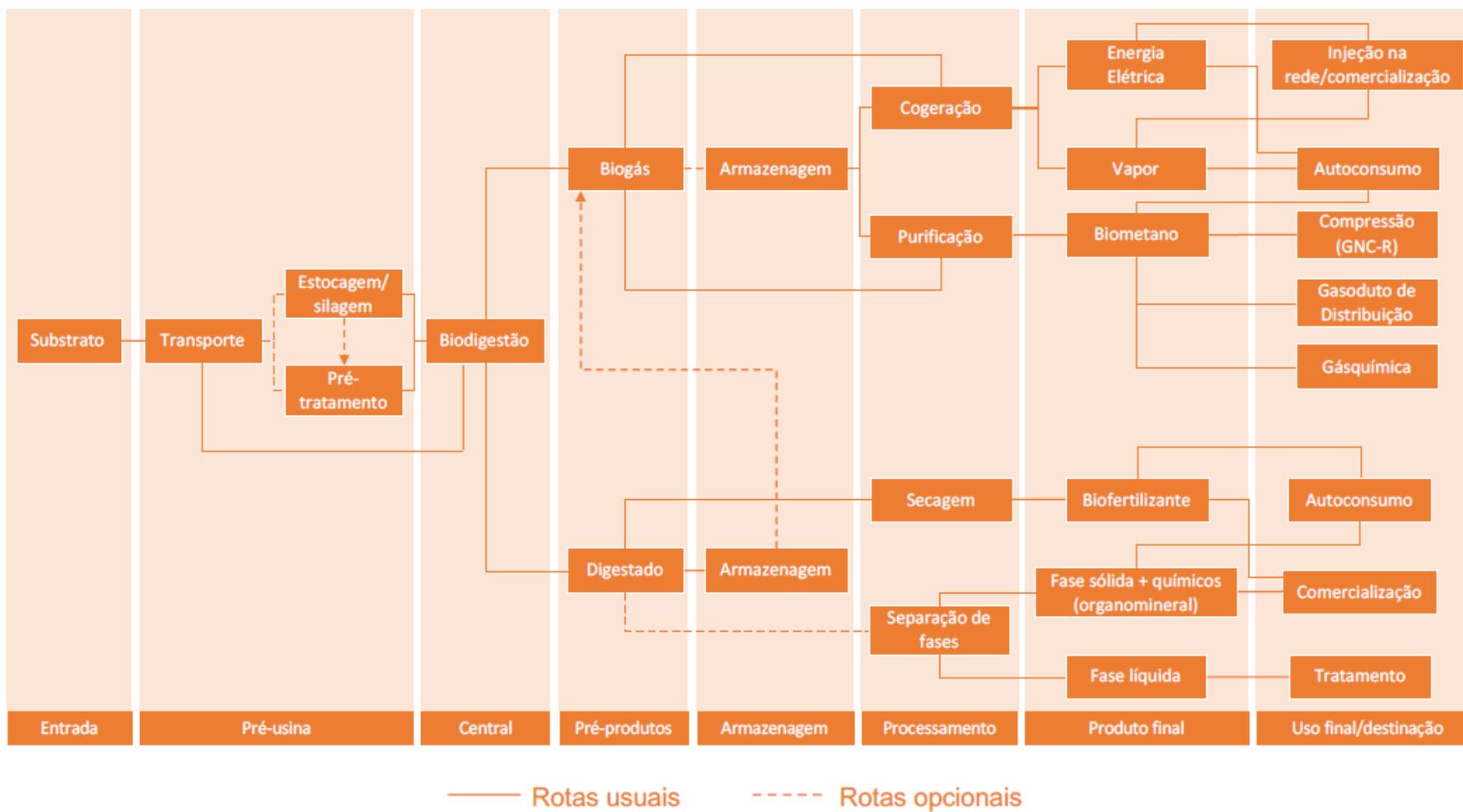
Segundo PALATSI (2011), poucas informações estão disponíveis sobre a quantificação, características e opções de tratamento de subprodutos animais e resíduos de matadouros. Na literatura a maior parte dos relatos são sobre os tratamentos anaeróbios das águas residuárias dos abatedouros. A Tabela 4 a seguir apresenta a produção de metano a partir da digestão anaeróbia de resíduos sólidos e subprodutos de abatedouros de bovino e suíno.

Tabela 4: Produção de metano a partir da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos e subprodutos de abatedouros de bovino e suíno

Resíduo utilizado	Produção de metano (ml CH₄ / g SV)	Referência
Bovinos	668 +/- 18	(PAGÉS-DÍAZ, et al., 2018)
Suínos	609 +/- 45	(PAGÉS-DÍAZ, et al., 2014)
Suínos	28,2 ± 0,2	(PALATSI, et al., 2011)
Suínos	230 - 620	(HEJNFELT, et al., 2009)
Suínos	220	(HEJNFELT, et al., 2009)

A Figura 8 apresenta um fluxograma da cadeia produtiva do biogás e seus diversos usos para a geração de energia elétrica, energia térmica e biometano, além do digestado que pode ser utilizado como biofertilizante.

Figura 8: Cadeia de produção de biogás e seus usos



Fonte: (D'AQUINO, 2018)

3.6. Ensaios de Determinação do Potencial Bioquímico do Metano - BMP

Ensaios de determinação do potencial bioquímico do metano (BMP) são métodos simples e confiáveis realizados com a finalidade de apontar informações acerca da biodegradabilidade e o rendimento de biogás de substratos orgânicos (VDI-4630, 2006). Segundo D'Aquino (2018), diversas metodologias podem ser aplicadas, como os sofisticados equipamentos AMPTS (Automatic Methane Process Test System) e o Biogas Batch Fermentation System (Ritter) ou, sistemas mais tradicionais como os eudiômetros. A Figura 9 apresenta os Sistema de determinação do potencial metanogênico via AMPTS, Biogas Batch System e Eudiômetro, respectivamente.

Figura 9: (a) Sistema de determinação do potencial metanogênico via AMPTS, (b) Biogas Batch System e (c) Eudiômetro.



Fonte: (a) Bioprocess Control

(b) Ritter Germany

(c) CIBiogas

O protocolo original para medição de BMP foi publicado há mais de 40 anos por OWEN et al. (1979). Desde então, variações do método foram descritas, com diferentes técnicas de medição do volume de biogás produzido e sua composição. Os autores pesquisados e apresentados na Tabela 5 discutem a aplicabilidade desses testes. Embora muitas diretrizes já tenham sido propostas para padronização dos testes de BMP, os resultados publicados na literatura demonstram que falhas críticas no projeto experimental ou execução são comuns e estão frequentemente relacionadas ao armazenamento (tempo e temperaturas) e diluição do inóculo, e razão inóculo-substrato (de 2,00 a 0,05). Modelos cinéticos comuns são usados para avaliar estas variáveis e a diluição excessiva e a razão inóculo-substrato extremamente baixa tiveram a maiores impactos em resultados.

Tabela 5: Artigos referente à padronização de metodologias para realização de teste BMP em bancada

Referência	Título
(HOLLIGER, et al., 2021)	Towards a standardization of biomethane potential tests: a commentary
(HULSEMANN, et al., 2020)	Biomethane Potential Test: Influence of Inoculum and the Digestion System.
(HAFNER, et al., 2020)	Improving Inter-Laboratory Reproducibility in Measurement of Biochemical Methane Potential (BMP)
(KOCH, et al., 2019)	Identification of Critical Problems in Biochemical Methane Potential (BMP) Tests From Methane Production Curves
(FILER, et al., 2019)	Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research
(PEARSE, et al., 2018)	Towards developing a representative biochemical methane potential (BMP) assay for landfilled municipal solid waste – A review
(VDI 4630, 2006)	Fermentation of Organic Materials–Characterisation of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests
(HOLLIGER, et al., 2016)	Towards a standardization of biomethane potential tests
(VALERO, et al., 2016)	Influence of headspace pressure on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests.
(WANG, 2016)	Factors that Influence the Biochemical Methane Potential (BMP) Test: Steps towards the Standardisation of BMP Test
(KAFLE, et al., 2014)	Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models
(WANG, et al., 2014)	Determination of methane yield of cellulose using different experimental setups
(STROMBERG, et al., 2014)	Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests
(FENG, et al., 2013)	Biochemical Methane Potential (BMP) of Vinegar Residue and the Influence of Feed to Inoculum Ratios on Biogas Production
(RAPOSO, et al., 2011)	Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using

data from an international interlaboratory study

(ANGELIDAKI, et al., 2009)	Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays
(OWEN, et al., 1979)	Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity

O teste de BMP não fornece apenas o potencial gerador de metano, mas também o quantifica ao longo do tempo, normalmente apresentado na forma de uma curva específica de produção de metano (SMP). O documento alemão VDI 4630 (2016) discute brevemente a forma típica das curvas SMP. Outros protocolos estão disponíveis, todos com o objetivo de alcançar uma alta reprodutibilidade do teste de BMP (ANGELIDAKI, et al., 2009) e (HOLLIGER, et al., 2016).

Esses protocolos apresentam a mesma estrutura básica: (I) desempenho avaliativo por meio de três repetições técnicas (triplicata), (II) aplicação da razão inóculo/substrato ou substrato/inóculo, (III) medição do rendimento de metano do inóculo puro como um branco, e (IV) utilização de amostra de controle através da medição do rendimento de metano de substratos padrão como a celulose microcristalina, por exemplo. Em cada um dos protocolos é apontado a importância de cada uma das etapas envolvidas (o inóculo, o sistema de digestão e a precisão de trabalho) de forma a obter uma alta reprodutibilidade dos ensaios.

Diversos ensaios em bancada são conduzidos para verificar a efetividade e precisão do BMP com diferentes sistemas de digestão, inóculos e protocolos. RAPOSO et. al. (2011), por exemplo, conduziram ensaios utilizando como controle positivo amido, celulose e gelatina como substratos. Os resultados mostraram um coeficiente de variação (CV) de cerca de 8% –11%. Uma série de trabalhos e autores também reportam diferenças no CV ao usar diferentes protocolos de medições de BMP mediante a presença ou ausência de solução tamponante de bicarbonato de sódio no sistema. Os resultados apresentaram um desvio de cerca de 20% entre ensaios realizados com e sem o bicarbonato de sódio (NaHCO₃).

Um dos principais critérios para considerar os resultados eficientes ou ineficientes foi a origem do inóculo. HULSEMANN et al (2020) relataram diferenças na composição da comunidade microbiana para diferentes inóculos de plantas de biogás de escala real e de reatores de laboratório e perceberam que inóculos de diferentes fontes podem afetar a produção de biogás. JONGE et al (2020) caracterizaram as comunidades microbianas de diferentes reatores em escala real e que processam proporções variáveis de resíduos de alimento sob diversas configurações operacionais e concluíram que essas comunidades microbianas foram moldadas pelos parâmetros operacionais

como tipo de substrato primário e temperatura operacional. LIM et al (2021) examinaram como o efeito da fonte do inóculo no início da digestão anaeróbia em reatores termofílicos e concluíram que a fonte do inóculo desempenha um papel fundamental para o start-up dos reatores.

Os parâmetros cinéticos obtidos a partir dos testes de BMP permitem uma avaliação qualitativa da cinética do processo. No entanto, os parâmetros cinéticos estimados na operação em lote não podem ser aplicados para a descrição detalhada de processos contínuos, porém auxiliam na tomada de decisões quanto à viabilidade da degradação anaeróbica do resíduo.

4. METODOLOGIA

Considerando o objetivo principal deste trabalho de demonstrar em escala laboratorial o potencial do uso dos subprodutos oriundos do processo de abate de bovinos na geração de energia a partir do biogás e reportar a possibilidade de seu uso *in situ*, serão estabelecidos neste capítulo os procedimentos de coleta e armazenamento dos materiais, tanto do inóculo quanto dos substratos a serem utilizados, e a metodologia empregada para caracterização e ensaio de potencial de biogás. No processo da metodologia, estarão envolvidas 6 etapas principais que se complementam. A Figura 10 apresenta o fluxograma da metodologia descrita abaixo:

1. Coleta de amostra e inóculo;
2. Preparo do substrato de acordo com as proporções reais do abatedouro;
3. Caracterização físico-química dos substratos e inóculo;
4. Delineamento experimental para definição dos parâmetros operacionais do sistema de batelada a ser utilizado, a quantidade do substrato e do inóculo;
5. Determinação do potencial energético teórico;
6. Análise de Potencial Bioquímico do Metano (BMP);

Figura 10: Fluxograma das etapas envolvidas no desenvolvimento deste trabalho

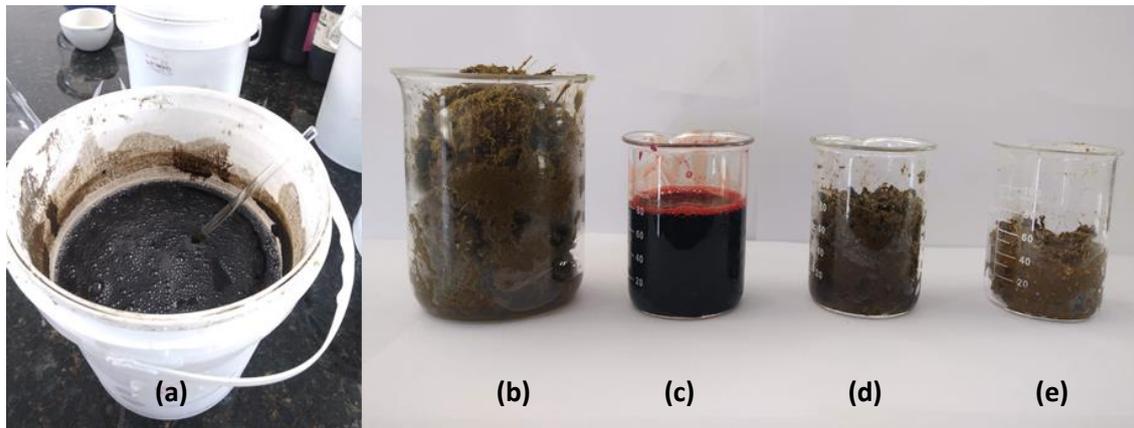


Fonte: Própria (2021)

4.1. Coleta de amostra e Substrato

O inóculo foi obtido de um reator anaeróbio da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp, localizada na cidade Várzea Paulista/ SP e que faz a o tratamento de esgoto da região. O transporte foi realizado em temperatura ambiente e, assim que chegou ao laboratório, o inóculo foi mantido sob refrigeração até o momento de montagem dos ensaios, a Figura 11 apresenta a aparência das amostras e do inóculo utilizados.

Figura 11: Aparência do inóculo e amostras



(a) Lodo (b) material do rúmen (c) sangue (d) material do intestino (e) dejetos bovinos.

Fonte: Própria (2021)

As amostras de sangue, conteúdo intestinal e conteúdo ruminal foram coletadas separadamente na linha de abate de animais do Frigorífico e abatedouro AFRISUL, localizado na cidade de Itabuna na Bahia. Após a coleta, os resíduos foram congelados para o transporte e mantidos a $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para determinar a quantidade gerada para cada um dos resíduos do abatedouro, foi feita a pesagem individualizada dos resíduos a partir de uma parcela dos animais abatidos em um dia conforme apresentado na Tabela 6, de acordo com o animal e o tipo de material.

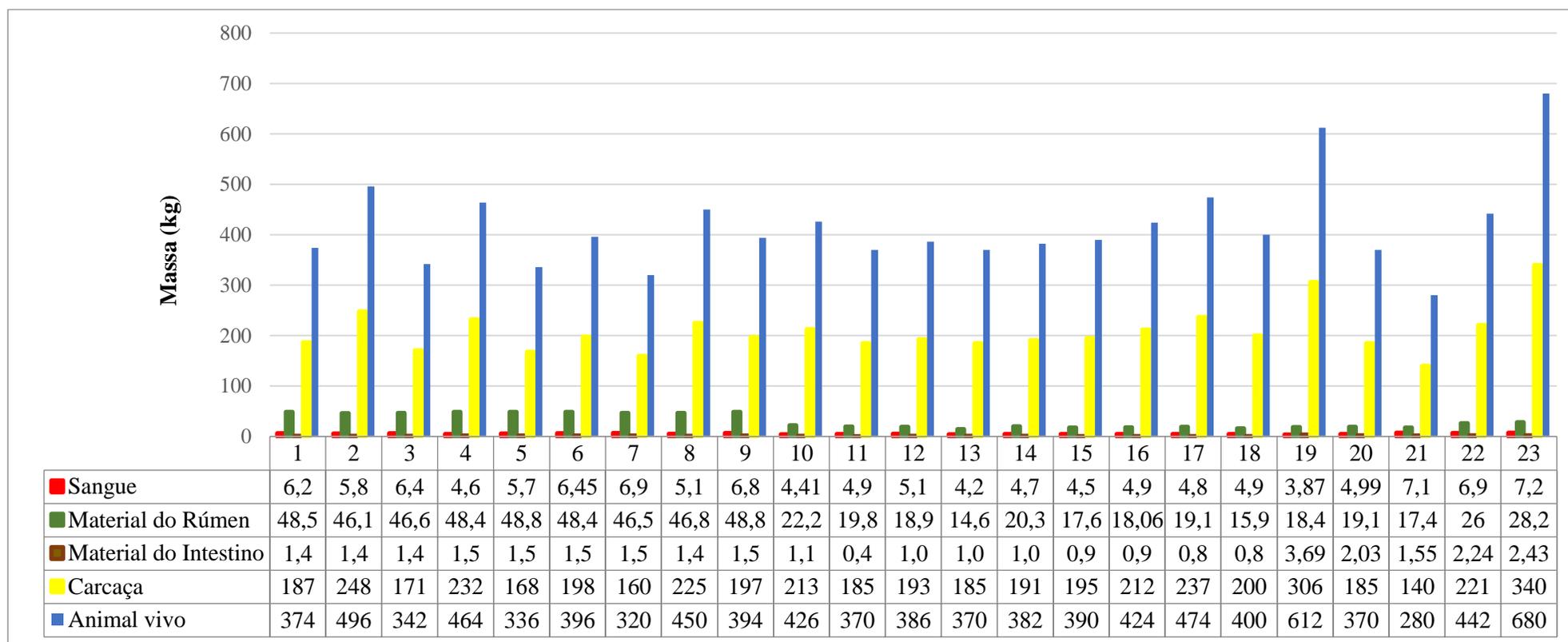
Tabela 6: Proporção dos resíduos (em Kg e % em relação a massa do animal), de acordo com o animal e o tipo de material

	Sangue		Material do Rúmen		Material do Intestino		Carcaça	Animal vivo
	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	kg
	6,2	1,66	48,5	13,0	1,4	0,4	187	374
	5,8	1,2	46,1	9,3	1,4	0,3	248	496
	6,4	1,9	46,6	13,6	1,4	0,4	171	342
Vaca	4,6	1,0	48,4	10,4	1,5	0,3	232	464
Novilha	5,7	1,7	48,8	14,5	1,5	0,4	168	336
	6,45	1,6	48,4	12,2	1,5	0,4	198	396
	6,9	2,2	46,5	14,5	1,5	0,5	160	360

	5,1	1,1	46,8	10,4	1,4	0,3	225	450
	6,8	1,7	48,8	12,4	1,5	0,4	197	394
	4,41	1,0	22,2	5,2	1,1	0,3	213	426
	4,9	1,3	19,8	5,4	0,4	0,1	185	370
	5,1	1,3	18,9	4,9	1,0	0,3	193	386
	4,2	1,1	14,6	4,0	1,0	0,3	185	370
	4,7	1,2	20,3	5,3	1,0	0,3	191	382
	4,5	1,2	17,6	4,5	0,9	0,2	195	390
	4,9	1,1	18,06	4,3	0,9	0,2	212	424
	4,8	1,0	19,1	4,0	0,8	0,2	237	474
	4,9	1,2	15,9	4,0	0,8	0,2	200	400
	3,87	0,63	18,4	3,01	3,69	0,6	306	612
	4,99	1,35	19,1	5,16	2,03	0,55	185	370
Boi	7,1	2,54	17,4	6,21	1,55	0,55	140	280
	6,9	1,56	26	5,88	2,24	0,51	221	442
	7,2	1,06	28,2	4,15	2,43	0,36	340	680
Média	5,5	1,4	30,6	7,7	1,4	0,3	208,2	
DV	1,0	0,4	14,3	4,0	0,7	0,1	44,4	

Com base nos dados da tabela 6, foram feitos os gráficos da massa por animal, para cada material e apresentada na figura 12.

Figura 12: Massa dos resíduos bovinos registrado no abatedouro



Fonte: Própria

4.2. Preparo do Substrato

Para a definição da quantidade de cada material a ser utilizada no ensaio, foram considerados os dados coletados pelo abatedouro, como tipo de animal abatido e massa dos resíduos estudados e ainda, o número de animais abatidos (dados do ano de 2020). A Tabela 7 apresenta os dados dos animais abatidos e a proporção por tipo de animal.

Tabela 7: Animais abatidos em 2020 e a proporção por tipo de animal

Ano 2020	Vaca/ Novilha	Boi	Total de Animais Abatidos
Janeiro	1408	644	2052
Fevereiro	1304	550	1854
Marco	1459	506	1965
Abril	1171	555	1726
Maiο	1263	658	1921
Junho	1355	992	2347
Julho	995	1296	2291
Agosto	1859	1125	1989
Setembro	998	977	1975
Outubro	950	930	1880
Novembro	793	932	1725
Dezembro	1184	858	2042
Média	57,78%	42,22%	

Sendo a proporção de vaca e novilho abatidos de 57,78% e a de bois de 42,22%, foi possível calcular a quantidade de sangue, conteúdo ruminal e conteúdo intestinal a ser utilizado na preparação da amostra matriz chamada de SBP (*Slaughterhouse's by-products*) e que representasse a proporção de um animal. Dessa forma, para a amostra matriz (SBP) foram adicionados 15,82% de resíduo de sangue, 79,31% de conteúdo ruminal e 4,87% de conteúdo intestinal conforme demonstrado na tabela 8.

Tabela 8: Proporção de cada resíduo utilizado no ensaio de BMP

	Animal Abatido (%)	Sangue (%)	Conteúdo Ruminal (%)	Conteúdo Intestinal (%)	Total
Vaca/ Novilha	57,78	1,23	7,32	0,28	8,83
Boi	42,22	1,35	5,16	0,55	7,06
Total	100	1,28	6,41	0,39	8,08
Proporção de resíduo a ser utilizado		15,82	79,31	4,87	

Para a preparação da amostra, o material coletado anteriormente foi mantido em geladeira até o seu total descongelamento. Posteriormente e, considerando a quantidade de material necessária para as análises físico-química e que seria utilizado nos ensaios de BMP químicas, foram pesadas 152,3 g de sangue, 13,5 g de conteúdo intestinal e 804 g conteúdo do rúmen. Esse material foi colocado no copo do liquidificador e adicionados de 500 ml de água destilada para que fosse possível a sua trituração utilizando um liquidificador doméstico. A aparência da amostra SBP pode ser observada na Figura 13.

Figura 13: Aparência da amostra matriz (SBP)



Fonte: Própria (2021)

Ainda, considerando que os animais, ao chegarem aos locais de abate, são deixados em currais de recepção onde permanecem em repouso e jejum pelo período de 16 até 24 horas para que possam se recuperar do “stress” causado pelo transporte e para diminuir o conteúdo estomacal e intestinal, foi considerada a realização de um lote de amostras utilizando dejetos de bovinos para fins de comparação e verificar se o uso dos dejetos pode implicar num aumento significativo da produtividade de biogás. A amostra contendo dejetos foi chamada de ABP Cattle (Animal’s by-products from Cattle).

4.3. Caracterização físico-química

A conversão eficiente de matéria orgânica em metano (CH_4) depende das interações mútuas e sintróficas entre os microrganismos anaeróbios e a estabilidade do processo de AD depende principalmente do delicado equilíbrio entre a produção e o consumo de produtos intermediários (WU, et al., 2021). Segundo Kumar et. al (2021), dentre os fatores que influenciam a DA, estão incluídos: a concentração de matéria-prima, origem do inóculo (microbiano), temperatura do processo, pH da solução, seleção de aditivos, etc, que podem regular a hidrólise, acidogênese e / ou metanogênese. Ainda, segundo AMON et. al (2007), a produção de biogás é influenciada pela composição química do substrato e sua biodegradabilidade. Dessa forma, foram realizadas as análises para caracterizar o substrato e o inóculo.

A Tabela 9 apresenta de forma resumida os métodos de ensaio utilizados para a caracterização das amostras. Os conteúdos de Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV) foram determinados de acordo com o método 2540G da APHA (American Public Health Association) e a análise foi realizada no laboratório de Bioenergia do IEE/ USP. As análises Elementares de Carbono, Nitrogênio, Enxofre e Oxigênio foram realizadas no Laboratório da Central Analítica – IQ USP. Para o Carbono, Nitrogênio e Oxigênio foi utilizado o equipamento Analisador elementar - Perkin Elmer 2400 series II e para o Enxofre, foi realizada a digestão da amostra de acordo com a metodologia de Schöniger e o equipamento utilizado para a análise foi o Espectrômetro Ótico de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES, Radial) da marca Spectro. A análise de DQO foi realizada pelo Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental/ PHA – Engenharia Civil, EP/USP utilizando a metodologia 5220D da APHA.

Tabela 9: Método de ensaio para caracterização das amostras

Parâmetro	Metodologia
ST e SV	APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Method 2540G)
DQO Solúvel	APHA, Standard Methods for the examination of water and wastewater (Method 5220D)
C, N, O	Equipamento Perkin Elmer, modelo 2400
S	Espectrômetro Ótico de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado

Os resultados encontrados nos ensaios de caracterização das amostras e inóculo, podem ser observadas na tabela 10.

Tabela 10: Características físico-químicas dos substratos e inóculo

	SBP	ABP	Inóculo
ST	13,50%	17%	2,80%
SV	12,02%	18%	1,60%
SV/ST	0,89	0,94	0,57
Carbono	45,80% ST	41,39% ST	x
Hidrogênio	5,97% ST	5,53% ST	x
Nitrogênio	4,17% ST	2,25% ST	x
Enxofre	0,40% ST	0,45% ST	x
Oxigênio	43,68% ST	50,38% ST	x
C/N	11	18	x
DQO	46400 (mg O ₂ /litro)	84600 (mg O ₂ /litro)	x

4.4. Delineamento experimental

Para o delineamento experimental deste trabalho foram pesquisados artigos científicos que abordassem a digestão anaeróbia de resíduos de abatedouro, principalmente contendo conteúdo ruminal, o conteúdo intestinal e o sangue. Verificou-se que esses de resíduos apresentam grandes desafios para a biodigestão e, a codigestão com outros resíduos como dejetos dos animais, são largamente utilizados. Segundo PAGÉS-DIAZ et al (2014), a codigestão de resíduos de matadouro com outros resíduos das atividades agroindustriais tem sido proposta como uma solução para problemas. WANG et al (2018) utilizou no seu estudo

dados de publicações anteriores e não realizaram os ensaios de BMP, porém os dados foram mantidos para fins de comparação. A Tabela 11 compara a recuperação de gás metano de diversos autores estudados a fim de determinar as melhores práticas a serem utilizadas nesse ensaio de bancada.

Tabela 11: Metodologias pesquisadas

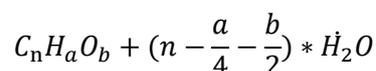
Referência	Resíduos utilizados	SV (%)	Produção de metano (NmLCH ₄ / gVS)
(PAGÉS-DÍAZ, et al., 2018)	resíduos sólidos de abatedouros de bovinos	24,7	668 ± 18
(PAGÉS-DÍAZ, et al., 2018)	resíduos sólidos de abatedouros de bovinos + dejetos	20,8	570 ± 7
(CIRNE, et al., 2007)	mistura de carboidratos, proteínas, celulose e lipídios	28	572 ± 89
(PAGÉS-DÍAZ, et al., 2014)	resíduos sólidos de abatedouros de bovinos	24,7	609 ± 48
(WARE, 2016)	pança, resíduos intestinais, gordura e aparas de carne e algum sangue	20,6	228,8 ± 6,8
(WANG, et al., 2018)	Dejetos	7,8	390
(WANG, et al., 2018)	Sangue	18,5	480
(WANG, et al., 2018)	Vísceras	45,4	750

4.5. Determinação do Potencial Teórico

O potencial teórico representa o limite máximo de energia disponível fisicamente a partir de um recurso energético de uma determinada área e período. Não são consideradas as perdas de energia e restrições que possam existir na conversão e uso da energia (MARIANI, 2018). Ou seja, compreende toda a energia que teoricamente deveria ser gerada dentro de um período de um espaço definido (DEUBLEIN, et al., 2008).

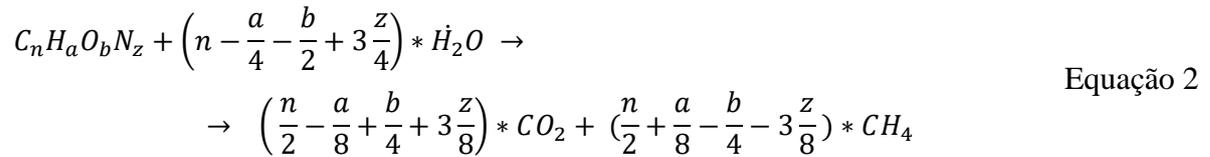
Por meio da análise elementar é possível realizar a previsão do potencial máximo de metano para o substrato a ser estudado a partir da aplicação dos valores estequiométricos em algumas fórmulas conhecidas.

BUSWELL E MUELLER (1952)

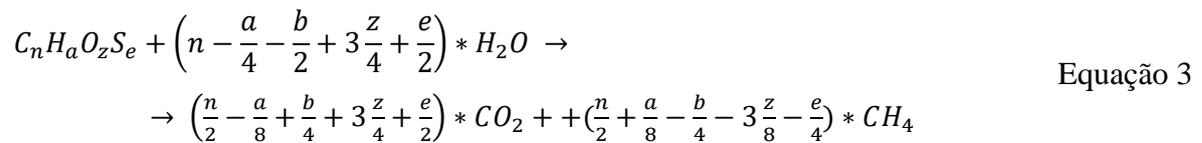


Equação 1

O'ROURKE (1968)



BOYLE (1976)



SOBOTKA (1983)

$$\%CH_4 = \frac{\left(4 + \frac{a}{n} - \frac{2b}{n} - \frac{3z}{n}\right)}{8} * 100$$

Equação 4

PELLERA AND GIDARAKOS (2016)

$$Potencial_{teórico} \text{ ml } CH_4 (gSV)^{-1} == 22,4 \frac{\frac{c}{2} + \frac{h}{8} - \frac{o}{4} - 3\frac{n}{8} - \frac{s}{4}}{12c + h + 16o + 14n + 32s} * 1000$$

Equação 5

Os parâmetros da fórmula são baseados no número de mols (N) de cada elemento conforme a Equação 6 e que são obtidos pela relação entre massa molecular (MM) e massa (m) dos resultados obtidos pela análise elementar e que são calculados a partir da normalização do nitrogênio - ou seja, o N específico de cada elemento é dividido pelo N do nitrogênio - resultando, portanto, sempre no índice z igual a 1. A reação bioquímica é automaticamente balanceada e pode ser aplicada a qualquer entrada com relações relativas conhecidas de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. O modelo assume que esses elementos são os únicos componentes do substrato (ACHINAS, et al., 2016). Os valores dos parâmetros podem ser observados na tabela 12.

$$N = \frac{M}{MM}$$

Equação 6

Onde:

N = Número de mols

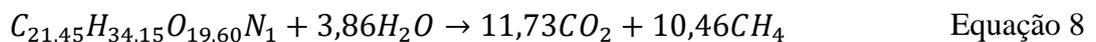
M = Massa obtida através do ensaio de análise elementar

MM = Massa molecular

Tabela 12: Parâmetros da fórmula

SBP					
	C	H	O	N	S
Análise elementar (M, %)	45,8	5,97	43,68	4,17	0,40
MM	12,011	1,008	15,999	14,007	32,065
N	3,81	5,92	2,73	0,298	0,01
parâmetro	n	a	b	z	e
Valor	12,81	19,89	9,17	1*	0,04
ABP					
	C	H	O	N	S
Análise elementar (M, %)	41,39	5,53	50,38	2,25	0,45
MM	12,011	1,008	15,999	14,007	32,065
N	3,45	5,49	3,15	0,161	0,01
parâmetro	n	a	b	z	e
Valor	21,45	34,15	19,60	1	0,09

A composição elementar do substrato (C, H, O e N) determinada a partir da análise elementar foi usada para determinar a relação estequiométrica da reação de degradação usando a equação de O'ROURKE (1968). Substituindo-se os parâmetros n, a, b e z na fórmula, a reação poderá ser expressa pelas relações estequiométricas representadas pela Equação 7 e Equação 8, para o substrato SPB e ABP, respectivamente:



Os resultados obtidos a partir da análise elementar representam a fração de sólidos totais (ST) presentes no substrato então, pode-se dizer que 1 mol de ST da amostra SBP adicionado à água pode produzir até 6,22 mols de metano e para 1 mol de ST da amostra ABP adicionada à água, pode produzir até 10,46 mols de metano. Considerando-se as massas molares dos elementos C, H, O, N e CH₄, podemos dizer que para o SBP, 336gST produzem até 99,5gCH₄ e para o ABP, 622,5 gST produzem até 168,4 gCH₄. Sendo a massa específica do metano igual a 0,717 g/l, pode-se dizer que a produção metanogênica é de 414,6 m³/tonST para o SBP e 379 m³/tonST para o ABP. Convertendo em termos de Sólidos Voláteis, o potencial teórico é 368,9m³/tonSV para o SBP e 356,3m³/tonSV para o ABP.

Adicionalmente, se substituirmos os parâmetros a, b, z e n na fórmula proposta por SOBOTKA (1983), o resultado será expresso em porcentagem máxima de metano contida no biogás, ou seja, para o substrato SBP, a taxa máxima de produção de metano é 48,58% e para o ABP a taxa máxima de produção de metano é 33,9%.

4.6. Análise do Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

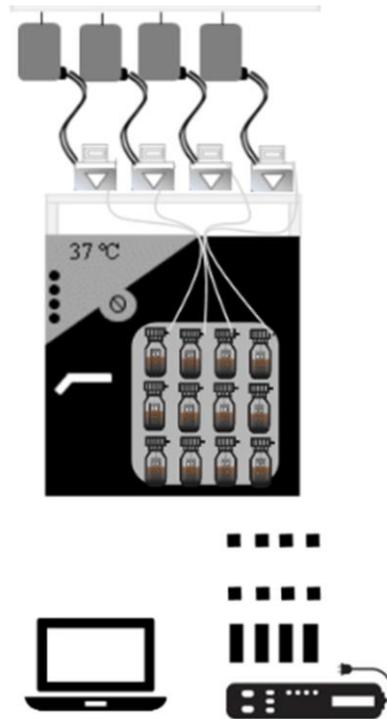
O ensaio para a determinação do potencial metanogênico dos resíduos foi conduzido no laboratório de desenvolvimento de biocombustíveis do IEE/ USP. O laboratório foi criado no ano de 2015 e possui alguns equipamentos para serem utilizados no âmbito da pesquisa em biogás. Entre eles, podemos destacar os seguintes: um Analisador de potencial de biogás (Biogas Batch Fermentation System), um reator CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) e um reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), todos de bancada para fins demonstrativos.

Para essa pesquisa foi realizado o ensaio utilizando Analisador de Potencial de Biogás (Biogas Batch Fermentation System), produzido pela empresa alemã Ritter, para avaliar o potencial metanogênico dos resíduos sólidos gerados no abatedouro. O equipamento é constituído por uma incubadora com temperatura controlada na faixa de 10°C a 100°C e sistema de circulação do ar interno, frascos reacionais (biofermentadores) que são compostos por um frasco de vidro de 1 litro de volume com uma saída para o biogás e uma tampa onde está localizada a pá agitadora com um motor acoplado, que é o responsável pela agitação do meio.

Os frascos com o substrato e inóculo, são introduzidos na incubadora e conectados na saída a uma mangueira de PVC flexível. Essas mangueiras por sua vez, são conectadas aos medidores de vazão chamados de *MilliGascounter* pela outra ponta. Em cada medidor de vazão

de gás há duas saídas de mangueiras PVC, uma se conecta com o biofermentador e a outra ao saco de armazenamento de gás, chamado de *Multi-layer Bags* e produzido pela empresa estadunidense Restek. O Esquema do sistema analisador de potencial de biogás pode ser observado na Figura 14.

Figura 14: Esquema do sistema analisador de potencial de biogás



Fonte: (PEREIRA, et al., 2019)

O *MilliGascounter* é o dispositivo da fabricante Ritter que mede a vazão de biogás produzida no ensaio. É um medidor de fluxo de gás com precisão de 3%, vazão mínima de leitura de 1 ml/h e máxima de 1 l/h. O volume, que é observado no software já está normalizado de acordo com a Equação 9 descrita a seguir.

$$V_N = V_i * \frac{P_a - P_V + P_L}{P_N} * \frac{T_N}{T_a} \quad \text{Equação 9}$$

Onde,

V_N = volume do gás seco no estado normal, em LN

V_i = volume de gás produzido observado no dispositivo, em L

P_a = pressão da fase gasosa no momento da leitura, mbar

P_v = pressão parcial de vapor da água, mbar

P_L = Pressão da coluna de líquido acima do recipiente de medição, 1 mbar

P_N = pressão normal, $p_0 = 1013$ mbar

T_N = temperatura normal, $T_0 = 273,15$ K

T_a = temperatura do gás no interior do reator, em K

Os dados são registrados através do software Rigamo. A figura 15 apresenta os componentes do sistema analisador de potencial de biogás montado com os frascos reacionais, detalhe do medidor de vazão de biogás e a aparência do software Rigamo.

Figura 15: Componentes do analisador de biogás, medidor de vazão e aparência do software



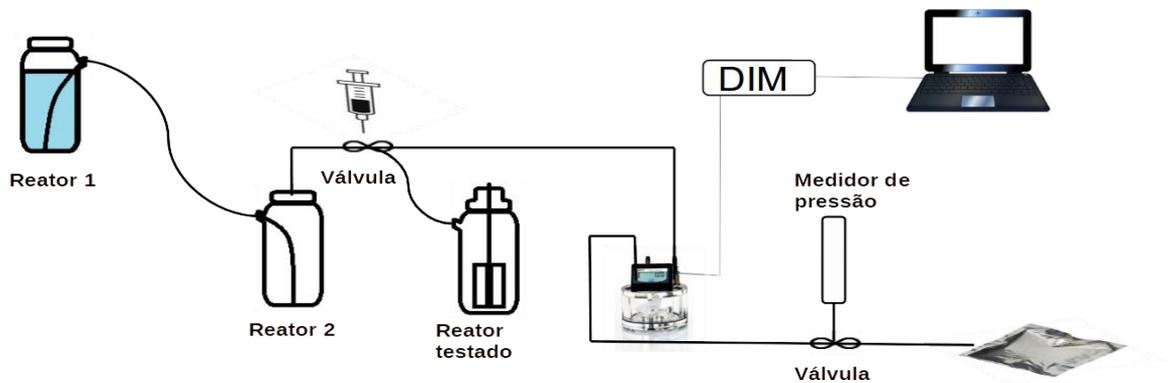
Fonte: (a) Própria (2021)

(b) Ritter Germany (2016)

(c) Ritter Germany (2017)

Em ensaios realizados preliminarmente, foram observados vazamento do biogás produzido, e/ou entrada de ar no sistema. Por conta desses problemas anteriores e com a finalidade de garantir que o sistema de fermentação em batelada esteja hermético e que o ambiente permaneça anaeróbico, além de assegurar que não haja vazamentos e evitar perda de biogás, foi desenvolvido no laboratório de biocombustíveis do IEE um procedimento para realização dos testes de estanqueidade do Sistema de Fermentação em Batelada (anexo I). Esse protocolo consistiu em um teste realizado nos conjuntos a serem utilizados no ensaio através de um sistema de deslocamento de líquido e acoplado a um medidor de pressão que utiliza o software Arduino. Os conjuntos são compostos pelo frasco reator, o misturador, as mangueiras, a *bag* e o medidor de vazão (*MilliGascounter*). O esquema para a realização do teste de estanqueidade do sistema de fermentação em batelada pode ser observado na Figura 16.

Figura 16: Esquema para a realização do teste de estanqueidade do sistema de fermentação em batelada

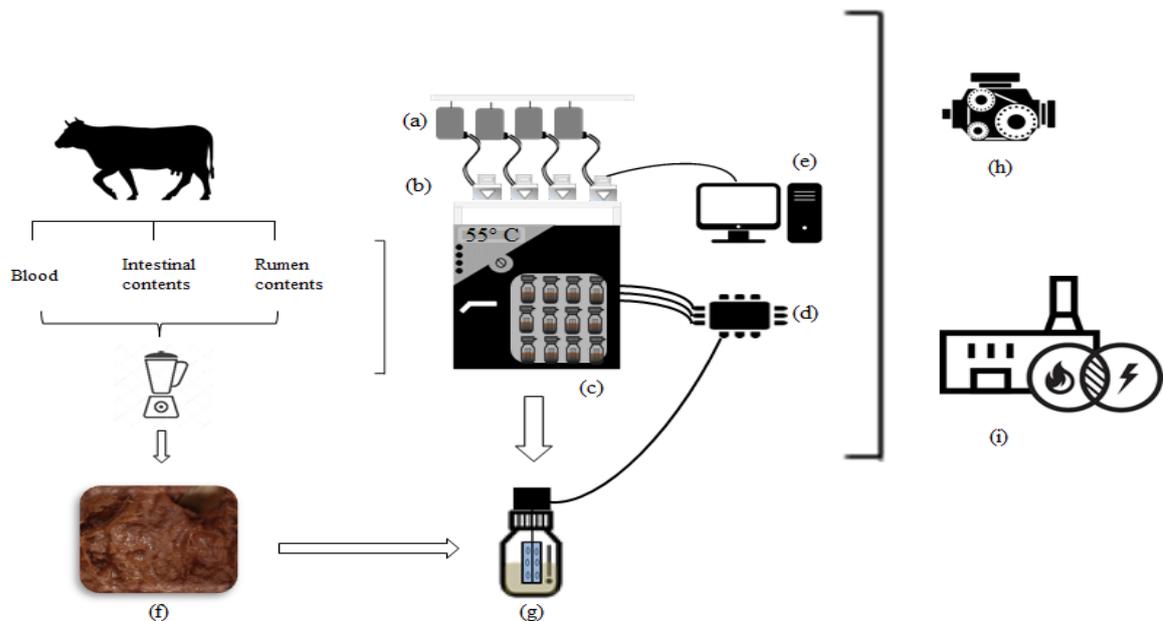


Fonte: Laboratório de biocombustíveis do IEE (2021)

Dessa maneira, foi realizado o teste nos conjuntos a serem utilizados no ensaio e no Anexo II é possível verificar os gráficos da leitura da pressão realizada por meio do software Arduino ao longo do tempo do teste.

Por fim, para a montagem do ensaio de BMP, foram utilizados os 12 conjuntos testados e a Figura 17 apresenta as etapas envolvidas no ensaio.

Figura 17: Fluxograma do ensaio e usos do biogás gerado a partir de resíduos de abatedouro



(a) Gas storage bag; (b) Ritter Milligascounters; (c) Incubator at 55 °C; (d) DIM; (e) Datas recording in the computer; (f) Substrate with intestinal contents (4,30%), rumen contents (80,42%) and blood (15,28%); (g) biofermentation bottle; (h) Otto motor; (i) Heat and power generation.

Fonte: Própria (2021)

Os testes foram conduzidos seguindo o protocolo proposto por ANGELIDAKI et al (2009), ou seja, foram realizadas triplicatas das amostras SBP, ABP, Branco e Controle positivo. Sendo o Branco uma mistura de água destilada e lodo e o controle positivo uma mistura de celulose microcristalina, água destilada e lodo. O substrato matriz foi preparado previamente conforme exposto no capítulo 4.2. A quantidade de substrato utilizada em cada reator foi determinada considerando-se a massa de sólidos voláteis dos resíduos e do inóculo e para o ABP, utilizou-se uma proporção menor da amostra matriz, a fim de manter o volume final igual para todos os reatores. Na tabela 13 estão representadas as quantidades de cada material nos reatores de acordo com a Norma VDI 4630 e a proporção entre os Sólidos Voláteis do substrato e os Sólidos Voláteis do inóculo utilizada em cada reator foi de 0,5. A temperatura foi mesofílica de 35° C.

Tabela 13: Montagem dos reatores cada reator

	Lodo (g)	Matriz (g)	Dejetos(g)	Celulose microcristalina (g)	Água (g)
Branco	625	0	0	0	42
Controle	625	0	0	5	37
SBP	625	41,7	0	0	0
ABP	625	37,5	4,2	0	0

O ensaio permaneceu ligado pelo período de 28 dias e foi desligado quando se observou que a vazão de biogás estava praticamente nula (próximo de zero).

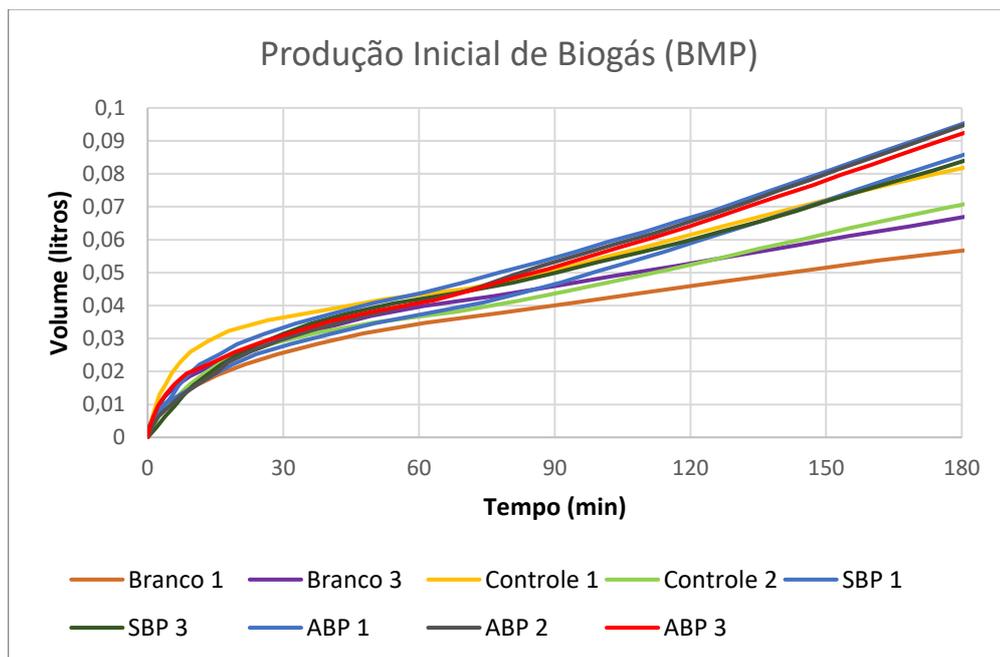
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos durante o ensaio de BMP e discutida a sua aplicação no estudo de caso do frigorífico.

5.1. Resultados do ensaio BMP

Após finalizado o ensaio, os dados de produção bruta de biogás foram extraídos do software Rigamo e foram feitos os gráficos do comportamento dos reatores com a produção acumulada de biogás durante o tempo do ensaio. A figura 18 apresenta a produção acumulada por todos os reatores nas primeiras 3 horas do ensaio.

Figura 18: Produção acumulada no ensaio de BMP

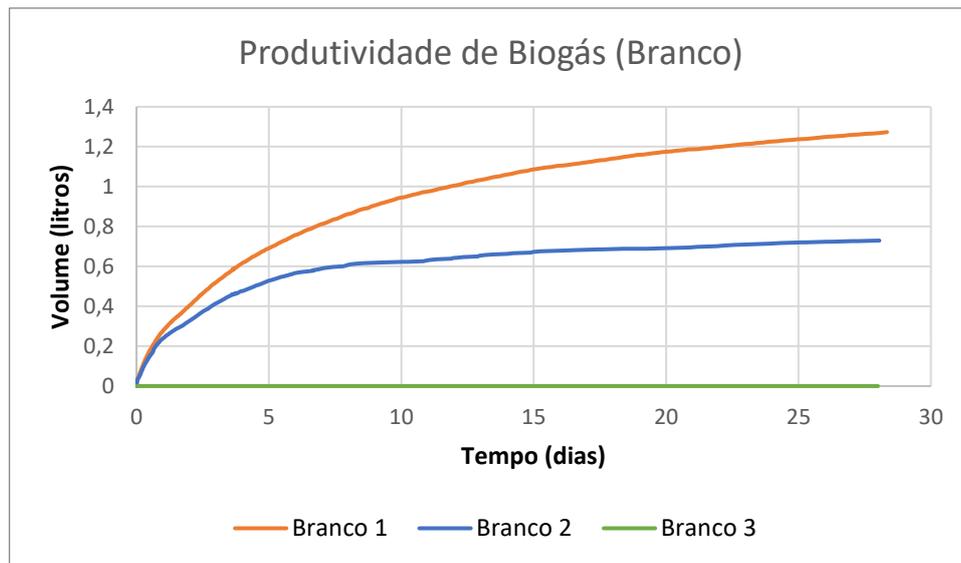


Fonte: Própria (2021)

Conforme visto no detalhe, a maioria das amostras já estabeleceu produção tão logo o ensaio foi iniciado e as curvas praticamente se sobrepõem no decorrer da primeira hora. Apenas a amostra SBP 2 não produziu imediatamente após ligado o ensaio e não está demonstrada na figura 18 já que sua produção se iniciou após 6 horas e as amostras Branco 2 e Controle 3 que não apresentaram curva de produção ao longo do ensaio. Esse perfil com a sobreposição inicial das curvas representa a atividade endógena do lodo.

Segundo PELLERA e GIRADAKIS (2016), normalmente o perfil da produção de metano é caracterizado por uma fase inicial de latência, uma fase subsequente de aumento mais rápido e, finalmente, uma fase de estabilização, algo que pode ser observado no teste de BMP conduzido em bancada. Ao longo de todo o ensaio, foi percebido semelhança no perfil das curvas de produção que podem ser observadas separadamente nas figuras 19, 20, 21 e 22 respectivamente. Vale salientar que de acordo com o fabricante o volume de gás registrado pelo Software já está normalizado.

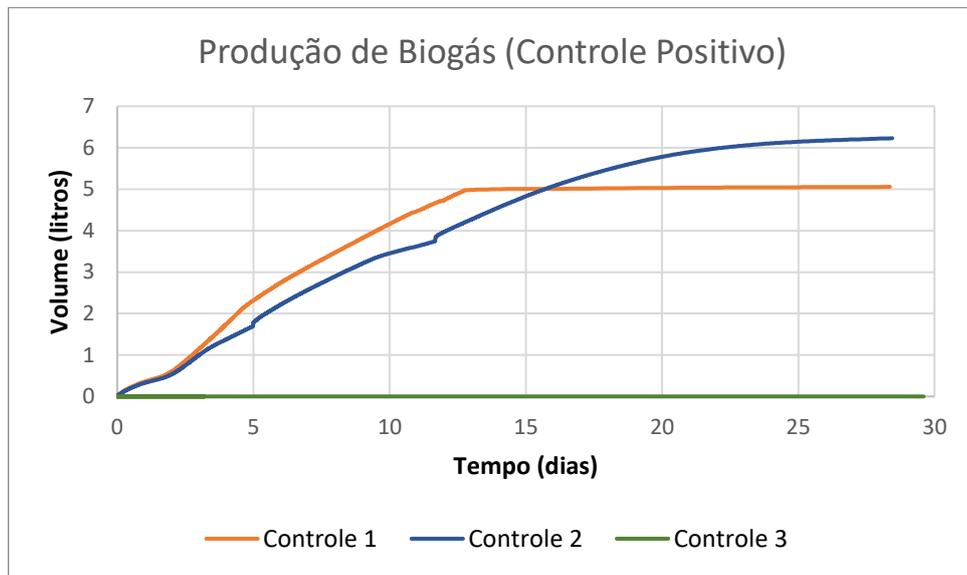
Figura 19: Produção acumulada do Branco ao longo do tempo



Fonte: Própria (2021)

Como pode ser observado na figura 19, o reator 2 com a amostra Branco 2, não produziu biogás. Tal situação pode ter acontecido por problemas na vedação do conjunto em alguma parte anterior ao medidor de biogás, dessa forma o dado foi mantido no presente trabalho apenas para fins de demonstração, porém foi descartado nos cálculos que seguem. A produção dos reatores 1 e 3 da amostra Branco começou logo que o iniciado o ensaio e apresentaram o comportamento bastante parecido nos dois primeiros dias, mas a partir do 3º dia a produção de biogás do Branco 3 aumentou de ritmo, finalizando o ensaio com a produção de 1,2760 L_N enquanto a amostra Branco 1 produziu 0,7295 L_N . Isso pode ter ocorrido por problemas na homogeneização das amostras, que pode ter causado a desigualdade na produtividade registrada.

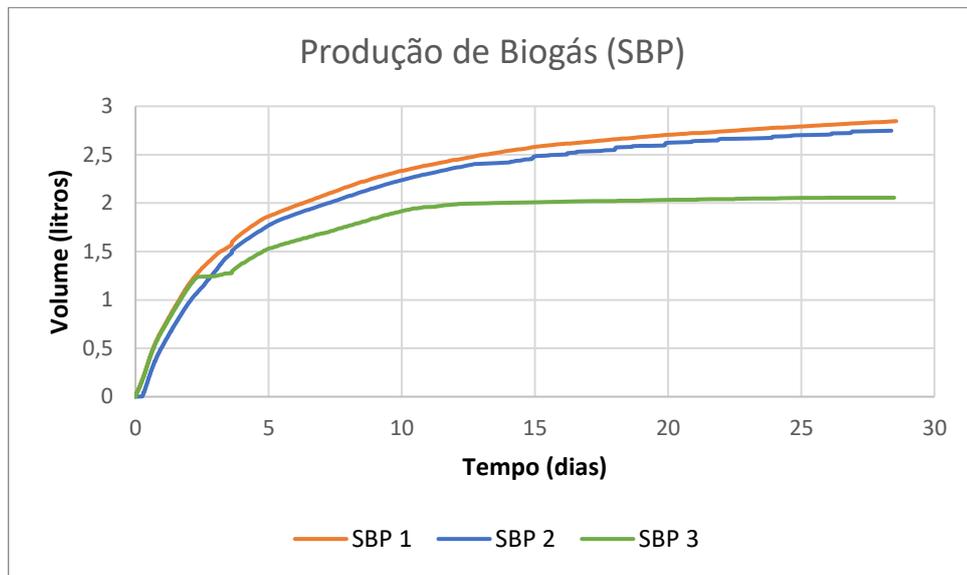
Figura 20: Produção acumulada do Controle ao longo do tempo



Fonte: Própria (2021)

Em relação a produção de biogás da amostra controle positivo, o Controle 3 não apresentou produção de biogás. Certamente aconteceu problema na vedação do frasco reator e houve oxigenação do sistema, algo que ficou perceptível na aparência da amostra que inclusive apresentou crescimento de fungos. Os reatores Controle 1 e Controle 2 apresentaram a curva de produção similar durante o início do ensaio, porém após o 12º dia o Controle 1 parou de produzir, estabilizando a sua produção com o volume de 5,0L_N enquanto a amostra Controle 2 continuou produzindo até totalizar 6,2L_N. Pelo perfil da curva de produtividade da amostra Controle 2, aparentemente ocorreu alguma perturbação no sistema que fez com que a produção fosse interrompida. Outra hipótese é ter acontecido algum vazamento anterior ao medido por causa do aumento da pressão, mas como houve produção de biogás no início do ensaio, a amostra foi considerada para demonstrar a atividade metanogênica do lodo e atestar sua a qualidade.

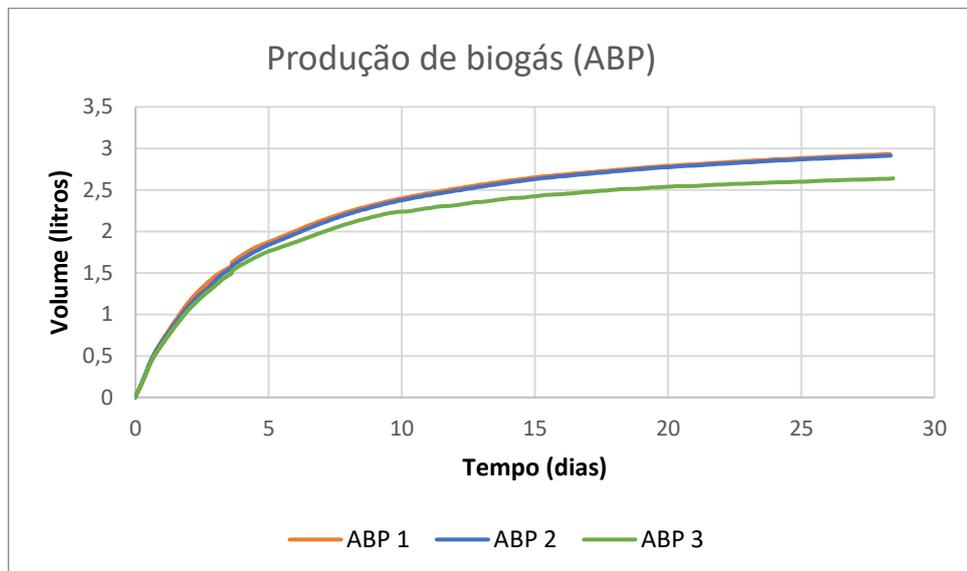
Figura 21: Produção acumulada da amostra SBP ao longo do tempo



Fonte: Própria (2021)

A partir da curva de produção de biogás das amostras SBP1, SBP2 e SBP3 ao longo o ensaio, se percebeu que a produção entre os reatores foi análoga, com sobreposição das curvas. Isso demonstrou a repetibilidade e reprodutibilidade entre os reatores.

Figura 22: Produção acumulada da amostra ABP ao longo do tempo.



Fonte: Própria (2021)

Equivalente ao observado na amostra SBP, a produção de biogás das amostras ABP1, 2 e 3, também apresentaram sobreposição de suas curvas demonstrando a repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio.

Os dados que foram registrados no Software Rigamo de produtividade acumulada de biogás ao longo do período do ensaio, podem ser encontrados na Tabela 14, sendo os valores apresentados para as amostras Controle, SBP e ABP já descontados a produção endógena do lodo (amostra Branco).

Tabela 14: Produtividade acumulada de biogás registrada pelo software Rigamo

	V _N de biogás acumulado (l _N)	Média (l _N)	Desvio padrão (l _N)	Produção média V _N (l _N)
Branco 1	0,7295			
Branco 2	0	1,0028	0,3864	0
Branco 3	1,2760			
Controle 1	5,0820			
Controle 2	6,2292	5,6556	0,8112	4,6529
Controle 3	0			
SBP 1	2,8466			
SBP 2	2,7478	2,7478	0,4309	1,7451
SBP 3	2,0558			
ABP 1	2,9323			
ABP 2	2,9130	2,913	0,1646	1,9103
ABP 3	2,6381			

A Tabela 15 demonstra a produção média de biogás por amostra em relação à matéria seca e sólidos voláteis, para fins de comparação com a literatura e cálculo de potencial total.

Tabela 15: Produção média de biogás por amostra

	Produção média de biogás acumulada (l _N)	Biogás por sólidos totais (l _N /gST)	Biogás por sólidos voláteis (l _N /gSV)	Biogás por matéria seca (Nm ³ /tonMS)
SBP	1,74505	0,3099	0,3490	349,9467
ABP	1,91025	0,3271	0,3820	327,0890

Para o aproveitamento energético do biogás, a quantidade de gás metano contido na mistura é de suma importância. A presença de outros componentes como água, dióxido de carbono e outros gases dificulta o processo de queima, o tornando menos eficiente. O gás sulfídrico (H₂S), que é formado durante a digestão anaeróbia a partir de compostos de enxofre presentes no substrato, é uma substância indesejada por sua alta toxicidade além de danificar

os componentes metálicos do sistema, precisando ser removido em praticamente todos os usos energéticos

Para verificar a composição do biogás produzido pelo ensaio de fermentação em batelada, foi utilizado equipamento analisador de gases Landtec, modelo GEM 5000. O equipamento fornece informações como teor de gás metano (0-100%), dióxido de carbono (0-100%), oxigênio (0-25%), monóxido de carbono (0-2000ppm) e sulfeto de hidrogênio (0-500ppm).

Mesmo tendo sido realizado o comissionamento dos conjuntos a serem utilizados no ensaio, as amostras Branco 1 e SBP 1 não armazenaram o biogás na bag e ainda, conforme exposto anteriormente, o Branco 2 e Controle 3 não apresentaram produção de biogás e por esse motivo não foi possível realizar a medição da composição. As demais composições do biogás podem ser observadas na tabela 16:

Tabela 16: Composição do biogás

	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂(%)	CO (ppm)	H₂S (ppm)	Outros (%)
Branco 1	x	x	x	x	x	x
Branco 2	x	x	x	x	x	x
Branco 3	26,6	6,2	10,3	11	2	57
Controle 1	48,3	38,8	2,9	3	0	9,9
Controle 2	53	39,9	1,8	1	0	5,2
Controle 3	x	x	x	x	x	x
SBP 1	x	x	x	x	x	x
SBP 2	68,4	18,6	3,3	8	0	9,3
SBP 3	67,2	17,8	3,6	8	1	11,5
ABP 1	58,6	14,1	6,3	6	1	21,4
ABP 2	60,4	14,2	5,7	4	0	19,6
ABP 3	64,3	20,9	3,4	3	0	11,5

Baseado na média da composição do biogás, foi possível calcular o volume de gás metano e de dióxido de carbono para as amostras SBP e ABP. Em comparação com o potencial de metano calculado anteriormente a partir da fórmula proposta por Sobotka (1983), que foi de 48,58% de metano para a amostra SBP e 33,9% de metano para a amostra ABP, notou-se valores bem acima do teórico para ambas as amostras sendo para o SBP 40% maior e para o ABP até 80% maior e o percentual de metano na amostra ABP se mostrou ainda ligeiramente menor que da amostra SBP, como pode-se observar na Tabela 17 a seguir.

Tabela 17: Volume médio de gás metano e dióxido de carbono por amostra

	Produção média (l)	% CH ₄	VCH ₄ (l)	% CO ₂	V CO ₂ (l)
SBP	1,7450	67,8	1,1831	18,2	0,32
ABP	1,9102	61,1	1,1672	14,2	0,27

Conforme exposto anteriormente, foram adicionados 5g SV do substrato para cada um dos reatores, e dessa forma foi possível determinar o volume de gás metano em mililitros produzido por grama de SV para cada um dos substratos avaliados. O resultado da produtividade e o potencial teórico calculado anteriormente estão apresentados na tabela 18.

Tabela 18: Produtividade de gás metano por grama de sólidos voláteis comparado ao potencial teórico

	Potencial Técnico (NmLCH ₄ /gSV)	Potencial Teórico (mlCH ₄ /gSV)	Diferença
SBP	236,63	368,8	132,17
ABP	233,43	356,3	122,87

Conforme o esperado, em comparação ao potencial teórico calculado a partir da composição elementar, os resultados práticos apresentados ficaram abaixo do calculado sendo que a produtividade para o SBP ficou 35,8 % menor e para o ABP 34,5 % menor.

A produtividade de gás metano para as amostras SBP e ABP ficaram semelhantes entre si, porém ainda abaixo dos valores encontrados na literatura. A tabela 12 apresentada anteriormente traz informações de ensaios que foram realizados por outros autores e os resultados da produção metanogênica.

PAGÉS-DIAZ et al (2018) encontraram o valor de 668 ± 18 NmLCH₄ / gVS em seu ensaio utilizando resíduos sólidos de abatedouros de bovinos em temperatura termofílica de 55°C. No estudo o autor realizou a pesquisa com misturas de resíduos sólidos de abatedouro bovino e suas misturas com esterco animal, diversas culturas e as frações orgânicas dos resíduos sólidos urbanos (RSU) mas, para fins de comparação, foi utilizado apenas o resultado encontrado para a amostra contendo 100% de resíduos sólidos de abatedouros de bovinos. Outra diferença observada foi que o inóculo foi filtrado, peneirado e armazenado para estabilização a $(55 \pm 1)^\circ$ C durante três dias, antes do início dos ensaios. A diferença entre a produtividade de

biogás pode ter ocorrido por causa da temperatura utilizada, o tempo de ensaio e a aclimação da prévia do lodo.

LUSTE, LUOSTARINE e SILLANPAA (2009) realizaram testes em lote à 35°C com mistura de resíduos do trato digestório de bovinos e suínos e encontraram rendimento de metano de 400 ml/gSV. BAYR et al (2012) encontrou o rendimento de metano de 572 ml/ gSV em testes com alimentação semi-contínua com amostras sólidas de abatedouros de bovino.

Resultados semelhantes ao encontrado neste estudo foram apresentados por WARE et al (2016). A produção de metano obtida foi de $228,8 \pm 6,8$ NmLCH₄ / gVS, utilizando resíduos sólidos dos matadouros que foram recolhidos das instalações de abate de bovinos, suínos e frangos, principalmente as vísceras e, os resíduos foram submetidos ao processo de pasteurização de acordo com a legislação europeia. Segundo o autor, o processo da pasteurização teve um efeito definitivo nas características físicas das miudezas pela inspeção visual. O inóculo utilizado foi proveniente de um reator mesofílico Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) tratando resíduos de processamento de laticínios e o ensaio foi conduzido em temperatura de 36 a 39°C.

Outra técnica que tem sido amplamente estudada e aplicada para aumentar a biodigestibilidade e diminuir o TRH é o pré-tratamento do material. Na Europa, o uso da pasteurização para resíduos de matadouros é obrigatório por lei e pode funcionar como um tratamento térmico dos resíduos devido à alta temperatura empregada e, de acordo com Ware e Power (2016) diminuiu consideravelmente o tempo da digestão anaeróbia, apesar de não aumentar significativamente a produção de biogás.

5.2. Potencial energético dos resíduos produzidos no abatedouro – estudo de caso

O Abatedouro e Frigorífico Regional Sul da Bahia – AFRISUL está localizado na cidade de Itabuna, BA. A figura 23 mostra a entrada da empresa e a figura 24 apresenta o mapa da área onde a empresa está instalada.

Figura 23: Entrada da empresa AFRISUL



Fonte: AFRISUL (2021)

Figura 24: Mapa da localização do frigorífico AFRISUL



Fonte: Imagens ©2021 CNES /Maxar technologies, Dados do mapa ©2021 Google

Abatedouros são grandes consumidores de energia, especialmente elétrica e térmica. Dessa forma, foi realizado levantamento do consumo de energia do Frigorífico AFRISUL pelo período de 12 meses, de abril de 2020 até março de 2021, através das faturas de energia elétrica da concessionária de energia COELBA e pela quantidade de material combustível para as caldeiras que foram comprados. A Tabela 19 apresenta de forma resumida esses dados que

serão utilizados posteriormente para verificação do abatimento efetivo de energia que a produção de biogás no local poderia suprir.

Tabela 19: Consumo de Energia no abatedouro AFRISUL no ano de 2020

Período	Consumo de Energia Elétrica kWh	Consumo Energia poço kWh	Quantidade de Casca de Dendê (kg)	Animais abatidos	Resíduos gerados (kg)
jan/20	30.282	1.597	15.020	2.052	70.404,12
fev/20	24.792	1.595	14.510	1.854	63.610,74
mar/20	23.136	1.710	14.380	1.965	67.419,15
abr/20	24.274	1.592	0	1.726	59.219,06
mai/20	24.933	1.649	16.520	1.921	65.909,51
jun/20	35.892	1.708	15.420	2.347	80.525,57
jul/20	23.503	1.950	15.570	2.291	78.604,21
ago/20	26.999	1.825	15.730	1.989	68.242,59
set/20	32.742	1.569	15.360	1.975	67.762,25
out/20	23.415	1.663	15.610	1.880	64.502,8
nov/20	18.858	1.575	15.820	1.725	59.184,75
dez/20	36.312	1.761	0	2.042	70.061,02
Total	325.137	20.194	153.940	23.767	815.445,77
Total Energia Elétrica		345.331			

As Tabelas 6, 7 e 8 apresentadas anteriormente fornecem informações da proporção dos resíduos, de acordo com o animal e o tipo de material, da quantidade de animais abatidos ao longo do ano de 2020 e proporção de cada resíduo utilizado no ensaio de BMP, dessa maneira, é possível realizar uma estimativa da capacidade desses resíduos gerados pelo abatedouro.

A média da massa para cada animal abatido é de 34,31kg dos resíduos de sangue, conteúdo intestinal e conteúdo ruminal. Multiplicando o número de animais abatidos pela quantidade de resíduos gerados, obtém-se o total de 815.445 Kg de resíduos gerados anualmente no abatedouro.

O processo de conversão de energia refere-se ao processo em que alguma forma de energia é convertida para outra. São inúmeras as tecnologias utilizadas para a conversão energética do biogás, no caso da conversão em energia elétrica, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador, que a converte em energia elétrica (COELHO, 2006). Nos processos de combustão controlada destacam-se as seguintes tecnologias: turbinas a gás, microturbinas e grupos geradores de combustão interna (D'AQUINO, 2018).

5.2.1. Cálculo da Energia Elétrica

Para este trabalho será utilizada a conversão para energia elétrica utilizando um motor de combustão interna ciclo Otto que funciona como uma máquina térmica. Segundo Brunetti (2012), as máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar o calor em trabalho.

Desse modo, para a conversão energética do biogás, é considerado o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás e a eficiência do processo termodinâmico de atuação do motor de ciclo termodinâmico Otto para gás e do gerador elétrico. O poder calorífico é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa (1 kg) ou uma unidade de volume (1 m³) do combustível, podendo ser medida em MJ/Nm³, kJ/kg, kcal/kg, kJ/m³, kcal/m³.

O poder calorífico do biogás depende diretamente da quantidade de gás metano contido na mistura. Quanto maior a quantidade de gás metano, maior será o seu poder calorífico. O metano apresenta o seu poder calorífico inferior (PCI) de 8500 Kcal/m³ (SOLOMON, 2005). A Tabela 20 compara o PCI para diferentes gases combustíveis.

Tabela 20: PCI de diferentes gases combustíveis

Gás	Poder Calorífico Inferior (PCI, kcal/Nm ³)
Butano	28.000
Gás de Cozinha - GLP	25.775
Gás Natural	7.600
Metano	8.500
Propano	22.000

O resultado dos ensaios de BMP nos fornecem dados que permitem calcular a energia térmica e elétrica que pode ser obtida a partir da fermentação anaeróbia dos resíduos sólidos do abatedouro. Considerando o poder calorífico inferior (PCI) do metano sendo 8.500 kcal/m³, e o rendimento elétrico de um sistema motogerador de 30% para operação com biogás, conseguimos estimar o potencial energético, levando-se em conta que a mistura utilizada nos ensaios de BMP foram a média para cada animal, dessa forma o resultado pode ser expresso em potencial energético por animal abatido.

A energia térmica que será convertida em energia elétrica pelo motogerador resultante do ensaio de BMP, pode ser calculada pela Equação 10 a seguir:

$$E_{t\acute{e}rmica} = V_{metano} * PCI_{metano} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 10}$$

Onde:

$E_{t\acute{e}rmica}$ = energia t\acute{e}rmica dispon\~{i}vel

V_{metano} = Volume de metano no biog\~{a}s produzido

PCI_{metano} = 8.500 kcal/m³

A partir da energia t\acute{e}rmica, \acute{e} poss\~{i}vel calcular a energia el\acute{e}trica, considerando a efici\~{e}ncia da tecnologia de convers\~{a}o e do gerador utilizado. Desse modo, a convers\~{a}o em pot\~{e}ncia el\acute{e}trica utilizando um grupo moto-gerador com rendimento de 30% atrav\~{e}s da equa\c{c}\~{a}o 11 descrita a seguir:

$$P_{metano} = (E_{t\acute{e}rmica} * n_{motor} * 0,001162) \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 11}$$

Onde:

P_{metano} = Pot\~{e}ncia el\acute{e}trica do metano

$E_{t\acute{e}rmica}$ = energia t\acute{e}rmica dispon\~{i}vel

n_{motor} = rendimento do motor

0,001162 = fator de convers\~{a}o de kcal para kWh

Com o valor encontrado da pot\~{e}ncia el\acute{e}trica para o biog\~{a}s, \acute{e} poss\~{i}vel calcular ent\~{a}o a energia el\acute{e}trica gerada a partir da tecnologia de convers\~{a}o e do tempo de opera\c{c}\~{a}o utilizando a equa\c{c}\~{a}o 12.

$$E_{el\acute{e}trica} = P_{biog\~{a}s} * T_{opera\c{c}\~{a}o} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 12}$$

Onde:

$E_{el\acute{e}trica}$ = Energia el\acute{e}trica gerada (kWh/dia)

$P_{biog\~{a}s}$ = Pot\~{e}ncia el\acute{e}trica do biog\~{a}s

T = Tempo de opera\c{c}\~{a}o do motor (h/dia)

A tabela 21 apresenta de forma resumida os c\~{a}lculos para a gera\c{c}\~{a}o de energia el\acute{e}trica atrav\~{e}s do biog\~{a}s medido no ensaio de BMP para o abatedouro Afrisul.

Tabela 21: Cálculos do abatimento no consumo de energia elétrica do abatedouro

	Unidade	Valor	SBP	ABP
Biogás produzido ensaio BMP	L _N	n.a.	1,7450	1,9102
% CH ₄ medido	%	n.a.	67,8	61,1
Volume de gás metano produzido	L _N CH ₄	n.a.	1,1831	1,1671
SV aplicado	g SV	n.a.	5	5
Total de SV aplicado	L _N CH ₄ /g SV	n.a.	0,2366	0,2334
Total de SV aplicado	L CH ₄ / ton SV	n.a.	23.6622	23.3426,44
Total de SV aplicado	Nm ³ CH ₄ / ton SV	n.a.	236,62	233,44
Volume CH ₄ / ano	Nm ³ CH ₄ /ano	n.a.	23.147,54	34.264
PCI metano	kcal	8500	n.a.	n.a.
Fator de conversão	kcal para kWh	0,001162	n.a.	n.a.
PCI metano	kWh	9,877	n.a.	n.a.
Rendimento motor Otto	%	30	n.a.	n.a.
Energia elétrica anual	kWh/ano	n.a.	68.588	101.493
Energia elétrica anual	MWh/ano	n.a.	68,59	101,49
Resíduos 1 animal	kg	34,3	n.a.	n.a.
Animais abatidos/ ano	unidade	23.767	n.a.	n.a.
Resíduos gerados ano	kg	815.208,1	n.a.	n.a.
Resíduos gerados ano	ton	815,21	n.a.	n.a.
SV	%	n.a.	12	18
SV total/ano	ton SV/ano	n.a.	97,82	147
Consumo anual de Energia Elétrica	kWh	345.331	n.a.	n.a.
Abatimento	%	n.a.	19,9	29,4
Custo referente ao ano de 2020	R\$	219.897,38	n.a.	n.a.
Economia	R\$	n.a.	43.675,27	64.651,00

Dessa maneira, a energia elétrica disponível no abatedouro é de 68.59 MWh/ano para amostra SBP e 101.49 MWh/ano para a amostra ABP o que representa um abatimento de 19,9% para o SBP e 29,4% para o ABP, tomando como base ao consumo informado nas faturas de energia elétrica emitidas pela Coelba, que foi de 345.331 kWh para o ano de 2020, ao custo total de R\$ 219.897,38. A economia para 2020 seria de R\$43.759,58 para o SBP e R\$ 64.651 para o ABP.

5.2.2. Cálculo de Energia térmica disponível por cogeração

A cogeração consiste na produção simultânea de eletricidade e calor a partir da queima de um único combustível. Na cogeração de energia, são utilizados grupos geradores compostos por um motor à combustão acoplado a um gerador elétrico, também conhecido como *Combined Heat and Power* (CHP). Segundo BRIZI et. al. (2014) tem sido utilizada principalmente pela sua eficiência geral e pela garantia de energia elétrica com baixo impacto ambiental. Os

sistemas compactos de cogeração usando motor de combustão interna são amplamente aplicados devido à boa relação entre custo e benefício obtido em tais dispositivos.

Todas as máquinas térmicas absorvem o calor de uma fonte com uma temperatura relativamente alta, realizam algum trabalho mecânico e rejeitam algum calor a uma temperatura mais baixa. Por melhor que seja a máquina, o calor rejeitado é desperdiçado. No motor de combustão interna, o calor é rejeitado nos gases de exaustão e no sistema de arrefecimento. De acordo com a primeira lei da termodinâmica, em um sistema que executa um processo cíclico, sua energia interna inicial é igual a energia interna final, ou seja: $U_2 - U_1 = 0 = Q - W$, logo, $Q = W$. Dessa forma, o calor total que flui para o interior da máquina durante o ciclo é igual ao trabalho líquido realizado pela máquina (GONDIN, 2017)

Segundo YOUNG e FREEDMAN (2003), quando analisamos máquinas térmicas, é útil pensar em dois corpos que podem interagir com a substância de trabalho. Um deles, denominado de reservatório quente (fonte de calor para transformar a energia térmica em trabalho) e outro chamado de reservatório frio, que pode absorver grandes quantidades de calor que foi rejeitado pela máquina. Se essa máquina térmica realizar indefinidamente o mesmo ciclo, o módulo do calor absorvido e o módulo do calor rejeitado representam o calor total.

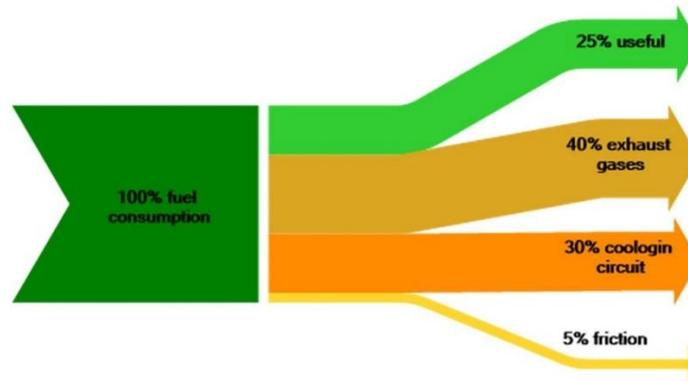
$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{absorvido}} + Q_{\text{rejeitado}}$$

Equação 11

Dessa forma, a diferença de rendimento do motor é o calor rejeitado e que pode ser aproveitado num sistema de cogeração e que, teoricamente gira em torno de 70% e é desperdiçado pelo sistema de arrefecimento do motor e pelos gases de exaustão. Segundo Dalpaz (2019) é relevante deixar claro que qualquer processo de produção de energia não tem 100% de eficiência no sistema, havendo desperdícios de diversas maneiras pelos equipamentos.

Os motores movidos originalmente a gasolina, etanol, diesel e gás natural são componente geradoras de energia que sofreram adaptações para uso do biogás, mantendo suas características de funcionamento (DALPAZ, et al., 2020). Existem diferentes maneiras de consumir energia durante a combustão do motor, a figura 25 mostra as perdas de energia dos combustíveis nos motores de combustão interna.

Figura 25: Perdas de energia dos combustíveis nos motores de combustão interna



Fonte: (DALPAZ, et al., 2020)

Atualmente é utilizado pelo abatedouro AFRISUL a casca de dendê para a geração de energia térmica, através da sua queima direta. A Tabela 20 apresentada anteriormente traz os dados da quantidade de casca de dendê que foi comprada no ano de 2020, e partir desse dado foi possível estimar a quantidade de energia térmica utilizada no ano. Para o cálculo da Energia térmica total utilizada, a quantidade total de casca de dendê utilizada no ano foi multiplicada pelo PCI da casca de dendê, o valor obtido é a energia térmica disponível no abatedouro através da queima direta da casca de dendê.

Para o rendimento térmico do grupo moto gerador, será considerada como 36,4%. Multiplicando-se o Volume de gás metano obtido para cada uma das amostras pelo rendimento de cogeração do motor utilizado e pelo PCI do gás metano, obtém-se a quantidade de energia térmica anual disponível.

O valor da energia térmica possível pelo uso do biogás no abatedouro é apresentado na tabela 22.

Dessa maneira, a Energia térmica para ser aproveitada por cogeração no abatedouro é de 83.221 kWh/ano para amostra SBP e 123.145 kWh/ano para a amostra ABP. Outrossim, baseando-se nas Notas Fiscais de compra de casca de dendê no ano de 2020 e no PCI da casca de dendê, o consumo de energia térmica foi de 787.243 kWh/ano, ao custo total de R\$62.782,00, logo a economia é da ordem de 11% para o SBP e 16 % para o ABP. Essa economia representaria em 2020, R\$ 6.906,02 para o SBP e 10.045,12 para o ABP.

Tabela 22: Cálculos do abatimento no consumo de energia térmica do abatedouro

	Unidade	Valor	SBP	ABP
Volume CH ₄ / ano	Nm ³ CH ₄ /ano	n.a.	23.148	34.252
PCI metano	kcal	8.500	n.a.	n.a.
Fator de conversão	kcal para kWh	0,001162	n.a.	n.a.
PCI metano	kWh	9,877	n.a.	n.a.
Rendimento cogeração motor Otto	%	36,4	n.a.	n.a.
Energia térmica por cogeração anual	kWh/ano	n.a.	83.221	123.145
Energia térmica por cogeração anual	MWh/ano	n.a.	83	123
Quantidade de casca de dendê	kg	153.940	n.a.	n.a.
PCI casca dendê	kcal	4.401	n.a.	n.a.
PCI casca dendê	kWh _{térmico}	5	n.a.	n.a.
Energia térmica a partir da casca de dendê no ano	kcal	677.489.940	n.a.	n.a.
Energia térmica a partir da casca de dendê no ano	kWh _{térmico}	787.243,31	n.a.	n.a.
Abatimento	%	n.a.	10,6	15,6

5.3. Implantação do sistema de recuperação energética e Estimativa de *Payback* Simples

O *Payback* simples é uma metodologia para fazer uma análise de investimentos. Trata-se da estimativa de tempo para que se obtenha retorno sobre o valor investido. Para o cálculo devem ser levados em conta apenas os gastos para implementação e aquisição da tecnologia e, a economia decorrente do seu uso. O cálculo pode ser feito através da equação 13.

$$Payback = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Ganho no período}} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo assim, devem ser avaliados os gastos totais envolvidos com a implementação da tecnologia de digestão anaeróbia e conversão energética escolhida para o frigorífico. O ponto central a ser considerado para um sistema de tratamento anaeróbio é o modelo do biodigestor utilizado. Por isso, deve-se buscar projetos adaptados ao tipo de substrato a ser tratado, nível de investimento e condições ambientais (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 modelos mais encontrados no Brasil são Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC), *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) e *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR).

Para a implantação efetiva do sistema de recuperação energética do biogás produzido no abatedouro será considerado a estrutura atual, na qual os efluentes líquidos são despejados em lagoas facultativas.

Todo o efluente decorrente do processo de abate, entre eles o rúmen, o sangue, águas de lavagem e dejetos são direcionados à primeira lagoa que tem como principal função dar início ao processo de fermentação e reter a parte sólida orgânica não digerida pelo sistema. A biomassa que é gerada nessa primeira lagoa, precisa ser retirada com o auxílio de uma retroescavadeira, pelo menos uma vez por semana. Essa biomassa é utilizada como adubo.

Posteriormente, o material é direcionado às quatro lagoas subsequentes, onde o processo de consumo da carga orgânica é complementado. O projeto de reforma visa instalar um biodigestor tipo lagoa coberta na segunda lagoa. A figura 26 apresenta descrito os detalhes das lagoas e suas dimensões.

Figura 26: Detalhe das lagoas facultativas do abatedouro e frigorífico AFRISUL



Fonte: Imagens ©2021 CNES /Maxar technologies, Dados do mapa ©2021 Google

As lagoas anaeróbias podem ser classificadas em dois modelos hidráulicos básicos, sendo: lagoa coberta convencional e a de alta taxa (LAFA). O que as diferencia é a posição da entrada de resíduos e saída dos efluentes. Na convencional a entrada se dá de forma horizontal enquanto na de alta taxa, o fluxo hidráulico é ascendente, com a entrada localizada no fundo da lagoa. Embora as reações bioquímicas se deem em ambas as lagoas, na lagoa convencional, os microorganismos tendem a se localizar no fundo, dificultando o contato com a matéria orgânica e aumentando o TDH, o que pode ser resolvido utilizando o modelo de alta taxa. Segundo COELHO et al (2018) em áreas rurais, são utilizadas lagoas cobertas de fluxo ascendente para a digestão anaeróbia.

As vantagens na utilização das lagoas cobertas do tipo LAFA, se dão principalmente pela possibilidade de aplicar cargas orgânicas elevadas, obtendo-se eficiência quanto à remoção da carga orgânica e que estas lagoas são mais utilizadas em regiões tropicais, onde o calor atmosférico pode ajudar a manutenção da temperatura no biodigestor (COLUNA, 2016). A figura 27 demonstra o sistema de lagoas cobertas para a produção de biogás.

Figura 27: Sistema de lagoas cobertas para a produção de biogás



Fonte: (COELHO, et al., 2018)

No abatedouro Afrisul, durante o ano de 2020, foram abatidos 23.767 animais. Se um ano tem 252 dias úteis, a média diária de abate foi de 94 animais. Há no abatedouro a expectativa do aumento da produção com o abate diário de 350 cabeças nos dias úteis, que resultaria numa média de abates diários de 250 cabeças. Para o dimensionamento do projeto do biodigestor, será considerado o cenário 1, existente atualmente, com abate diário de 94 cabeças/dia e o cenário 2, com média de abate diário de 250 cabeças/dia.

O consumo de água por animal, obtido através de dados primários é de até 0,6 m³/ animal abatido, entretanto a CETESB (2008) indica que são consumidos no mínimo 1 m³/ animal. Para efeito do

dimensionamento do biodigestor, foram feitas as estimativas para as duas vazões de afluentes diárias no sistema

Para a implantação do biodigestor, o valor estimado para o investimento inicial total foi de R\$ 513.939,08. A empresa Rastro Biodigestores forneceu o orçamento para a implantação do biodigestor com área da lagoa de 2.200m, volume útil de 5.926,4 m³, vazão do efluente de 227,5 m³/dia e sistema de alívio de pressão no valor de R\$ 271.939,08.

A empresa ERBR forneceu o orçamento para a instalação do sistema de cogeração de energia através do biogás ao custo de R\$ 242.000,00, com um grupo gerador com potência de 50kVA/ 32 kW. Os orçamentos fornecidos estão disponíveis no Anexo III.

Considerando o valor do investimento inicial, foi possível realizar o estudo da viabilidade econômica a partir do rendimento de gás metano da amostra ABP para dois cenários. O tempo de retorno de investimento (*payback*) foi calculado a partir da equação 13.

A tabela 23 apresenta os dados para o dimensionamento do biodigestor e o cálculo do tempo para retorno do investimento utilizando os resultados gerados através do ensaio de BMP e da lagoa já existente e também o detalhamento dos custos para a implantação do biodigestor e do sistema de cogeração de energia.

Tabela 23: Dimensionamento do biodigestor e cálculo do tempo de retorno de investimento

	Unidade	Valor unitário	Cenário 1	Cenário 2
Projeto para a Instalação do Biodigestor no Abatedouro				
Animais abatidos/dia útil	n/a	n/a	94	250
Animais abatidos/ ano	n/a	n/a	23.767	63.000
Dias úteis no ano	n/a	252	n/a	n/a
Quantidade de resíduos gerados/ animal	kg	34,31	n/a	n/a
Quantidade de resíduos gerados/dia	kg	n/a	3.236	8.578
Quantidade de resíduos gerados/ano	ton	n/a	815	2.162
Volume de metano gerado no ensaio BMP	L _N CH ₄	1,1672	n/a	n/a
SV aplicado no ensaio BMP	g SV	5	n/a	n/a
SV	%	18	n/a	n/a
SV total/ano	ton SV/ano	n/a	147	389
Total de SV aplicado	Nm ³ CH ₄ / ton SV	n/a	233,44	233,44
Volume de metano/ SV aplicado	Nm ³ CH ₄ / ton SV	233,44	n/a	n/a
Volume estimado de CH ₄ / ano	Nm ³ CH ₄ /ano	n/a	34.264	90.826
Volume CH ₄ / animal abatido	Nm ³ CH ₄ /ano	n/a	1,4	1,4
Densidade dos resíduos	kg/m ³	1000	n/a	n/a
Volume dos resíduos gerados no abate/dia	m ³ /dia	n/a	3,2	8,6
Volume dos resíduos gerados no abate/ano	m ³ /ano	n/a	815,4	2.161,5
Se utilizar 0,6 m³ de água por animal				
Volume de água utilizada/ animal	m ³	0,6	n/a	n/a
Afluentes / animal	m ³ /animal	0,634	n/a	n/a
Afluentes / dia	m ³ /dia	n/a	60	159
Afluentes / ano	m ³ /ano	n/a	15.076	39.962
Tempo de retenção hidráulica	m ³ /dia	n/a	99	37
Se utilizar 1m³ de água por animal				
^e Volume de água utilizada/ animal	m ³	1	n/a	n/a
Afluentes/ animal	m ³ /animal	1,034	n/a	n/a
Afluentes/ dia	m ³ /dia	n/a	98	259
Afluentes/ ano	m ³ /ano	n/a	24.582	65.162
Tempo de retenção hidráulica (TRH)	m ³ /dia	n/a	61	23
^e CETESB (2008)				
Dimensões da Lagoa				
Área para cobertura	m ²	2.200	n/a	n/a
Volume	m ³	6.296	n/a	n/a
Volume útil	m ³	5.926,40	n/a	n/a
Dados				
PCI metano	kcal	8.500	n/a	n/a
^a Fator de conversão (fc)	kcal para kWh _e	1,16E-03	n/a	n/a
PCI metano * fc	kWh	9,88	n/a	n/a
Rendimento motor Otto	%	30	n/a	n/a

Rendimento trocador de calor	%	36,4	n/a	n/a
^b PCI _{casca dendê}	kcal	4.401	n/a	n/a
PCI _{casca dendê} * fc	kWh _t	5,11	n/a	n/a
^a Balanço Energético Nacional (2021)				
^b EMBRAPA (2018)				
Energia elétrica				
Consumo/ ano	kWh _e	n/a	345.331	915.381
Consumo/ animal abatido	kWh _e	14,5	n/a	n/a
Energia produzida a partir do metano	kWh _e /ano	n/a	101.529	269.126
Energia produzida a partir do metano	kWh _e /dia	n/a	278	737
Potencia elétrica mínima	kW _e	n/a	12	31
Custo referente ao ano de 2020	R\$	n/a	219.897	582.890
Abatimento	%	n/a	29	29
Economia anual	R\$	n/a	64.651	171.372
Energia térmica				
Quantidade de casca de dendê	kg	n/a	153.940	408.054
Demanda total referente ao ano 2020	Gcal	n/a	677	1.796
Demanda total referente ao ano 2020	kWh _t	n/a	787.243	2.086.773
Demanda/ animal abatido	kWh _t /cabeça	33	n/a	n/a
Geração de Energia térmica/ animal abatido	kWh _t /cabeça	5	n/a	n/a
Energia térmica/ ano	kWh _t	n/a	123.188	326.539
Custo referente ao ano de 2020	R\$	n/a	62.782	166.418
Abatimento	%	n/a	16	16
Economia anual	R\$	n/a	9.824	26.041
Custos para a implantação do Projeto				
^c Implantação do biodigestor	R\$	196.939,08	n/a	n/a
^c Sistema de alívio de pressão (flare)	R\$	75.000,00	n/a	n/a
^d Grupo gerador 50kVA/ 32 kW	R\$	160.000,00	n/a	n/a
^d Pannel de proteção para GD	R\$	35.000,00	n/a	n/a
^d Trocador de calor - geração de energia térmica	R\$	35.000,00	n/a	n/a
^d Sistema biológico de tratamento H ₂ S	R\$	12.000,00	n/a	n/a
Terraplanagem	R\$	25.000,00	n/a	n/a
Custo total para implantação	R\$	538.939,08	n/a	n/a
^c Empresa Rastro (2022)				
^d Empresa ERBR (2022)				
Payback				
Investimento inicial	R\$	538.939,08	n/a	n/a
Economia anual	R\$	n/a	74.475	197.413
Payback	n/a	n/a	7 anos e 3 meses	2 anos e 9 meses

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é a medida do tempo necessário para a entrada do substrato e a passagem pela lagoa coberta, até a sua máxima conversão em biogás e lodo. O TRH é determinado, num processo contínuo, pela relação entre volume digestor e o volume diário de carga introduzida, isto é, de matéria orgânica adicionada. O tempo de retenção e a carga orgânica adicionada devem ser controlados em relação um ao outro, para que se obtenha rendimento máximo de biogás. Geralmente o tempo de retenção é maior quando há carga elevada. Se um processo com curto tempo de retenção for muito carregado, existe o risco de não degradar completamente o substrato.

Segundo D'Aquino (2018), TRH muito elevado pode encarecer demasiadamente a planta, uma vez que implicará no volume do reator, bem como de equipamentos e acessórios. Em outra publicação, D'Aquino et al (2017), concluem que o aumento de 50% no TRH resulta em uma recuperação de energia 20% superior por grama de sólidos voláteis removidos.

No abatedouro, o fator limitante para o TRH é o volume útil da lagoa já existente que é de 5.926,4 m³. Dessa maneira, para o projeto do biodigestor, o tempo de retenção hidráulico depende diretamente da quantidade de afluente introduzida no biodigestor, uma vez que o volume útil da lagoa é fixo. Quanto maior o volume introduzido na lagoa, menor será o TRH. Para efeito de dimensionamento do Projeto, utilizando o volume de 0,6m³ de água por animal abatido o TRH será de 23 dias, e utilizando 1 m³ de água por animal abatido o TRH é de 37 dias.

Nos ensaios de BMP, o tempo de retenção hidráulico adotado foi de 28 e 32 dias seguindo orientação da norma VDI 4630 (2016) que preconiza que os testes de BMP devem ser realizados por um período mínimo de 25 dias. Todavia foi observado que após o 20º dia a produção de biogás diminuiu significativamente, com a vazão praticamente nula, logo, podemos considerar esse como sendo o TRH do sistema. Jensen et al (2014) afirmam que lagoas anaeróbicas em matadouros australianos são tipicamente projetadas com um TRH de 20 dias. Ware e Power (2016), corroboram que o TRH típico para resíduos de matadouros é de aproximadamente 20 dias, com alimentação contínua. Levando isso em conta e comparando o TRH do ensaio BMP com ambos os TRHs do projeto, é possível afirmar que a cobertura de apenas uma lagoa é suficiente para atender à demanda local.

A eficiência do biodigestor é a medida do quanto de matéria orgânica será removida do substrato e transformada em biogás. A empresa Rastro adotou o valor de 80% para a eficiência do biodigestor e DQO de entrada de 46.400 mg/L e saída de 9.280 mg/L e remoção de 8.444Kg

DQO/dia. Para o DBO, o volume de entrada é de 20.000 mg/L e o volume de saída é 4.000mg/L e remoção de 3.640 Kg DBO/dia. Contudo os ensaios de BMP demonstraram uma eficiência de remoção de DQO de 95% e de DBO de 96% para o tempo de retenção hidráulica de 32 dias, reduzindo a DQO de 128.508 mg/L para 21.290 mg/L e a DBO de 83.021mg/L para 6.300mg/L.

No abatedouro o efluente passa primeiramente por um tratamento preliminar, para a retenção dos sólidos grosseiros; após é direcionado para um tanque de mistura, com a função de homogeneizar o efluente oriundo das linhas verde e vermelha e seguidos por cinco lagoas em série. A primeira lagoa, tem a função de reter a matéria sólida composta de esterco, do rúmen e do curral. A segunda é o biodigestor, com a função de reduzir anaerobicamente a matéria orgânica do efluente e seguido pelas lagoas facultativas 01, 02 e 03 que dão continuidade ao processo, visto que a matéria orgânica do efluente não é reduzida em sua totalidade no biodigestor. Ao final do processo, o líquido resultando será inodoro e de cor marrom clara.

No cálculo do tempo do retorno do investimento, para o cenário 1, o custo do Projeto é bastante alto com o tempo para retorno de investimento de 7 anos e 3 meses e para o cenário 2 o tempo para retorno de investimento foi de 2 anos e 9 meses. Dessa forma, o Projeto seria viável para o abate diário de até 250 cabeças.

5.4. Avaliação do impacto da presença do sangue na produção de biogás

Há relatos a literatura sobre a dificuldade da biodigestão da linha vermelha em frigoríficos. Banks e Wang (2006) relataram que o sangue pode ter impacto negativo na produção de biogás. Banks e Zhang (2010) concluíram que a degradação dos compostos ricos em nitrogênio do sangue causou o acúmulo de altas concentrações de amônia. A fim de elucidar esse tema, foram feitos ensaios adicionais.

O ensaio foi realizado seguindo a metodologia descrita por Angelidaki et al (2009) e a norma alemã VDI 4630 (2016). Também foi realizada a caracterização físico-química dos substratos e inóculo. Os conteúdos de Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV) foram determinados de acordo com o método 2540G da APHA (*American Public Health Association*) e a análise foi realizada no laboratório de Bioenergia do IEE/ USP. A análise de DQO foi realizada pelo Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental/ PHA – Engenharia Civil, EP/USP utilizando a metodologia 5220D da APHA (2017) e para o de DBO a metodologia 5210-B da APHA (2017). O resultado da caracterização físico química é apresentado na tabela 26.

Tabela 24: Caracterização físico-química

	ST (%)	SV (%ST)	DQO (mgO ₂ /l)	DBO (mgO ₂ /l)	Densidade (kg/m ³)
Inóculo	2,1	60,4	n.d.	n.d.	1.005,22
SBP sem sangue	5,7	83,2	49.572	29.615	1,025,92
SBP com sangue	8,1	88,9	128.508	83.021	1.043,58

A quantidade de substrato utilizada em cada reator foi determinada considerando-se a massa de sólidos voláteis do substrato e do inóculo. Para o substrato foi utilizada 5 gSV e para o inóculo 10gSV, de forma a manter a proporção de 0,5 conforme disposto na norma VDI (2016). O teste foi conduzido a 37°C. A tabela 27 apresenta quantidade de cada material que foi utilizada para cada um dos reatores.

Tabela 25: Quantidade de material utilizado para cada amostra

	Conteúdo intestinal (g)	Conteúdo Ruminal (g)	Sangue (g)	Celulose microcristalina (g)	inóculo (g)
Branco	0	0	0	0	800
Controle	0	0	0	5	800
SBP sem sangue	6	98	0	0	800
SBP com sangue	3,4	55,1	11	0	800

Ainda segundo a VDI 4630 (2016) o teste deve ser conduzido pelo período mínimo de 25 dias e o critério para termino do ensaio é quando a taxa de produção de biogás por três dias consecutivos é menor que 0,5% do total do volume de biogás produzido até aquele momento. Sendo assim, o teste foi desligado no 32º dia, e o material contido nos reatores foi caracterizado físico-quimicamente, conforme disposto na tabela 28.

Tabela 26: Caracterização físico-química ao final do ensaio

	ST (%)	SV (%ST)	DQO (mgO2/l)	DBO (mgO2/l)	Densidade (kg/m ³)
Branco	2,11	57,6	15.059	3.100	1.009,15
SBP sem sangue	2,49	61	16.119	4.400	1.008,95
SBP com sangue	2,39	60	21.290	6.300	1.008,15

Segundo a APHA (2017), os testes de DQO e DBO são realizados para determinar o nível de poluição de águas e efluentes para prever as suas condições de biodegradabilidade. A definição de Demanda Química de Oxigênio pode ser estabelecida como a medida da quantidade de oxidante químico necessário para oxidar a matéria orgânica de uma amostra. A equação para a determinação da eficiência de remoção em relação à DQO é apresentada na equação 13 a seguir.

$$\% Ef_{DQO} = \frac{DQO_{substrato} - DQO_{final}}{DQO_{substrato}} \quad \text{Equação 13}$$

É importante salientar que o ensaio de DQO e DBO inicial foi realizado na amostra bruta, sem a adição do inóculo. Já o ensaio final, foi realizado nas amostras que ficaram nos reatores após a digestão anaeróbia. Sendo assim, a eficiência de remoção da DQO das amostras ensaiadas é apresentada na tabela 29, já considerado o desconto da influência do inóculo.

Tabela 27: Eficiência de remoção em relação ao DQO

	%Eficiência de remoção	DQO removida (mgO2/l)
SBP sem sangue	97,86	48.511,16
SBP com sangue	95,15	122.275,36

A Demanda bioquímica de oxigênio - DBO é a quantidade de oxigênio que é consumida pelos microrganismos para degradar os materiais orgânicos no substrato. Também é realizado o cálculo para determinação do percentual de eficiência de remoção de DBO como forma de

atestar a qualidade do efluente final da digestão anaeróbia. O cálculo de eficiência de remoção de DBO é feito utilizando a equação 14.

$$\% Ef_{DBO} = \frac{DBO_{substrato} - DBO_{final}}{DBO_{substrato}} \quad \text{Equação 14}$$

Também considerando o desconto da DBO do branco nas amostras finais, a tabela 30 apresenta os resultados de remoção da DBO nas amostras.

Tabela 28: Eficiência de remoção em relação ao DBO

	%Eficiencia de remoção	DBO removida (mgO2/l)
SBP sem sangue	95,61	28.314,90
SBP com sangue	96,15	79.824,69

De acordo com a Equação 15 a seguir:



Um mol de metano requer dois mols de oxigênio para a sua completa oxidação a gás carbônico e água. Portanto, cada 16 g de CH₄, produzido, corresponde à remoção de 64g de DQO do substrato. Nas condições Normais de Pressão e Temperatura (CNTP), isso corresponde a 0,35L de metano para cada grama de DQO degradada. De acordo com Chernicharo (1997), a equação geral para essa produção teórica pode ser determinada conforme consta na equação 16.

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{k(t)} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

V_{CH_4} = volume de metano produzido (m³)

DQO_{CH_4} = carga de DQO removida no reator e convertida em metano (kgDQO)

$k(t)$ = fator de correção para a temperatura operacional do reator (kgDQO/m³)

O fator de correção $k(t)$ pode ser determinado a partir da equação 17.

$$k(t) = \frac{P_x K}{R_x (273 + t)} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

P = pressão atmosférica (1 atm)
 K = DQO correspondente a um mol de CH₄ (64 gDQO/mol)
 R = constante dos gases (0,0821 atm.L/ mol°K)
 T = temperatura operacional do reator (°C)

Dessa forma é possível estimar a produção teórica de metano para o efluente do abatedouro, onde:

$$k(t) = \frac{1 * 64}{0,0821 * (273 + 37)} = 2,51 \text{ kgDQO}/\text{m}^3$$

Sendo assim, o volume de metano teórico para as amostras do abatedouro, sem sangue e com sangue respectivamente são descritas a seguir:

$$V_{CH_4 \text{ sem sangue}} = \frac{DQO_{CH_4}}{2,51} = \frac{0,03596}{2,51} = 0,014 \text{ m}^3$$

$$V_{CH_4 \text{ com sangue}} = \frac{DQO_{CH_4}}{2,51} = \frac{0,04699}{2,51} = 0,019 \text{ m}^3$$

O volume médio de biogás produzido ao longo do ensaio foi extraído do software Rigamo e é apresentado na tabela 31. Também é apresentada a composição do biogás medida através do analisador de biogás do IEE/USP.

Tabela 29: Produção de Biogás ao longo do ensaio

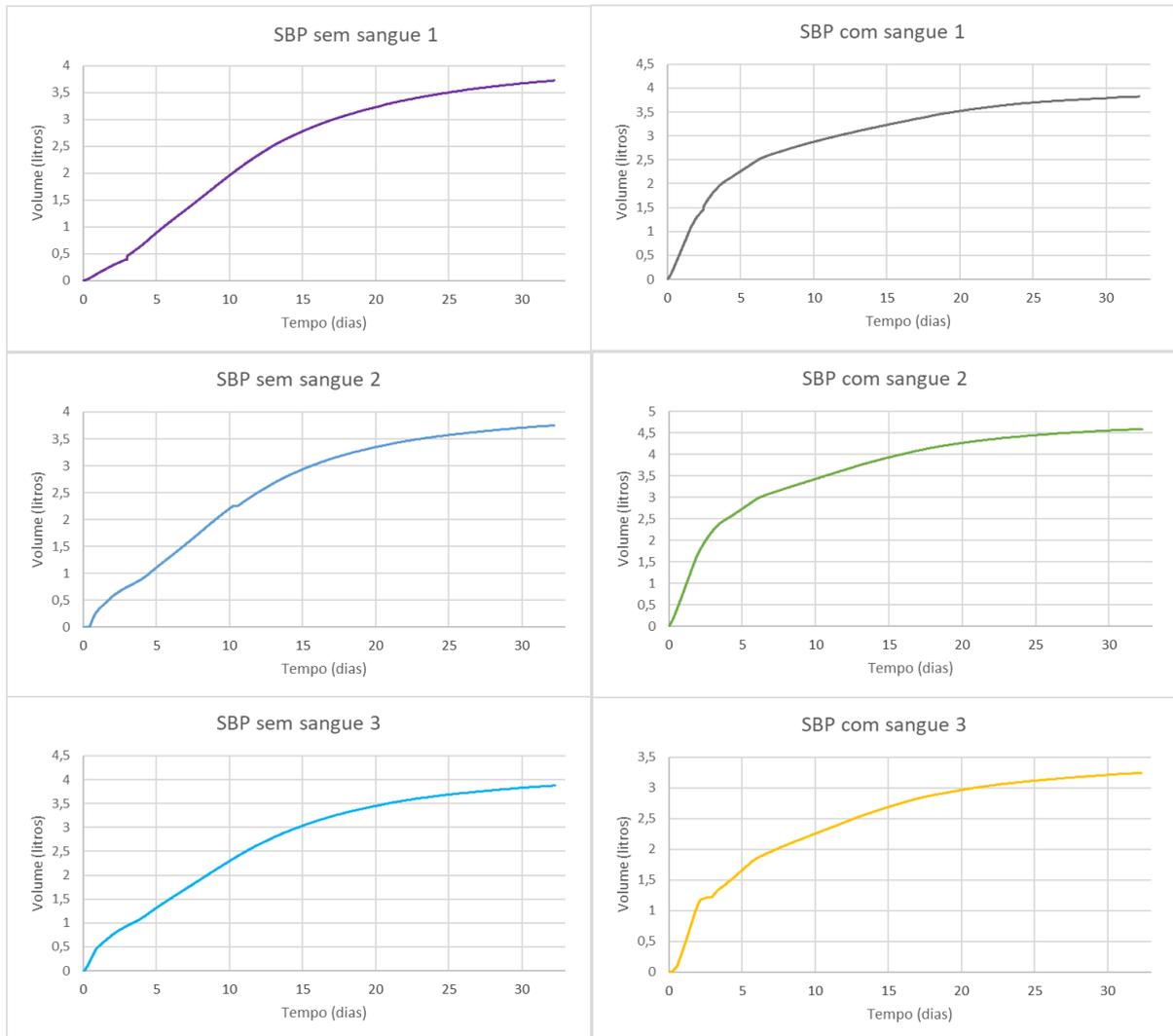
	Media (L)	CH ₄ (%)	LCH ₄	m ³ CH ₄	kgDQO _{removido}	LCH ₄ /kg DQO
Branco	0	x	x	x	x	x
Controle	2,908±1,127	46,9	1,4	0,0014	x	x
SBP sem sangue	3,676±0,081	60,0	2,2	0,0022	0,03596	61,18
SBP com sangue	3,776±0,676	64,8	2,4	0,0024	0,04699	51,07

A produção de biogás para as amostras com e sem sangue apresentaram similaridade, porém as curvas de produção de biogás ficaram distintas, como pode ser observado na figura 28. As amostras na presença de sangue apresentaram uma taxa de produção de biogás mais intensa nos primeiros 5 dias de ensaio, porém ao longo do tempo a produção entre as amostras vai se igualando, sendo que ao final do ensaio a produção total nas amostras é praticamente a mesma. Porém em comparação com o volume de metano teórico calculado, o valor encontrado

nos ensaios é 6 vezes menor para a amostra sem sangue e 8 vezes menor para a amostra com sangue.

Segundo Nazifa et al. (2021), a digestão anaeróbica do sangue enfrenta problemas operacionais como sobrecarga e inibição. O sangue do matadouro é rico em proteínas (compostos ricos em nitrogênio); sua razão carbono/ nitrogênio (C/N) é baixa e a degradação de proteínas durante a hidrólise, assim como as etapas de fermentação acidogênica e acetogênica, libera nitrogênio amoniacal total, que é a soma do dos teores de Nitrogênio Amoniacal na forma ionizada (N-NH₃) e não ionizada (N-NH₄). Hejnfelt e Angelidaki (2009) também relatam que a degradação de proteínas libera amônia, que em altas concentrações é sugerida como inibitória para os microrganismos anaeróbios.

Figura 28: Curva de produção de biogás para as amostras com e sem sangue



Os resultados encontrados no ensaio podem ser justificados pelo fato de o sangue estar diluído no inóculo nos reatores e, pela codigestão com o conteúdo intestinal e ruminal. Bauer

(2011) empregou a diluição do sangue de bovinos em água para ensaios em um reator em batelada a 35°C e obteve um relativo aumento no rendimento do metano, porém ainda abaixo do rendimento teórico esperado. Porém, os resultados obtidos pela combinação dos três efluentes do abatedouro (linha verde, linha vermelha e água de lavagem) produziu 532mL CH₄/100mg/L de matéria orgânica dissolvida.

6. CONCLUSÕES

A alta concentração de matéria orgânica e nutrientes nos resíduos da produção de proteína animal fazem com que seu gerenciamento seja diferenciado. A literatura possui bastante discussão acerca da concepção de biodigestores para o tratamento e aproveitamento energético a partir de resíduos sólidos urbanos e efluentes domésticos, porém devido às características dos resíduos e efluentes gerados das cadeias de produção animal o tema é importante e requer atenção, pois muitas unidades produtivas podem apresentar impacto ambiental consideráveis.

Neste estudo foram demonstrados, a partir dos ensaios realizados em escala laboratorial, o potencial do uso dos subprodutos oriundos do processo de abate de bovinos para a geração de energia a partir do biogás e verificadas as possibilidades de uso energético *in situ* desta fonte renovável, através do estudo de caso do Frigorífico e abatedouro AFRISUL.

Os resultados obtidos ficaram distintos dos encontrados na literatura. A digestão anaeróbia tem sido amplamente investigada, e os estudos apontam para variabilidades de resultados. Isso é justificado principalmente pelo fato de as reações anaeróbias serem sensíveis às condições ambientais, como temperatura e pH, relativas ao substrato, como sua análise elementar a qual indica a relação C/N desse resíduo e, relativas ao inóculo, já que grande parte dos trabalhos utilizam lodos aclimatados.

Dentre os resíduos estudados, o material do rúmen é o mais desafiador quanto à tecnologia da biodigestão por ser constituído majoritariamente material lignocelulósico. A utilização da codigestão se apresenta como alternativa factível para aumentar a relação entre carbono e nitrogênio, que nas amostras estudadas, ficou abaixo do valor considerado ideal que é de 20 até 30 partes de carbono para cada parte de nitrogênio. A mistura com resíduos que contêm maior quantidade de matéria orgânica e poucos nutrientes poderia tornar a fermentação mais eficiente aumentando a quantidade de biogás produzida.

Segundo os resultados de BMP, para a geração de energia elétrica no abatedouro estudado, foi verificado um abatimento no consumo de energia da concessionária da ordem de 20% para o SBP e 29% para o ABP, porém a economia poderia ser ainda maior, se forem considerados todos os efluentes gerados no processo do abate de bovinos. Enquanto para a geração de energia térmica através da cogeração a economia verificada foi mais modesta, na ordem de 11% para o SBP e 16 % para o ABP.

A análise financeira realizada a partir do estudo de caso, também demonstrou a viabilidade econômica do uso da tecnologia da digestão anaeróbia para a geração de energia para o abate de 250 cabeças por dia. O custo de investimento inicial é de R\$ 513.939,08, porém considerando-se os gastos com energia *in situ*, o tempo do retorno do investimento é de 2 anos e 9 meses para esse cenário, que se apresentou como o projeto mais factível de ser implementado.

Adicionalmente, foi realizado um estudo do impacto da presença do sangue na biodigestão, e os resultados demonstraram que a produção de biogás para as amostras com e sem sangue apresentaram similaridade e, ao final do ensaio a produção total nas amostras é praticamente a mesma. A amostra com sangue teve a produção ligeiramente maior que a amostra sem sangue, o que corrobora que o sangue pode ser codigerido com os outros substratos do abatedouro.

Ponderando a problemática de disposição de resíduos e efluentes em abatedouros, a falta de estudos sobre alternativas para tratamento desses resíduos e com base nos resultados obtidos nos ensaios de BMP conclui-se a produção de biogás para a produção de energia elétrica e térmica por cogeração para uso local é viável.

6.1. Sugestão de trabalhos futuros

Ao longo da pesquisa, percebeu-se que existem poucos estudos que utilizam o material sólido do abatedouro para avaliação da recuperação energética através do biogás. A maioria dos estudos são sobre os efluentes líquidos de abatedouros e dejetos bovinos. Tendo em vista o papel de destaque do Brasil como produtor mundial de carne bovina e o potencial gerador de resíduos sólidos que demandam destinação final, a utilização como biogás para a produção de energia é uma opção economicamente viável dada a relevância da atividade pecuária no Brasil e demanda mais estudos. Sendo assim, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Demonstrar a redução na emissão de GEE utilizando a DA para resíduos bovinos
- Avaliar o uso da co-digestão dos resíduos sólidos dos abatedouros com resíduos com alta carga orgânica e poucos nutrientes a fim de balancear a relação C/N;
- Avaliar os diversos tipos de pré-tratamentos dos resíduos sólidos do abatedouro;
- Realizar testes em reatores CSTR para verificar a produtividade de biogás a partir de resíduos de abatedouros de bovinos;

- Realizar a inoculação de reatores com o líquido retirado do rúmen dos animais abatidos, considerando-se que são consórcios de microrganismos com potencial de produção de gás metano sem a necessidade de utilizar lodo de outras fontes;
- Considerando-se a unidade de cogeração disponível no IEE/USP na Usina experimental de biogás, mensurar a energia recuperada do grupo motogerador;
- Desenvolver metodologias para aproveitamento do digestado como biofertilizantes;

7. REFERÊNCIAS

ACHINAS, S.; EUVERINK, G.J.W. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies*. V. 2, Ed. 3, pp. 143-147. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio>> Acesso em 23/03/2020

AMON, T.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; ZOLLISCH, W.; MAYER, K.; GRUBER, L. Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 118, pp. 173-182, 2007.

ANGELIDAKI, I.; ALVES, M.; BOLZONELLA, D.; BORZACCONI, L.; CAMPOS, J.L.; GUWY, A.; KALYUZHNYI, S. V.; JENICEK, P. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organicwastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technolog*, v. 59, p. 927-933, 2009.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23ª Edição. 2017.

AFRISUL. Disponível em < <https://afrisul.negocio.site/>>. Acesso em 02/08/2021.

AZIZ, A.; BASHEER, F.; SENGAR, A.; IRFANULLAH, KHAN, S.U.; FAROOQI, I.H.. Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater, *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019>.

BATSTONE, D. J.; VIRDIS, B. The role of Anaerobic Digestion in the emerging energy economy. *Current Opinion in Biotechnology*. v 27, p. 142-149, 2014.

BANKS, C.J.; WANG, Z. Treatment of meat wastes. In *Waste Treatment in Food Processing Industry*; Wang, L., Hung, Y.-T., Lo, H.H., Yapijakis, K., Eds.; Taylor & Francis Group: New York, NY, USA,; pp. 67–100. 2006. ISBN 042919109

BANKS, C.; ZHANG, Y. Optimising Inputs and Outputs from Anaerobic Digestion Processes; DEFRA: London, UK, 2010.

BAUER, A. Investigation into the Biochemical Methane Potential of Abattoir Wastewater. Tese de bacharelado para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental. Universidade do Sul de Queensland, Austrália, 2011.

BAYR, S. PAKARINEN, O. KORPPOO, A. LIUKSIA, S. VÄISÄNEN, A. KAPARAJU, P. RINTALA, J. Effect of additives on process stability of mesophilic anaerobic monodigestion of pig slaughterhouse waste. *Bioresource technology*, v. 120, pp. 106 -113. 2012a.

BAYR, S.; RANTANEN, M.; KAPARAJU, P.; RINTALA, J. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse waste. *Bioresource technology*, v104, pp. 28–36, 2012b

BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Review: Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of Environmental Management*. v 161. p. 287-302

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. *Revista de Estudos Avançados*. vol.28 no.82, 2014

CETESB (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL); Guia Técnico Ambiental de Abate (Bovino e Suíno) – Série P+L, 2008.

COELHO, S. T., VELÁZQUEZ, S. M. S. G., PECORA, V., ABREU, F. C. Geração de Energia Elétrica A Partir Do Biogás Proveniente Do Tratamento De Esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA (CBE), 11., 2006, Rio de Janeiro: Anais do XI Congresso Brasileiro de Energia, 2006. p. 547-562.

COELHO, S. T., PECORA, V., FERRAZ Jr., A.D.N.; dos SANTOS, M. M.; JOPPERT, C. L. Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; e Part. II Biometano. IEE-USP, São Paulo. 2018.ISBN: 978-85-86923-53-1

DALPAZ, R. Avaliação energética do biogás com diferentes percentuais de metano na produção de energia térmica e elétrica. Dissertação Programa de Pós-Graduação em Sistemas Ambientais Sustentáveis, da Universidade do Vale do Taquari – Univates. 2019.

D'AQUINO, C. A. geração de energia por biogás a partir de resíduos orgânicos: estudo de caso da Cidade Universitária da USP. Tese. Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. 2018.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A.; Biogas from Waste and Renewable Resources: Na Introduction. Wiley-VCH, 2008.

EMBRAPA Suínos e Aves. Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil. 2018.

FENG, L.; LI, Y.; CHEN, C.; LIU, X.; KIAO, X.; MA, X.; ZHANG, R.; HE, Y.; LIU, G. Biochemical Methane Potential (BMP) of Vinegar Residue and the Influence of Feed to Inoculum Ratios on Biogas Production. BioResources, v. 8, 1-12,2013.

FLACHSBARTH, I.; WILLAARTS B.; XIE H.; PITOIS G.; MUELLER N.D.; RINGLER, C.; GARRIDO, A. The Role of Latin America's Land and Water Resources for Global Food Security: Environmental Trade-Offs of Future Food Production Pathways. PLOS ONE 10(1): e0116733. 2015.

GONDIN, G. V. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS E EFLUENTES LÍQUIDOS GERADOS EM UMA UNIDADE AGROINDUSTRIAL. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Ilha Solteira. 2017.

GHOSH, P.; KUMAR, M.; KAPOOR, R.; KUMAR, S.S.; SINGH, L.; VIJAY, V.; VIJAY, V.K.; KUMAR, V.; THAKUR, I.S. Enhanced biogas production from municipal solid waste via co-digestion with sewage sludge and metabolic pathway analysis. Bioresource Technology. v. 296. 2020.

HADI A., H.; JAFARI, A.; RAFIEE, S.; NOSRATI, M.; An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 34, p. 380–386, 2014.

HAFNER, S. D.; HELENE, F.L.; KOCI, L. Improving Inter-Laboratory Reproducibility in Measurement of Biochemical Methane Potential (BMP) *Water* 2020, 12(6), 1-30., 2020.

HOLLIGER, C.; ALVES, M. ANDRADE, D. ANGELIDAKI, I. ASTALS, S. BAIER, U.; BOUGRIER, C. BUFFIERE, P.; CARBALLA, M.; DE WILDE, V. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Sci. Technol.* v. 74, p. 2515–2522, 2016.

HÜLSEMANN, B.; ZHOU, L.; MERKLE, W. Biomethane Potential Test: Influence of Inoculum and the Digestion System. *Appl. Sci.* 2020, 10, 2-18. 2020

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/downloads-estatisticas.html>>. Acesso em: 16/10/2018.

JAMESON, F.; HUIHUANG, H. CHANG, D. CHANG, S. Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research. *Water* 2019, 11(5), 921, 1-29, 2019

JONGE, N.; DAVIDSSON, A.; JANSEN, J. C.; NIEELSEN, J. L. Characterization of microbial communities for improved management of anaerobic digestion of food waste. *Waste Management*, V 117, pp. 124-135.

KAAPOR, R.; GHOSH, P.; VIJAY, V.K. Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. v.26. p. 11631-11661.2019.

KONRAD, K.; HAFNER, S.D., WEINRICH, S.; ASTAL, S. Identification of Critical Problems in Biochemical Methane Potential (BMP) Tests From Methane Production Curves. *Front. Environ. Sci.*,v.7, 1-8, 2019.

KRISHNA, K. G.; LID, C. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste Management*, v. 48, p. 492-502, 2016.

KUMAR, M.; DUTTA, S.; YOU, S.; LUO, G.; ZHANG, S.; SHOW, P.L.; SAWRKAR, A. D.; SINGH, L.; TSANG, CW. A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge. *Journal of Cleaner Production*; v. 305, 2021.

LERMEN, F. H., ECHEVESTE, M.E., PERALTA, C.B., SONEGO, M., MARCON, A. A framework for selecting lean practices in sustainable product development: The case study of a Brazilian agroindustry. *Journal of Cleaner Production*. v 191. p. 261-272. 2018.

LIM, J.W.; WONG, S.W.K.; DAI, Y.; TONG, Y.W. Effect of seed sludge source and start-up strategy on the performance and microbial communities of thermophilic anaerobic digestion of food waste. *Energy*, V. 203, 2020

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. 2012.

LIMA, J.A.M., MAGALHÃES-FILHO, F.J.C., CONSTANTINO, M., FORMAGINI, E.L. Techno-economic and performance evaluation of energy production by anaerobic digestion in Brazil: bovine, swine and poultry slaughterhouse effluents. *Journal of Cleaner Production*. v. 277. p. 123-132. 2020.

LISBOA, M. S.; LANSING, S. Characterizing food waste substrates for co-digestion through biochemical methane potential (BMP) experiments. *Waste Management*, v. 33, p. 2664-2669, 2013.

LOGANATH, R.; SENOPHIYAH-MARY, J. Critical review on the necessity of bioelectricity generation from slaughterhouse industry waste and wastewater using different anaerobic digestion reactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.134. 2020

LUSTEA, S.; LUOSTARINE, S. Anaerobic co-digestion of meat-processing by-products and sewage sludge – Effect of hygienization and organic loading rate. *Bioresource Technology*. v. 101. p. 2657-2664. 2010.

LV, Z.; LEITE, A.F.; HARMS, H.; GLASER, K.; LIEBETRAU, J.; KLEINSTEUBER, S.; NIKOLAUSZ, M. Microbial community shifts in biogas reactors upon complete or partial ammonia inhibition. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 103, pp. 519-533, 2019.

LYTRAS, G.; LYTRAS, C. MATHIOUDAKIS, D.; PAPADOPOULOU, K.; LYBERATOS, G. Food Waste Valorization Based on Anaerobic Digestion. *Waste Biomass V. 12*, 1677–1697, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01108-z>

MALAFAIA, G. C., BISCOLO, P.H.N. e DIAS, F. R. T. EMBRAPA. Comunicado Técnico: Os impactos da COVID-19 para a cadeia produtiva da carne bovina brasileira. ISSN 1983-9731. 2020.

MAO, C. et al.; Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v 45, p. 540-555, 215.

MAPA; EMBRAPA; FEBRAP; O aquecimento Global e a agricultura de baixo carbono. Brasília. 2011.

MARIANI, L. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. Tese. Programa de Pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energético da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. 2018.

MELERO ABAD, P.; Valorização de resíduos agroindustriais por processos de digestão anaeróbia. Coimbra, 2015.

MOUKAZIS, I; PELLERA, F. M.; GIDARAKOS, E. Slaughterhouse by-products treatment using anaerobic digestion. *Waste Management*, v.71, p.652-662. Jul. 2017.

NAZIFA, T.H.; SAADY, N.M.C.; BAZAN, C.; ZENDEHBOUDI, S. AFTAB, A. M. Anaerobic Digestion of Blood from Slaughtered Livestock: A Review. *Energies*. V.14, edição 18. 2021.

NGUYEN, L.N.; KUMAR, J.; VU, M.T.; MOHAMMED, J.A.H.; PATHAK, N.; COMMAULT, A.S.; SUTHERLAND, D. ZDARTA, J. TYAGI, V.K.; NGHIEM, L.D. Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. *Science of The Total Environment*. v. 765. 2021

ONOVWIONA, H.I.; UGURSAL, V.I. Residential cogeneration systems: review of the current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 10, capítulo 5, pp.s 389-431, 2006

PAGÉS-DÍAZ, J.; PEREDA-REYES, I.; TAHERZADEH, M.J.; SÁRVÁRI-HORVÁTH, I.; LUNDIN, M. Anaerobic co-digestion of solid slaughterhouse wastes with agro-residues: Synergistic and antagonistic interactions determined in batch digestion assays. *Chemical Engineering Journal*. v 245, pp. 89-98, 2014.

PAGÉS-DÍAZ, J.; WESTMAN, J.; TAHERZADEH, M.J.; PEREDA-REYES, I.; SÁRVÁRI-HORVÁTH, I. Semi-continuous co-digestion of solid cattle slaughterhouse wastes with other waste streams: Interactions within the mixtures and methanogenic community structure. *Chemical Engineering Journal*. V. 273. PP. 28-36, 2015.

PAGÉS-DÍAZ, J.; PEREDA-REYES, I.; SANS, J.L., LINDIN, M.; TAHERZADEH, M.J.; SÁRVÁRI-HORVÁTH, I. A comparison of process performance during the anaerobic mono- and co-digestion of slaughterhouse waste through different operational modes. *Journal of Environmental Sciences*. V. 64, PP. 149-156, 2018.

PASALARI, H.; GHOLAMI.; RAZAEE, A.; ESRAFILI, A.; FARZADKIA, M. Perspectives on microbial community in anaerobic digestion with emphasis on environmental parameters: A systematic review. *Chemosphere*. v. 270. 2021.

PEARSE, L.; HETTIARATCHI, J. KUMAR, S. Towards developing a representative biochemical methane potential (BMP) assay for landfilled municipal solid waste – A review. *Bioresource Technology*, v. 254, p. 312-324, 2018.

PELLERA, F. M.; GIRARAKOS, E. Effect of substrate to inoculum ratio and inoculum type on the biochemical methane potential of solid agroindustrial waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 4, pp. 3217-3229, 2016.

PEREIRA, B. A.; SAWATANI, T. F. Tratamento via trituração in situ da fração orgânica de resíduos sólidos de cozinha com digestão anaeróbia e recuperação energética do biogás. Trabalho de Conclusão do Curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do diploma de Engenharia Ambiental. 2019.

RAPOSO, F.; FERNANDEZ-CEGRI, V.; RUBIA, M.A.; BORJA,R.; BELINE, F.; CAVINATO, C. DEMIRER, G. FERNANDEZ, M.; FERNANDEZ-POLANO, M.; FRIGON, J.C.; GANESH, P.; KAPARAJU, P.; KOUBOVA, I.; MENDEZ, R.; MENIN, G.; PEENE, A.; SCHERER, M.; TORRIJOS, M.; UELLEND AHL, H.; WIERINCK, I.; WILDE, V. . Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 86, 1088-1098, 2011.

SALAMA, E. S.; SAHA, S.; KURADE, M.B.; DEV, S.; CHANG, S.W.; JEON, B. H. Recent trends in anaerobic co-digestion: Fat, oil, and grease (FOG) for enhanced biomethanation. *Progress in Energy and Combustion Science*, V. 70, pp. 22-42, 2019

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F.; Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*. v. 129, p. 457e472, 2018

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris. 2018.

STROMBERG, S.; NISTOR, M. LIU, J. Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests Waste Management, v. 34, p. 1939-1948,2014.

SMITH, S. B.; GOTOH, T. GREENWOOD, P. L. Current situation and future prospects for global beef production: overview of special issue. Asian-Australas J Anim Sci. v. 31, n.7. p. 927-932. 2018.

SOLOMON, K. R. LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia Elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. Biomassa & energia. V.2, n.1, p.57-67, 2005.

VALERO, D.; MONTES, J.A.; RICO, J.L RICO, C. Influence of headspace pressure on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. Waste Management. 48, p.193-198, 2016.

VDI 4630 (2016). Fermentation of Organic Materials—Characterization of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure

VILVERT, J.A.; SALDEIRA JUNIOR, C. J.; BAUTIZAB, I.R.; ZENATTI, D.C.; ANDRADE, M.G.; HERMES, E. Minimization of energy demand in slaughterhouses: Estimated production of biogas generated from the effluent. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 120. 2020

WARE, A e POWER, N. What is the effect of mandatory pasteurization on the biogas transformation of solid slaughterhouse wastes? Waste Management. v. 48, pp. 503-512, 2016

WANG, B.; ACHU, I.; NISTOR, M.; LIU, J. Determination of methane yield of cellulose using different experimental setups. Water Science & Technolog, v. 70.4, p. 927-933, 2014.

WANG, B. Factors that Influence the Biochemical Methane Potential (BMP) Test: Steps towards the Standardisation of BMP Test. Biotechnology, Lund University, 57, 2016.

WANG, S; JENA, U; DAS, K. C.; Biomethane production potential of slaughterhouse waste in the United States. *Energy Conversion and Management*. v 173, p. 143-157, 2018.

WANG, S; HAWKINS, G. L., KIEPPER, B. H., DAS, K. C.; Treatment of slaughterhouse blood waste using pilot scale two-stage anaerobic digesters for biogas production. *Renewable Energy*. v. 126, p. 552-562, 2018.

WARE, A e POWER, N. What is the effect of mandatory pasteurization on the biogas transformation of solid slaughterhouse wastes? *Waste Management*. v. 48, pp. 503-512, 2016

WATERHOLM, M.; CASTILLO, M.D.P.; CHAN ANDERSSON, A.; JAHRE NILSEN, P.; SCHNURER, A. Effects of thermal hydrolytic pre-treatment on biogas process efficiency and microbial community structure in industrial- and laboratory-scale digesters. *Waste Management*, v. 95, pp. 150-160, 2019.

WU, D.; LI, L.; PENG, Y.; YANG, P. PENG, X.; SUN, Y.; WANG, X. State indicators of anaerobic digestion: A critical review on process monitoring and diagnosis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 148, 2021.

ANEXO I - Procedimento para realização dos testes de estanqueidade do Sistema de Fermentação em Batelada do Laboratório de Biocombustíveis do IEE/ USP

Responsável pela elaboração do procedimento: Júlia Ferrarese, Paulo Roberto Silva e Paulo Moreira

Procedimento para realização dos testes de estanqueidade do Sistema de Fermentação em Batelada do Laboratório de Biocombustíveis do IEE/ USP

1. Introdução

O biogás é um dos produtos da decomposição anaeróbia (ausência de oxigênio gasoso) da matéria orgânica, que se dá através da ação de determinadas espécies de bactérias. É uma mistura de gases incolor contendo 50 a 70% de Metano (CH₄), 25 – 50% de Dióxido de carbono (gás carbônico, CO₂) e traços de outros gases como: Hidrogênio (H₂), Gás sulfídrico (H₂S), Oxigênio (O₂) e Nitrogênio (N₂) (CETESB, 2021).

Para a realização de ensaios para determinação do potencial metanogênico de diferentes substratos, é necessário assegurar que o sistema seja hermético para que não haja vazamentos e garantir que o ambiente permaneça anaeróbio. Por ser um gás incolor, não é possível ver quando há vazamentos de biogás. Segundo a Comgás (2021), uma maneira de verificar se há vazamentos em um sistema de gás, é utilizar uma esponja com água e sabão ou detergente nas conexões. Se surgirem bolhas, há vazamento, porém em escala laboratorial, nem sempre o operador consegue perceber o vazamento de gás utilizando apenas esse método.

Dessa forma, foi desenvolvido um procedimento para verificar vazamentos no sistema de fermentação em batelada do Laboratório de Biocombustíveis do IEE/ USP.

2. Objetivo

Padronizar a realização de testes no sistema de fermentação em batelada para minimizar erros de medição na produção de biogás e evitar qualquer tipo de vazamento de gás que possa haver no sistema causando desvios e variações entre os ensaios.

3. Materiais:

Os materiais necessários para a realização dos testes estão descritos abaixo:

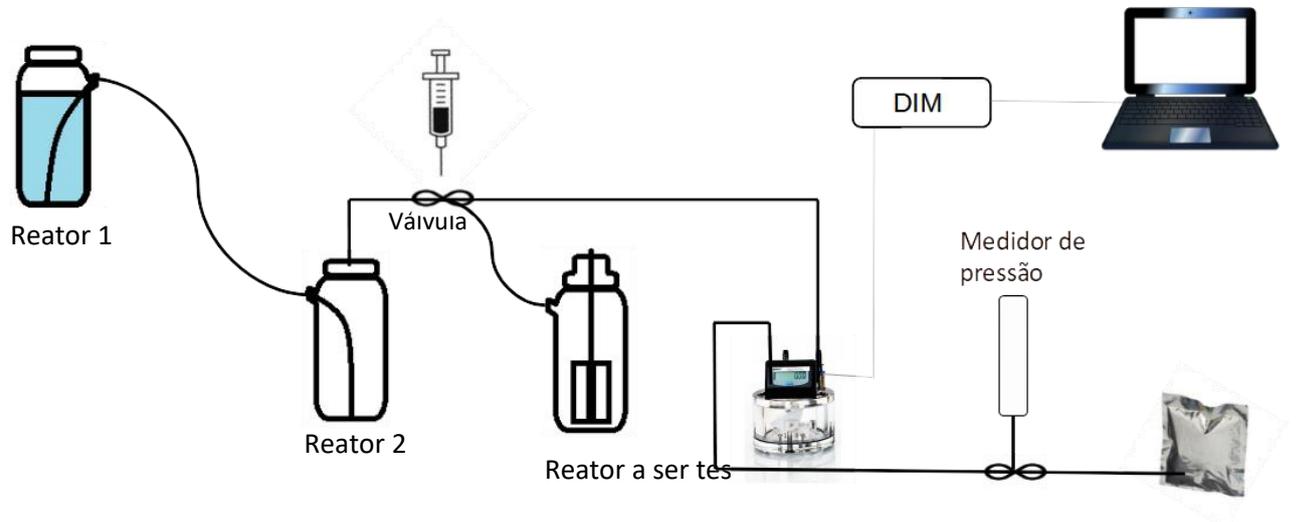
- 2 frascos reatores, um contendo água e outro, hermeticamente vedado, sem água.
- Mangueira/ tubo de PVC Cristal com espessura 5/16"
- Válvula de 3 vias
- Mangueira/ Tubo de silicone
- Seringa
- Conjunto a ser testado (frasco reator com tampa, mangueiras e milligascounter)
- Balde com água
- esponja
- sabão

4. Métodos:

O frasco reator a ser testado, assim que fechado com a tampa e a mangueira, deve ser mergulhado em um balde com água de forma a cobrir todas as junções. Com o auxílio de uma seringa, deve-se injetar ar dentro do reator para verificar se há formação de bolhas. Caso perceba que há formação de bolhas, verificar se o reator está bem fechado e repetir a operação anterior até verificar que não há vazamentos.

Para o teste de estanqueidade do conjunto, o ensaio consiste na montagem de um sistema fechado e utilizando o conjunto a ser testado conforme demonstrado na figura 1. O reator 1, preenchido com água, é então colocado num nível mais alto e conectado por uma mangueira ao reator 2, que está hermeticamente fechado. Caso o deslocamento de líquido não se inicie automaticamente, com o auxílio de uma seringa com o embolo abaixado e acoplado na válvula, sugar o ar do sistema para que o líquido seja deslocado lentamente para o reator 2 e o ar contido no vaso é deslocado pelo sistema passando pelo contador de gás que irá contabilizar o volume. Entre a saída do contador de gás e a bag de armazenamento, é colocado um medidor de pressão por arduino com a finalidade de verificar se há vazamentos. O software Rigamo registrará o volume de gás que passa pelo contador ao longo do tempo.

Figura 1: Esquema para a realização do teste de estanqueidade do sistema de fermentação em batelada



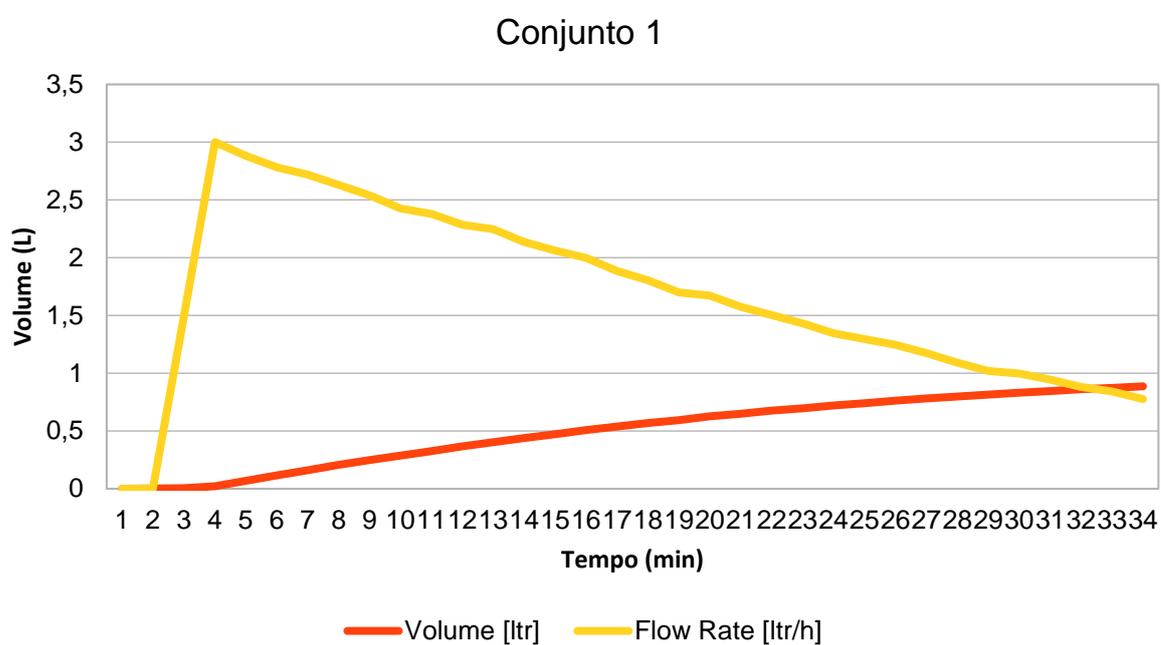
5. Referencias:

CETESB, 2021 <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>>. Acesso em: 10 de maio de 2021.
COMGÁS, 2021 <<https://www.comgas.com.br/para-seu-negocio/dicas-de-economia-e-seguranca/seguranca-suspeita-de-vazamento/>>. Acesso em: 10 de maio de 2021.

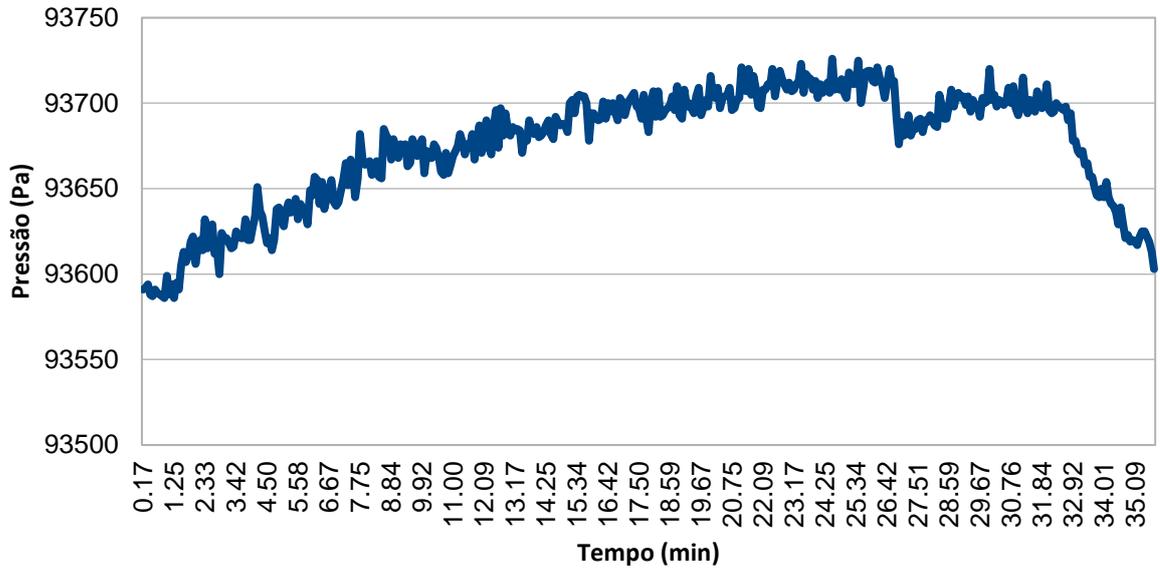
ANEXO II – Gráfico dos testes de estanqueidade realizados nos conjuntos utilizados no ensaio BMP

Relatório teste estanqueidade

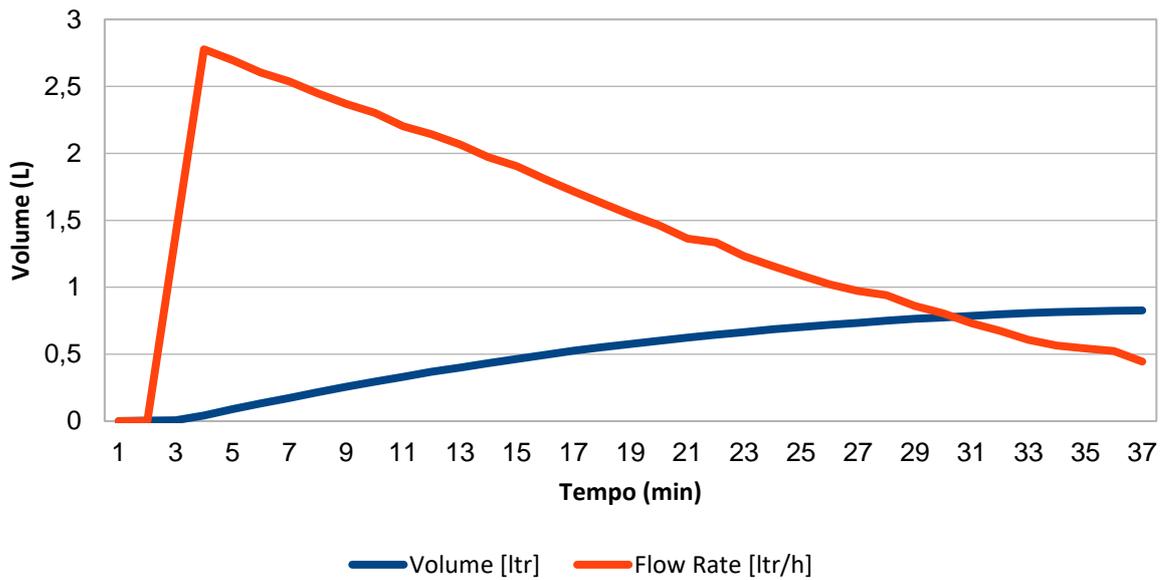
Foram realizados os testes de estanqueidade conforme o procedimento desenvolvido no laboratório de biocombustíveis do IEE para todos os conjuntos a serem utilizados para a realização do ensaio de BMP. Abaixo o gráfico do registro do software Rigamo (volumex tempo) e do arduino (pressão x tempo) para cada um dos conjuntos testados.



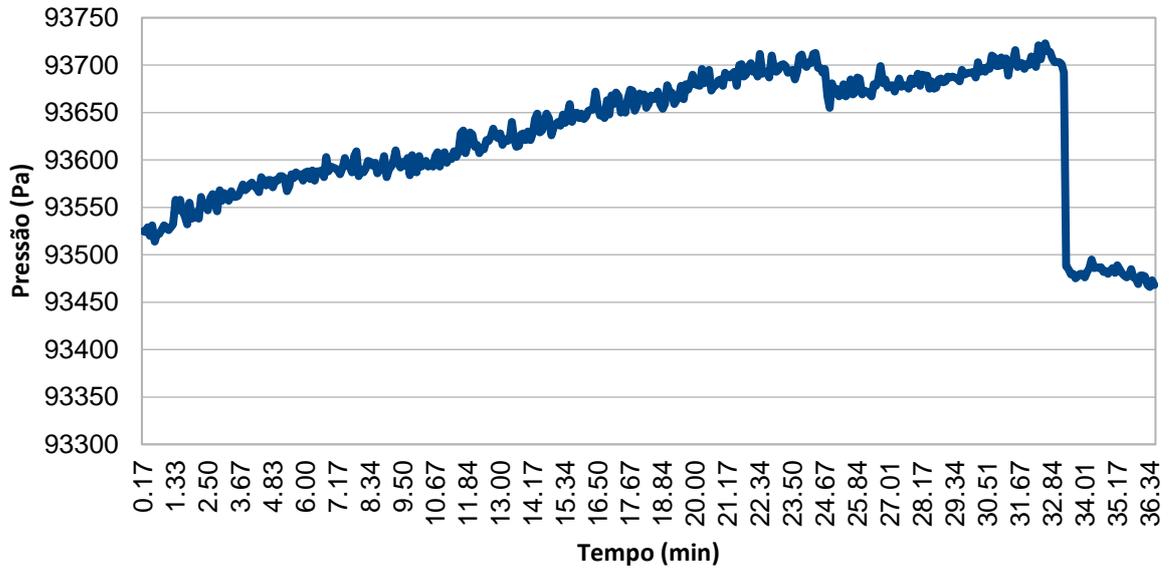
Conjunto 1 - arduino



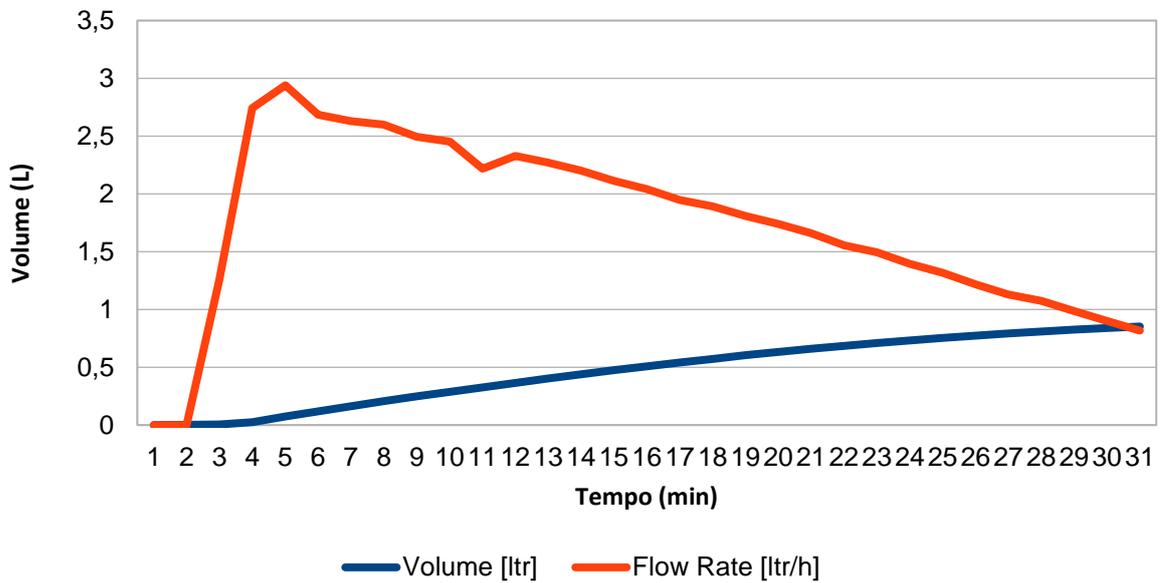
Conjunto 2



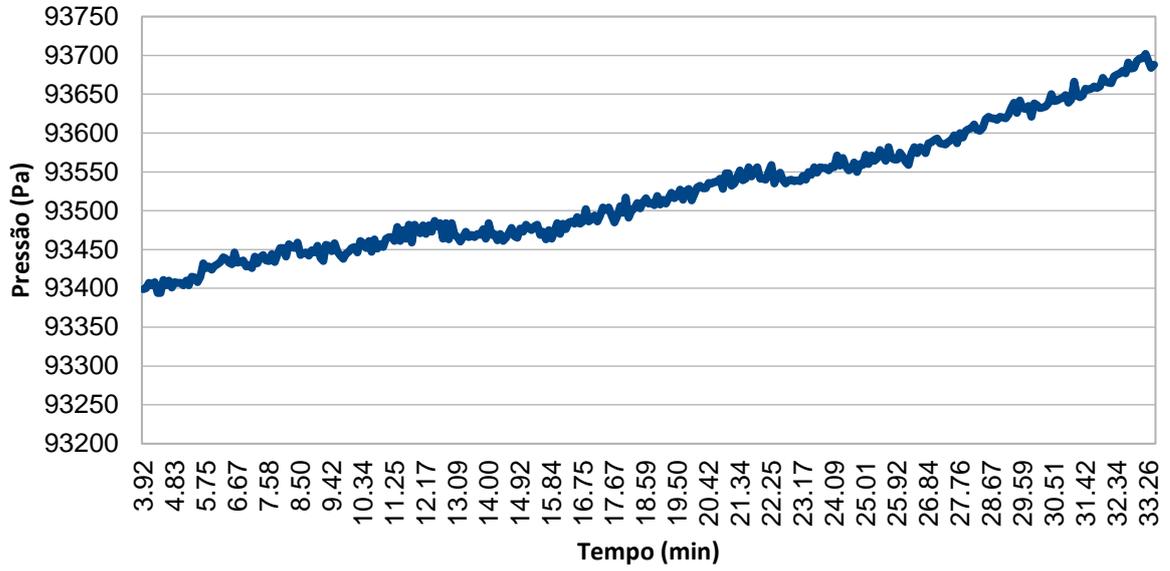
Conjunto 2



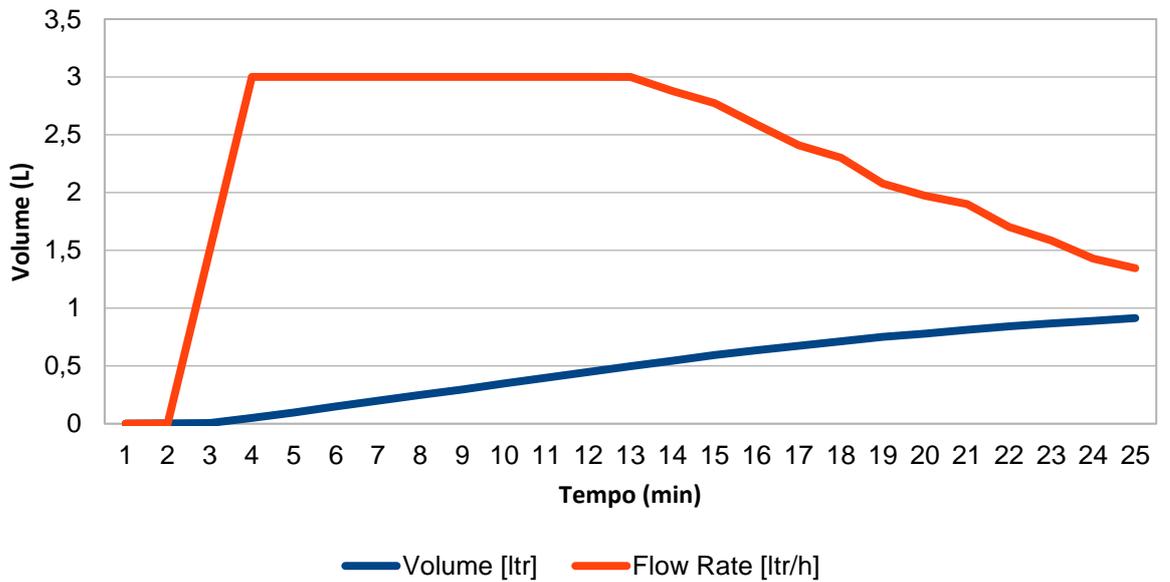
Conjunto 3

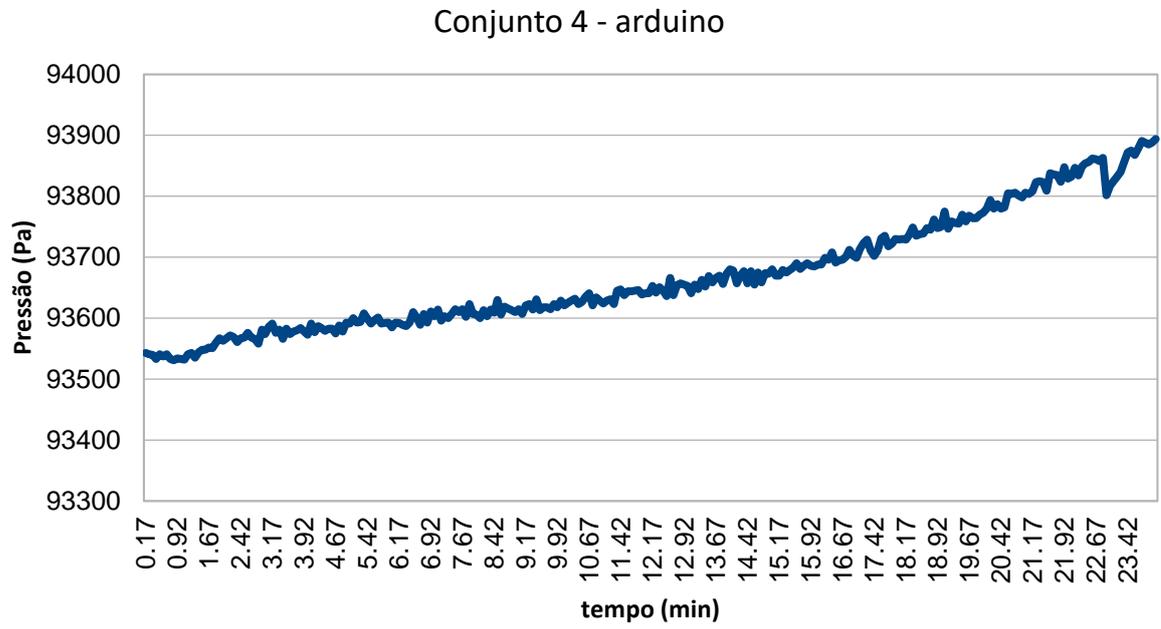


Conjunto 3

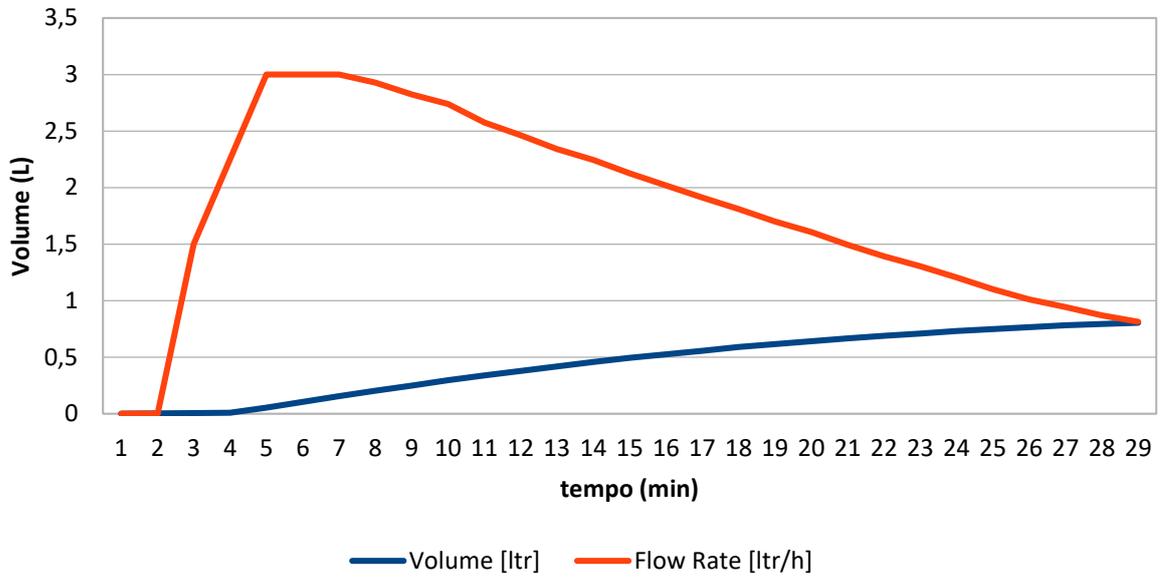


Conjunto 4

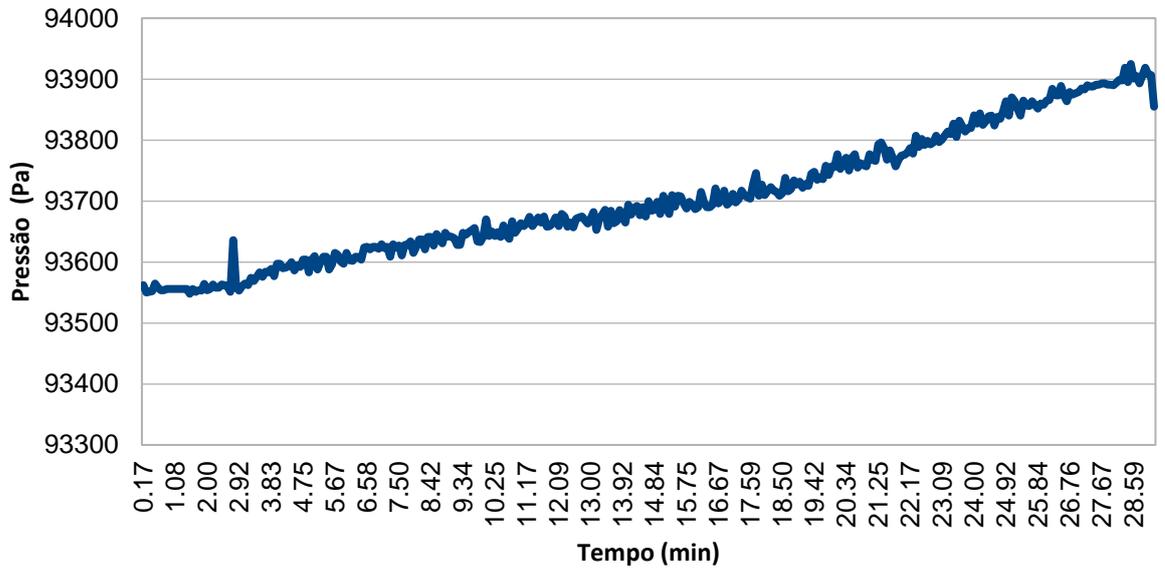




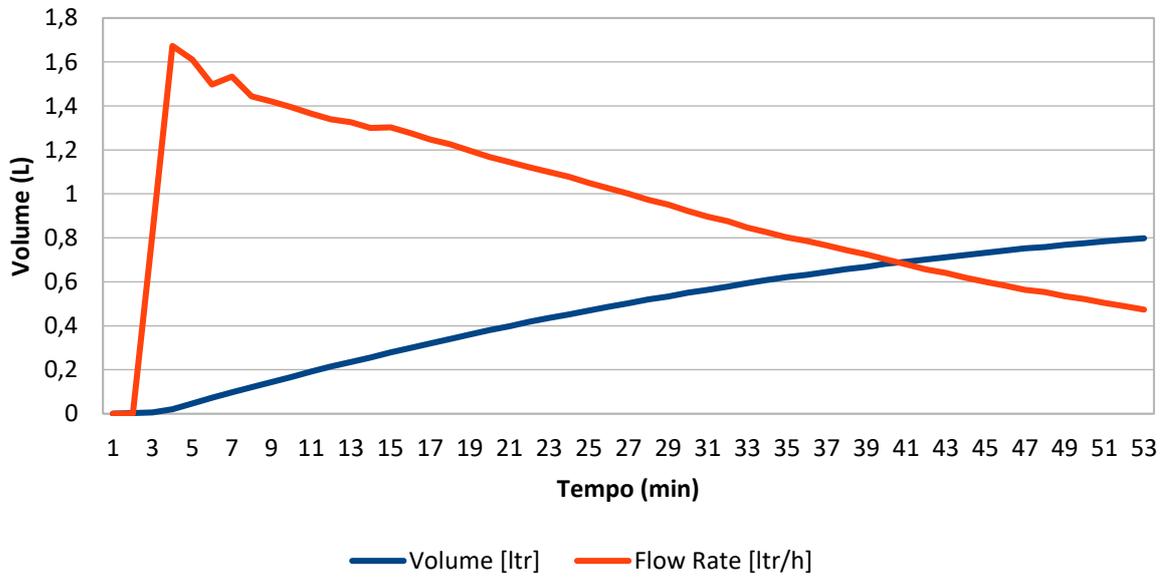
Conjunto 5



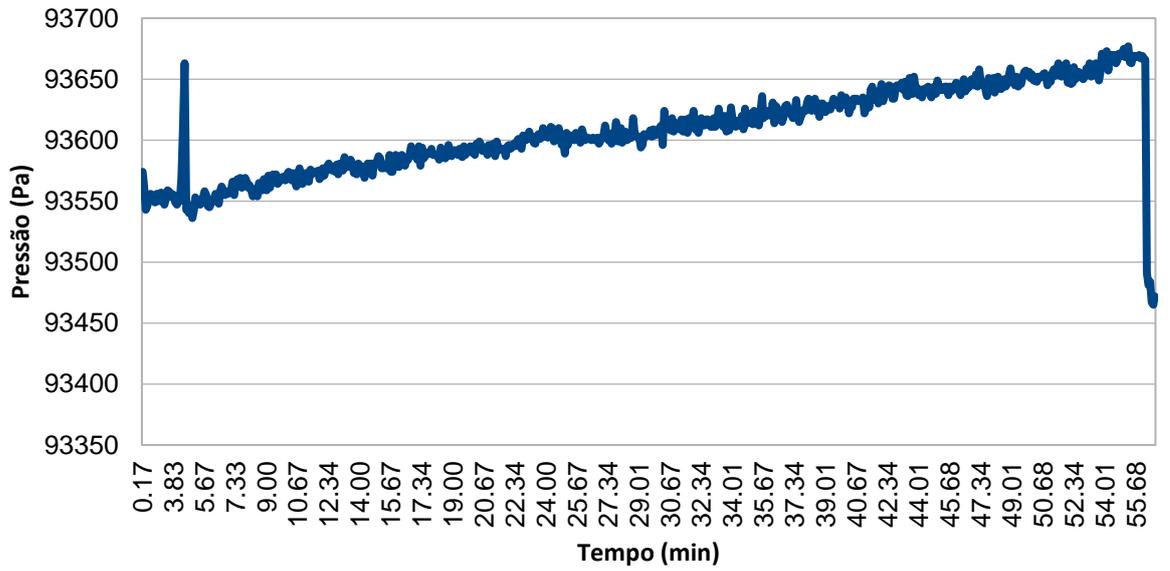
Conjunto 5 arduino



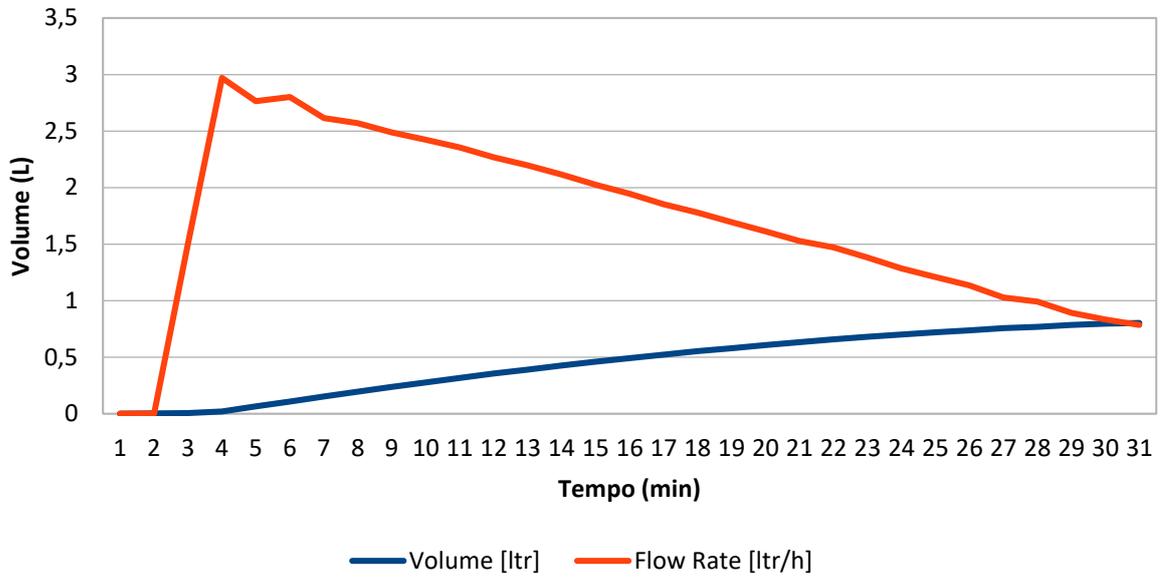
Conjunto 6



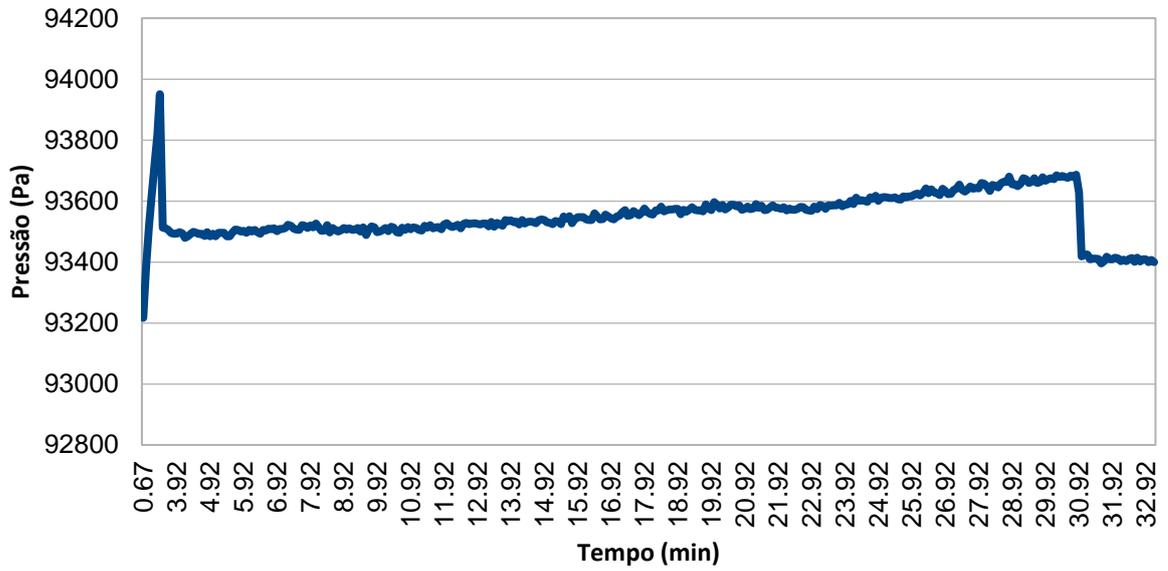
Conjunto 6 - arduino



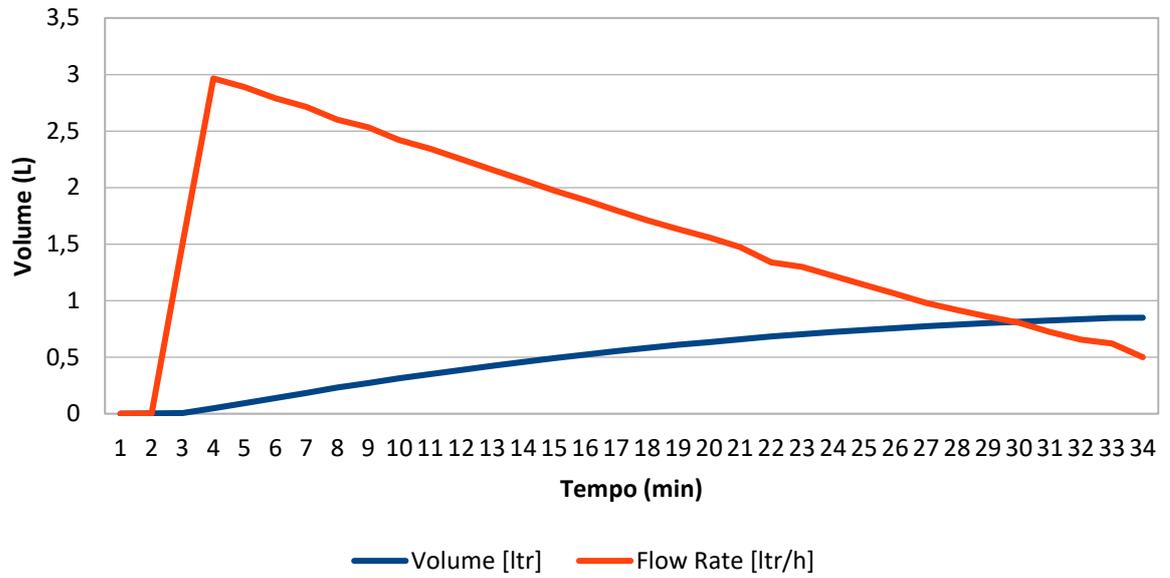
Conjunto 7



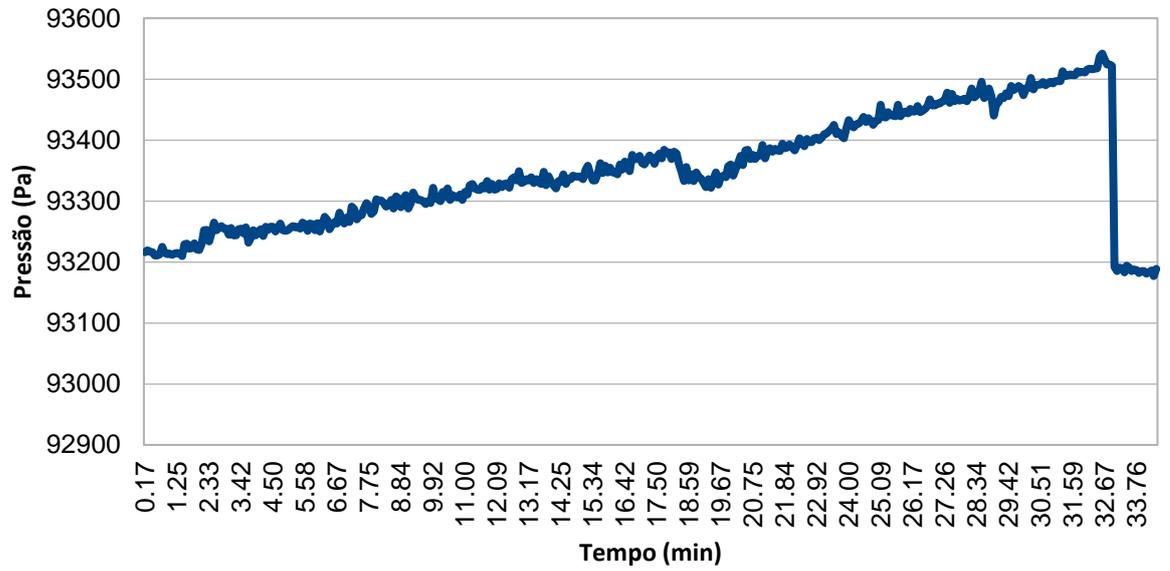
Conjunto 7- arduino



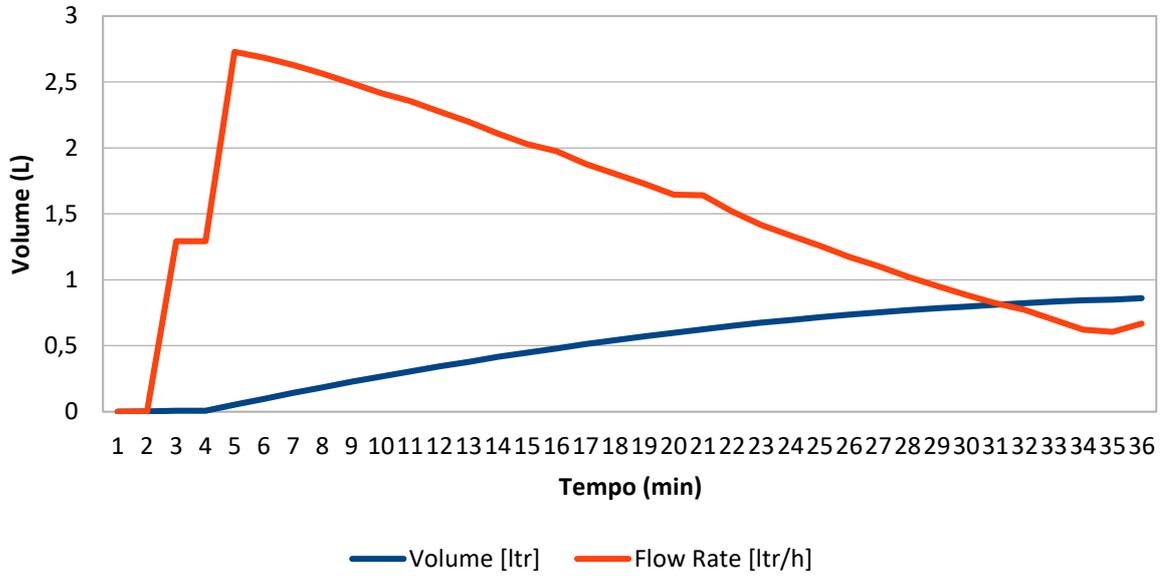
Conjunto 8



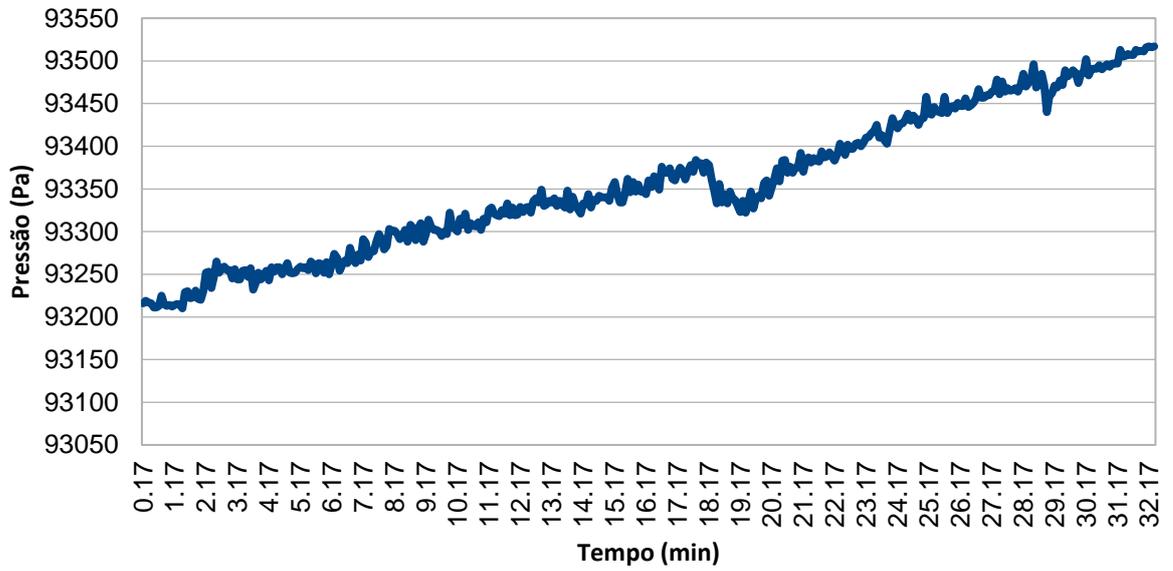
Conjunto 8 - arduino



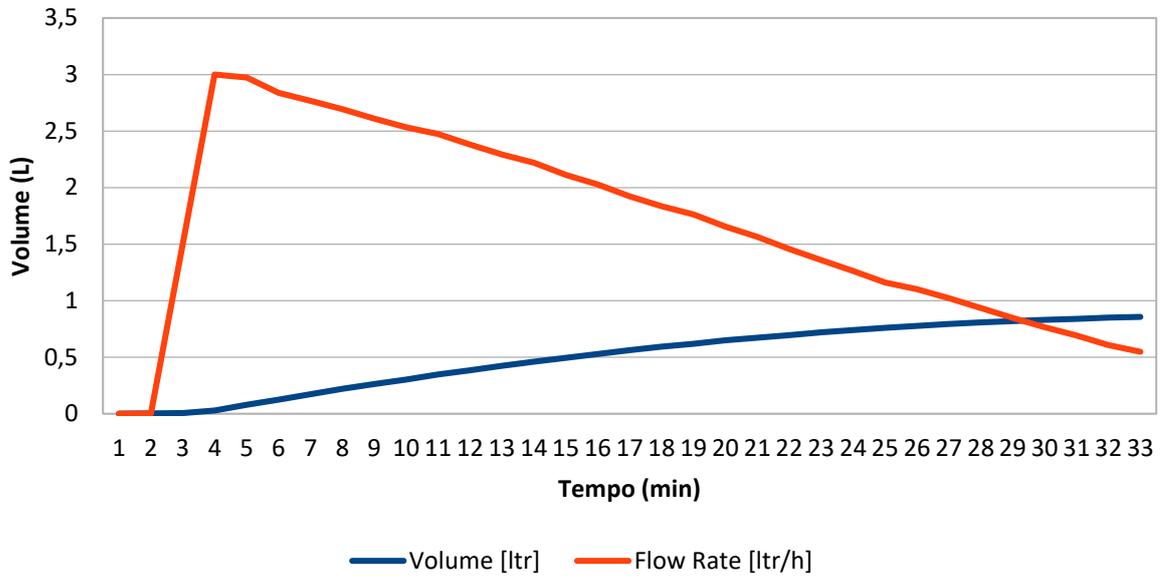
Conjunto 9



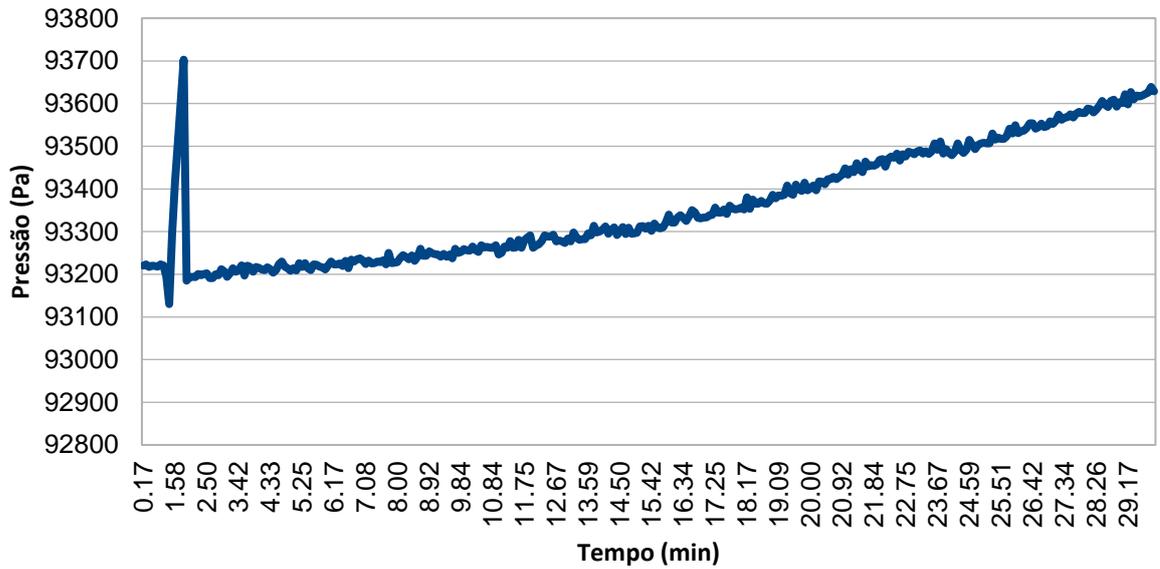
Conjunto 9 - arduino



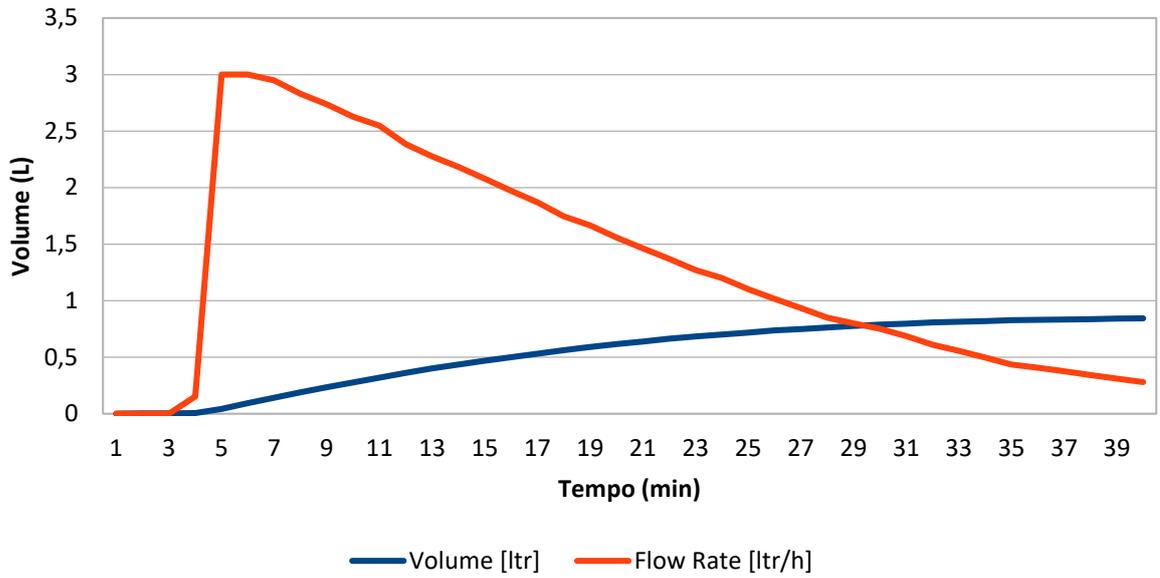
Conjunto 10



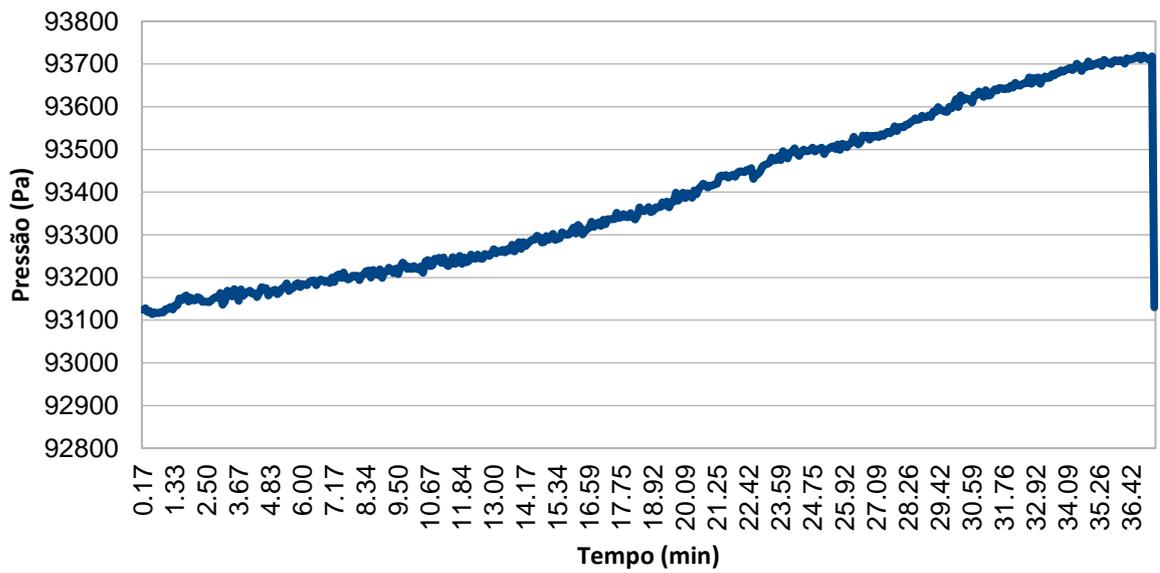
Conjunto 10 - arduino



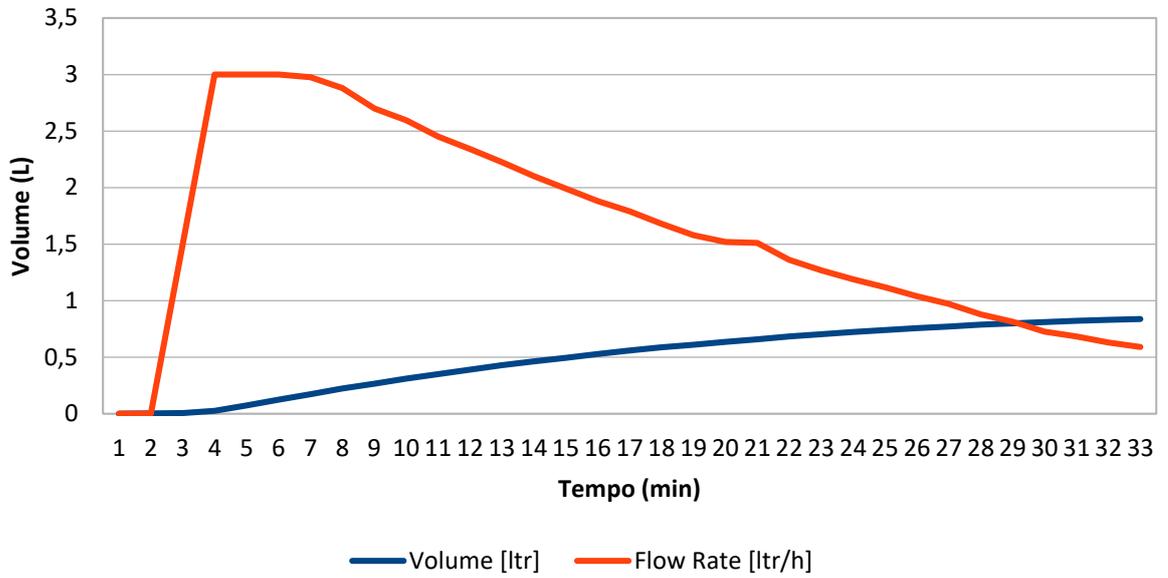
Conjunto 11



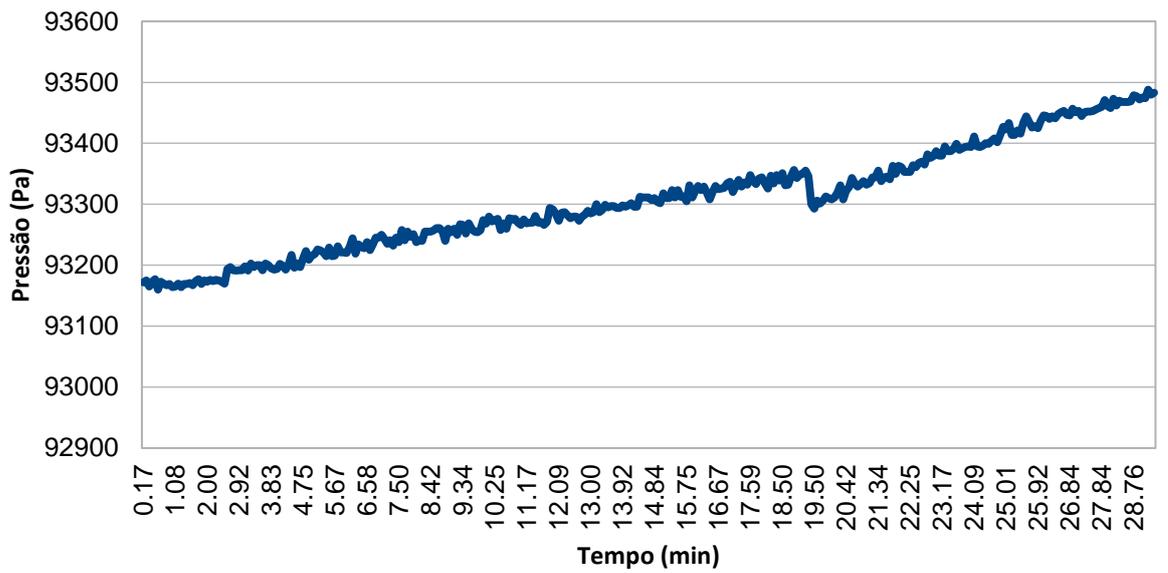
Conjunto 11 - arduino



Conjunto 12



Conjunto 12 - arduino



Anexo III – Orçamento Rastro e ERBR para implantação do biodigestor com sistema de cogeração

Boa tarde Julia!

Agradecemos o seu contato. Tendo como base as suas informações temos que considerar que a produção de biogás será em torno de 4 m³/h a 6 m³/h. Faremos a seguir as considerações necessárias com relação as informações solicitadas:

ENERGIA:

Para baixas potências a ERBR industrializa somente o motores MWM para operação com biogás, neste caso o menor grupo gerador recomendado é o modelo GMWM50 com 50kVA produzindo 32kW em operação contínua em geração distribuída de energia ou atendendo um grupo específico de cargas.

-

Operação:

- Biogás com 65% de metano: Grupo gerador de 50 kVA consome 20 Nm³/h o permite um operação em torno de 5 hrs a 7hrs... conforme disponibilidade de biogás.

Investimentos - Estimativas: custos ERBR

- Grupo gerador GMWM050 50 kVA / 32 kW em operação contínua: R\$ 160.000,00
- Pannel de proteção para geração distribuída: R\$ 35.000,00 (dentro das especificações da concessionária de energia para microgeração);
- Trocador de calor Casco Tubo (INOX) cogeração de energia térmica com aproveitamento dos gases do escapamento (controle manual sem automação): R\$ 35.000,00;
- Sistema biológico para tratamento do H₂S - Injeção de ar atmosférico dentro do biodigestor (controle manual sem automação): R\$ 12.000,00

BIODIGESTOR:

As empresas fornecedoras de biodigestores se recusaram a fornecer um orçamento sem um projeto técnico mais detalhado, desta forma buscamos as referências de preços com profissionais que realizam as instalações e manutenções em biodigestores.

Investimentos - Estimativas: Cobertura das lagoa custos de mercado

- Utilizando PEAD: R\$ 27,00 o m² já considerando a instalação;
- utilizando PVC: R\$ 55.00 o m² já considerando a instalação;

<https://mail.google.com/mail/u/0/?ik=83688006c3&view=pt&search=all&permmsgid=msg-f%3A1718430464409829375&siml=msg-f%3A171843...> 1/2

08/03/2022

E-mail de Universidade de São Paulo - Implantação de sistema de lagoas cobertas abatedouro de bovinos

Esperamos ter contribuído de alguma forma com seu trabalho. Continuamos a disposição para ajudá-la e os esclarecimentos que se fizerem necessários.

Atenciosamente,



Razão Social: G V PATRICIO – ME
 Av. Franklin Roosevelt 574, Jardim Alvorada – Maringá/PR.
 Fone: +55 (44) 3301-9014 / 9 9707-7969
 CNPJ: 15.621.239/0001-56



Solução completa para Biodigestão



PROPOSTA COMERCIAL

Contratante:	Afrisul Frigorífico	Nº 11-2022
Cidade:	Itabuna - BA	Data: 17/02/2022
Tipo Obra:	Readequação lagoa anaeróbia e cúpula para capturado biogás	Rev:
Local Obra:	Itabuna - BA	

Contato(s):	Sr Ildo Sauer
Telefone:	

<p>Prezado Sr(es):</p> <p>Em primeiro lugar é uma honra poder atendê-los e desde já agradecemos pela oportunidade de apresentar nossa proposta comercial e estamos a disposição para esclarecimento de eventuais dúvidas. Vale ressaltar que com a instalação do biodigestor, a indústria/propriedade possuirá um efluente com cargas orgânicas, DBO e DQO reduzidas logo na saída do biodigestor, podendo utilizá-lo como um ótimo biofertilizante, rico em N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio); aumentando significativamente a produção em pastos e/ou lavouras.</p> <p>Com a produção de biogás provenientes do biodigestor a indústria possuirá também um biocombustível renovável que poderá utilizá-lo para geração de energia elétrica em grupos geradores a biogás, ou para geração de energia térmica, realizando a inserção do biogás em caldeira afim de substituir a biomassa consumida; além de outros benefícios como por exemplo a eliminação de odores provenientes da decomposição de matéria orgânica.</p>
--

1- Proposta
Implantação de cúpula para captura de biogás em biodigestor pré existente; com resíduos oriundos do abate de bovinos

2- Materiais para construção do biodigestor.
Não inclusos.

3- Validade Proposta:
07 dias

4- Observações a considerar:
A equipe iniciará mobilização/desmobilização somente após a assinatura e retorno desta proposta comercial.

5 - Escopo de fornecimento SERVIÇOS
5.1 - Estudo de implantação do biodigestor
5.2 - Instalação das entradas e saídas de efluentes nas lagoas
5.3 - Termofusão e ancoragem das geomembranas de cobertura do biodigestor
5.4 - Instalação de 100 m de gasoduto em pvc.

5.5 - Instalação de válvula borboleta on/off no fim do gasoduto.	
5.6 - Acompanhamento técnico sobre o biodigestor durante 3 meses (exceto despesas com viagem).	
5.7 - Deslocamento, hospedagem e alimentação da equipe que estará realizando a obra.	
5.8 - Implantação de viga baldrame para ancoragem da geomembra de cobertura de biodigestor.	
5.9 - Projeto do biodigestor com fornecimento de ART de projeto e execução através do registro da Rastro (PJ) junto ao CREA PR.	
6 - Valores:	
6.1 - Projeto e execução	R\$ 196.939,08
Valor referente a implantação do biodigestor, estando incluso os serviços descritos no item 5.	
ACESSÓRIOS DE APRIMORAMENTO DO SISTEMA	
6.4 - Sistema de alívio de pressão do biodigestor (Flare)	R\$ 75.000,00
Equipamento necessário para a segurança do biodigestor, caso o mesmo atingir pressão de risco, o flare é acionado realizando a combustão do biogás excedente. Características do flare:	
<ul style="list-style-type: none"> ● Acendimento automático com programador de partida ● Automação do equipamento através de CLP com IHM ● Monitoramento e transmissão da pressão do biodigestor através de sensor de pressão digital ● Eletrodo de faísca inteligente para start da combustão ● Sistema de corte do biogás através de válvula com atuador eletropneumático e lâmpada fotocélula detectora de chama ● Mini compressor de ar para alimentação exclusiva da válvula eletropneumática ● Ventilador centrífugo para sucção do biogás do biodigestor e recalque ao flare. ● Capacidade de combustão: 5.000 m³/dia 	
7 - Condições para pagamento:	
7.1 - Todos os itens podem ser parcelados via consórcio com empresa parceira da Rastro, com atuação em âmbito nacional. Prazos e taxas atrativas;	
7.2 - Todos os itens podem passar por negociação direta com a Rastro.	
8 - Itens excluídos desta proposta	
<ul style="list-style-type: none"> ● Cercas de proteção; ● Linha de efluente, fábrica até as lagoas; ● Linha emissário de efluentes até o corpo receptor; ● Licenciamento ambiental do empreendimento; ● Confeção de drenos de líquidos e gases; ● Terraplanagem; ● Drenagem de águas pluviais; ● Instalações elétricas. 	

● Obras em alvenaria.		
9 - Impostos/NF		
		Inclusos
10- Prazo Obra:		
10.1 - Execução biodigestor	35 dias	Caso ocorra chuvas acrescentar 2 dias para cada dia chuva.
11- Responsabilidades e obrigações da contratante:		
11.1 - Fornecer condições favoráveis para realização do trabalho no local desimpedido de quaisquer obstáculos para que seja realizada a obra;		
11.2 - Fornecer energia 220V ou gerador de 10 KVA;		
11.3 - Fornecer materiais conforme necessidade da obra, descritos no Formulário "Materiais para Execução da Obra" após levantamento in loco;		
11.4 - Fornecer a terraplanagem das lagoas integrantes do sistema.		
11.5 - Realizar esgotamento/drenagem de águas ocasionados por chuvas ou outras situações;		
11.6- Fornecer locais de sanitários e vestiários limpos usáveis e acessíveis para equipe que estiver realizando a obra;		
12- Responsabilidades e obrigações da contratada:		
12.1 - Enviar equipe técnica capacitada a realizar todas as instalações pertinentes a implantação do biodigestor;		
12.2 - Dispor da máquina específica e necessária para realização das termofusões nas geomembranas;		
12.3 - Emitir relatório de vistoria e entrega obra;		
12.4 - Entrega do Check List responsabilidades do Contratante para o correto e bom desempenho do biodigestor;		
12.5 - Treinamento dos funcionários de confiança da CONTRATANTE que ficarão responsáveis pelo acompanhamento do biodigestor.		
12.6 - Emissão de Nota Fiscal de prestação dos serviços;		
13- Observação(s):		
13.1 - Os materiais utilizados para execução da obra são de responsabilidade da Contratante;		
13.2 - Esta proposta não contempla obras de terraplanagem para confecção das lagoas.		
13.3 - Não incluso inóculo para o biodigestor, caso seja necessário.		
13.4 - A estimativa de geração de biogás, é de: 3.167 Nm ³ /dia, considerando DQO de 46.400 mg/l , volume de efluente de 227.5 m ³ /dia e eficiência de remoção de 60%.		



