

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DE ENERGIA ELÉTRICA
A PARTIR DO BIOGÁS: ESTUDO DE CASO EM UMA
FAZENDA LEITEIRA**

BEATRIZ PEREIRA DA COSTA

Brasília, 07 de julho de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

**INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DE ENERGIA ELÉTRICA
A PARTIR DO BIOGÁS: ESTUDO DE CASO EM UMA
FAZENDA LEITEIRA**

BEATRIZ PEREIRA DA COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

Prof.^a Sandra Maria da Luz (ENM/UnB)
(Orientador)

Prof. Edgar Amaral Silveira (ENM/UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Thiago Oliveira Rodrigues (ENM/UnB)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, 07 de julho de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, BEATRIZ PEREIRA

Inventário do ciclo de vida de energia elétrica a partir do biogás: estudo de caso em uma fazenda leiteira.

[Distrito Federal] 2023.

xi, 61 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2023)

Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Biogás

2. Inventário do Ciclo de Vida

3. Esterco

4. Eletricidade

ENM/FT/UnB

II. ENM.DM-07/2023

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, B.P., (2023) Inventário do ciclo de vida de energia elétrica a partir do biogás: estudo de caso em uma fazenda leiteira. Dissertação de mestrado, Publicação ENM.DM-07/2023, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 61 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Beatriz Pereira da Costa.

TÍTULO: Inventário do ciclo de vida de energia elétrica a partir do biogás: estudo de caso em uma fazenda leiteira.

GRAU: Mestre

ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Beatriz Pereira da Costa
Rua Ophir José Braz.
72.800-150 Centro, Luziânia – GO – Brasil.
E-mail: biapereirac@gmail.com

“Quem se arrisca a andar por ares nunca antes respirados ou pensar fora da curva tem grandes chances de encontrar pedras no caminho. No entanto, ninguém é digno de contribuir para a ciência se não usar suas dores e insônias nesse processo. Não há céu sem tempestade. Risos e lágrimas, sucessos e fracassos, aplausos e vaias fazem parte do currículo de cada ser humano, em especial daqueles que são apaixonados por produzir novas ideias.”
(Augusto Cury)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por guiar-me e escutar todos os meus questionamentos, por tanta força e sabedoria nessa caminhada tão difícil.

À minha família, em especial os meus pais Lucimar e Osório, por todo amor, cuidado, compreensão, carinho e suporte. Aos meus irmãos, Mariana, Wesley e Gigi por todo o companheirismo e contentamento. A minha cunhada Yasmin e minha madrastra Regina por completarem nossa família trazendo mais amor.

Ao meu eterno amigo Gustavo Alves por ter me incentivado tanto durante anos a seguir meu sonho de me tornar mestra, hoje ele não se encontra mais aqui, sei que este também era seu sonho, muitas vezes pensei em desistir, mas segui firme, pois era mais que uma vitória minha, ela é sua Gu, nunca te esquecerei, obrigada por tanto.

Ao meu amor, Luan Zaffari que mesmo antes de sermos namorados me ajudou nos momentos difíceis me dando apoio, revisando meus textos e sempre me ajudando a não desistir dos meus sonhos.

Aos meus amigos, Amanda, Gabi, Lorena, Kaian, Géssica, Júlia e Sabrina por todas as conversas, conselhos, descobertas, respeito e amizade durante essa jornada. Sou extremamente grata por todas as trocas que tivemos.

A todos os meus colegas de trabalho, em especial ao meu ex-líder Antonially, por todo apoio e ajuda, sendo flexível com meus horários me permitindo conciliar meu trabalho com a pesquisa. Ao Denner por todas as vezes que transmitiu conhecimento da sua área para incrementar no meu estudo. Agradeço também ao Afonso, Lucas, Ravel, Naiara, Brígida, Ana Paula por ter feito meus dias mais alegres e apoiarem quando conquistava cada pequena vitória.

À minha orientadora Sandra Luz e à mestra Maria dos Reis pelas reflexões e sugestões que com certeza contribuíram muito para a realização deste trabalho. Agradeço também pela paciência, dedicação e prazer em dividir os seus conhecimentos.

A fazenda saia velha, em especial Davi Paludo, por abrir as portas de sua empresa para a coleta de dados e realizar estudos, contribuindo com a pesquisa nacional.

À Universidade de Brasília por tornar o meu sonho e dos meus pais possível.

À Capes, CNPq e FUNDEP pelo suporte financeiro ao programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

RESUMO

A gestão de resíduos agrícolas e industriais é necessária para mitigar a poluição ambiental resultante do manejo de animais. Neste contexto, os resíduos dessa atividade podem ser utilizados para geração de energia, tornando um substrato com alto potencial poluidor ao meio ambiente em produto com maior valor agregado, como o biogás. A metodologia consolidada da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode quantificar os impactos ambientais desses processos que vão desde a origem do resíduo, até a produção e uso do biogás, que tem um potencial energético significativo, podendo fornecer informações sobre eventuais gargalos na produção. Dentro das fases da ACV, a coleta de dados de inventário, dados de entrada e saída, definição das fronteiras e unidade funcional são pontos que devem ser definidos de maneira detalhada antes da construção do modelo. Quanto mais detalhado for o inventário, maior será a precisão de tomadas de decisão acerca dos processos analisados. Desta forma, o presente estudo utilizou as normas ISO 14040 e 14044, com objetivo elaborar um Inventário do Ciclo de Vida (ICV) da produção de biogás para geração de energia elétrica, utilizando o esterco do gado leiteiro como matéria-prima. A elaboração do ICV se deu por meio da coleta de dados locais em uma fazenda, em Goiás, com atividades voltadas para a bovinocultura leiteira e com produção própria de biogás. Os resultados do ICV mostraram dados locais da produção diária de dejetos, biogás, eletricidade e coprodutos, onde 11,1915 kg de dejetos, geram 0,65612 Nm³ de biogás, fornecendo 1 kWh de energia elétrica, adotada como unidade funcional neste trabalho, com reutilização dos coprodutos, que incluem o resíduo sólido e biofertilizante. Também foram estimadas e comparadas as emissões manejo do esterco e do motor a biogás, utilizando dados da literatura. Além de apresentar uma economia financeira de 95% por kWh, o uso do biogás proporcionou emissões menores comparadas ao uso de diesel, ressaltando sua importância e funcionalidade como fonte de energia elétrica.

Palavras-chave: biogás, esterco bovino, inventário do ciclo de vida, eletricidade.

ABSTRACT

Agricultural and industrial waste management is necessary to mitigate environmental pollution resulting from animal handling. In this context, the waste from this activity can generate energy, turning a substrate with a high potential for polluting the environment into a product with more excellent added value, such as biogas. The consolidated methodology of the Life Cycle Assessment (LCA) can quantify the environmental impacts of these processes, ranging from the origin of the waste to the production and use of biogas, which has a significant energy potential and can provide information on possible bottlenecks in production. Within the phases of the LCA, the collection of inventory data, input and output data, the definition of boundaries, and functional units must be defined in detail before building the model. The more detailed the inventory, the greater the accuracy of decision-making about the analyzed processes. Thus, the present study used the ISO 14040 and 14044 standards for making the Life Cycle Inventory (LCI). Therefore, this study aims to develop a LCI of biogas production for electricity generation, using dairy cattle manure as raw material. The elaboration of the ICV took place through the collection of local data on a farm with activities focused on dairy cattle and its biogas production. The results of the LCI showed local data on the daily production of waste, biogas, electricity, and co-products, where 11.1915 kg of waste generate 0.65612 Nm³ of biogas, providing 1 kWh of electricity, adopted as a functional unit, with reuse of co-products, which include solid waste and biofertilizer. Manure management and biogas engine emissions were also estimated and compared using data from the literature. In addition to presenting financial savings of 95% per kWh, biogas provided lower emissions compared to diesel, highlighting its importance and functionality as a source of electrical energy.

Keywords: biogas, manure, life cycle inventory, electricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Repartição da Oferta Interna de Energia 2021 (EPE, 2022).....	15
Figura 2. Repartição da oferta de “Outras renováveis” (EPE, 2022).	16
Figura 4. Fases da digestão anaeróbia.....	21
Figura 5. Estrutura da ACV, (ABNT,2001).....	23
Figura 6. Fazenda Saia Velha localizada em Luziânia- GO.....	31
Figura 7. Digrama do processo produtivo da fazenda saia velha. Adaptado de Nishimura, 2009.....	32
Figura 8. Manejo do esterco. A: Galpão onde os animais habitam; B: pistas onde é despejado os dejetos.	33
Figura 9. Pré-tratamento da matéria prima. A: Tanque de homogeneização; B: motor separador; e C: composto sólido usado como cama animal.....	33
Figura 10. Produção de biogás, A: tanque de armazenamento de biofertilizante; B: Biodigestor tipo lagoa.....	34
Figura 11. Filtração do biogás e produção de energia elétrica. A: filtro para biogás cru; B: Grupo gerador movido a biogás.....	34
Figura 12. Fluxograma envolvendo as etapas de produção do biogás e geração de energia elétrica.....	35
Figura 13. Consumo energético de cada processo para a obtenção de biogás pela fazenda Saia Velha. Dados em kWh.	43
Figura 14- Entradas de energia direta no processo produtivo.....	44
Figura 15- Entradas de energia indireta no sistema produtivo.	45
Figura 16- Saída de energia do sistema produtivo.....	45
Figura 17. Comparativo das emissões de CO e NOx dos motores a diesel e biogás da fazenda Saia Velha.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Metano e Biogás de diferentes fontes de biomassa (Khoshgoftar Manesh et al., 2020).....	19
Tabela 2. Composição do biogás (Lombardi & Francini, 2020; Sarker et al., 2020).....	22
Tabela 3- Estudos de ACV de biogás no mundo.	25
Tabela 4- Coeficientes energéticos energia direta.	38
Tabela 5- Coeficientes energéticos energia direta dos equipamentos e construções.....	39
Tabela 6. Inventário de Ciclo de Vida do manejo do esterco.	40
Tabela 7. Inventário de Ciclo de Vida do pré-tratamento.....	40
Tabela 8. Inventário de Ciclo de Vida da digestão anaeróbia.....	40
Tabela 9. Inventário de Ciclo de Vida da filtração do biogás cru.....	40
Tabela 10. Inventário de Ciclo de Vida da geração de energia elétrica.	41
Tabela 11- Consumo de energia direta e indireta.....	44
Tabela 12. Saídas de energia do sistema produtivo.	45

LISTA DE ABREVIATURA

ICV - Inventário do ciclo de vida

ACV - Avaliação do ciclo de vida

AICV- Avaliação do impacto do ciclo de vida

GEE - Gases de efeito estufa

DA- Digestão anaeróbia

UF- Unidade funcional

Fell -Fator de emissões de CH₄ - manejo esterco

FP- Fator peso

AH- Animais por hectares

AP- Área de pasto (ha)

TC- Tempo para coleta do esterco (ano)

FENexc- Fator de emissões de Nitrogênio excretado-manejo esterco

FEN₂O- Fator de emissão N₂O (Kg)

Ndepatam- Massa de nitrogênio depositada na atmosfera

Nex- Nitrogênio exportado por animal

PROCONVE- Programas de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

SUMÁRIO

1.	1
1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	BIOGÁS NO BRASIL	15
2.2	BIOGÁS E SUAS PRINCIPAIS FONTES.....	17
2.3	BIOMASSA E A DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	19
2.4	A AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	23
3.	METODOLOGIA.....	30
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.2	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	30
3.3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	31
3.3.1	Manejo e transporte do esterco	32
3.3.2	Pré-tratamento da matéria prima	33
3.3.3	Produção de biogás	33
3.3.4	Filtração do biogás e produção de energia elétrica	34
3.4	INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA.....	35
3.4.1	Cálculo emissões manejo do esterco.....	35
3.4.2	Vapor de água residual	37
3.4.3	Emissões motor a diesel	37
3.4.4	Emissões do biogás.....	38
3.4.5	Balanco energético	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	39
4.1.1	ICV consumo de energia elétrica	42
4.1.2	Balanco energético	44
4.1.3	ICV emissões do manejo do esterco	46
4.1.4	ICV emissões para o ar dos motores.....	46
5.	CONCLUSÕES.....	48
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira apresentou no ano de 2021, 44,7% da energia proveniente de fontes renováveis, dividida em Biomassa da cana, hidráulica, lenha e carvão, e outras renováveis. O biogás entra na repartição “Outras renováveis” que se subdivide em oito categorias de fontes de energia e obteve uma participação de apenas a 1,4%, dentro dessa repartição (CIBiogás, 2021).

Apesar de ainda representar uma parcela mínima dentro da matriz energética, essa energia teve um aumento de 16% no número de plantas em operação e 10% no volume de biogás produzido em 2021, em comparação ao ano anterior. Totalizando 2,3 bilhões de Nm³ de biogás produzido. Os estados que tiveram o maior número de plantas foram: Minas Gerais, Paraná, Goiás, Santa Catarina, São Paulo e Mato Grosso. Destacando a expansão deste biocombustível no país (CIBiogás, 2021).

Existem diversas formas de aproveitamento energético de biomassa, incluindo a produção de biocombustíveis como o biogás. Existem muitas fontes de biomassa ou matéria-prima utilizadas na produção de biogás, dentre elas, resíduos da produção agropecuária (suíno, bovinos de leiteiro e de corte, aves de corte e poedeiras), resíduos de processos agroindustriais, resíduos florestais, resíduos agrícolas, lodo de Estações de Tratamento de Esgoto e águas residuais; resíduos sólidos urbanos. Sendo assim, o primeiro passo para obtenção de biogás é a escolha da matéria-prima (GEF Biogás Brasil, 2022).

O potencial energético da biomassa do biogás nas agroindústrias não é muito explorado, o que traz uma relevante oportunidade de agregar valor à cadeia produtiva e de abordar as questões ambientais relacionadas a resíduos e efluentes agroindustriais (GEF Biogás Brasil, 2022).

O processo de digestão anaeróbia acontece em quatro etapas. Na primeira, os compostos de alta massa molecular são convertidos em monômeros por hidrólise. Na segunda, os monômeros são convertidos em ácidos graxos voláteis, como ácido acético e hidrogênio. Na terceira, hidrogênio e dióxido de carbono surgem como produtos pela ativação de ácidos graxos. A última etapa ocorre com as bactérias metanogênicas que produzem biogás (Khoshgoftar Manesh et al., 2020).

O biogás é constituído, dependendo de sua fonte, por cerca de 50–75% metano, 25–50% de dióxido de carbono, 1–2% de nitrogênio, 0–1% de hidrogênio, 0–2% de sulfeto de hidrogênio e 1% de oxigênio (Lombardi & Francini, 2020; Sarker et al., 2020).

Sendo assim, a produção de biogás é de grande relevância para a substituição dos combustíveis fósseis, onde apresenta um alto potencial energético devido a concentração de metano, como também o aproveitamento de resíduos agroindustriais, tornando uma alternativa viável para redução dos impactos ambientais, logo é uma solução eficaz para reciclagem de dejetos, produção de energia e redução das emissões dos gases do efeito estufa (BNDES, 2018; Li et al., 2020; Wu et al., 2020).

Um ponto importante a ser requisitado, são as informações detalhadas sobre a produção de biogás para avaliar os impactos do ciclo de vida. Essas informações podem ser levantadas usando a estrutura do inventário do ciclo de vida (ICV), que segue a estrutura da ISO 14040 (ABNT, 2009).

Há uma série de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida da produção de biogás, porém grande parte desses estudos são realizados fora do país, o que acarreta uma grande carência de dados primários do Brasil nesta categoria. Há um estudo brasileiro realizado por Bacenetti et al. (2016), onde estudou o processo produtivo de uma fazenda leiteira, utilizando a metodologia de avaliação de ciclo de vida, comparando os desempenhos ambientais de uma fazenda de leite intensiva convencional no norte da Itália. Um trabalho completo, porém, diferente da realidade do Brasil, devido ser é um país que conta com clima, solos diferentes, entre outros aspectos, onde os dados levantados não apresentam um contexto real para futuras pesquisas brasileiras.

Assim, o objetivo deste trabalho é levantar dados primários e secundários e elaboração de um Inventário de Ciclo de Vida (ICV) de um sistema de produção de biogás adotando como unidade funcional a geração de 1 KWh de energia elétrica, detalhando todas as entradas e saídas dos processos envolvidos. Para a elaboração do ICV, consideraram-se os dados de entradas e saídas dos processos fornecidos pela Fazenda Saia Velha, localizada em Luziânia – GO, e os secundários, coletados da literatura. Com isso, a contribuição principal desta pesquisa é o levantamento de

dados nacionais relativos ao processo de obtenção de biogás para geração de energia elétrica, utilizando como matéria-prima o esterco do gado leiteiro.

1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho é elaborar um Inventário de Ciclo de Vida (ICV) da produção de biogás para geração de eletricidade nas condições brasileiras seguindo a estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), utilizando dados primários coletados em uma fazenda produtora, em combinação com dados da literatura.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar os dados primários da produção de biogás na fazenda leiteira. As lacunas de informações serão supridas com levantamento de dados secundários utilizando literatura da área;
- E com os dados de entradas e saídas, combinando dados primários e secundários, desenvolver-se-á o inventário de ciclo de vida do biogás para geração de 1KWh de eletricidade.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BIOGÁS NO BRASIL

A matriz energética brasileira é bem diversificada, e no ano de 2021, obteve 44,7% da energia proveniente de fontes renováveis, dividida em biomassa da cana, hidráulica, lenha e carvão mineral, e outras renováveis, e 55,3% de não renováveis, o que permite a expansão de diversas fontes renováveis (EPE, 2022). A Figura 1 apresenta a porcentagem de cada fonte de energia.



Figura 1. Repartição da Oferta Interna de Energia 2021 (EPE, 2022).

A repartição da oferta chamada de “Outras renováveis” se subdivide em 8 categorias de fontes de energia com maiores participações da lixo, energia eólica e biodiesel, que somados são equivalentes a mais de 80% e o biogás corresponde apenas a 1,4% (EPE, 2022). A Figura 2 traz as porcentagens de cada categoria.

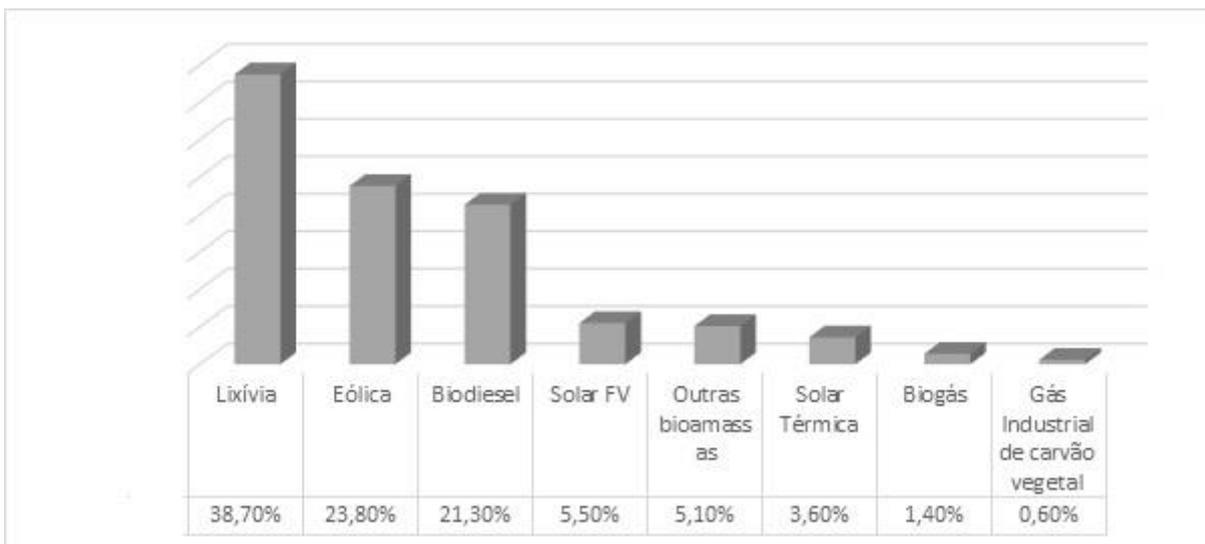


Figura 2. Repartição da oferta de “Outras renováveis” (EPE, 2022).

Apesar de representar uma pequena proporção na matriz energética brasileira, segundo uma pesquisa realizada pelo CIBiogás, houve um aumento de 16% no número de plantas em operação e 10% no volume de biogás produzido em 2021, em comparação ao ano anterior. Os estados de Santa Catarina e Goiás registraram crescimento bem significativo, de 28% e 24% no número de plantas em operação, respectivamente (CIBiogás, 2021).

Desta forma, neste período foram contabilizadas 811 plantas de biogás sendo que destas, 755 encontram-se em operação com aproveitamento energético (93%), 44 encontram-se em fase de implantação (5%) e 12 estão passando por reformulação ou reforma (2%) (CIBiogás, 2021).

Em 2021 as plantas em operação produziram 2,3 bilhões de Nm³ de biogás. E foi estimado que no de 2022 o crescimento foi de mais de 22%, cerca de 2,8 bilhões de Nm³ de biogás, com a entrada em operação das 56 plantas que estavam em fase de implantação ou em reforma (CIBiogás, 2021).

No Brasil, cinco estados contabilizaram o maior número de plantas de biogás, em operação, foram: Minas Gerais, Paraná, Goiás, Santa Catarina, São Paulo e Mato Grosso (CIBiogás, 2021).

Minas Gerais conta com 251 unidades em operação, ou seja, 33% do total nacional. Entretanto, em termos de volume de biogás e seu equivalente energético, essas unidades respondem a 210 milhões Nm³/ano. O Paraná ocupa a segunda

posição com 159 plantas em operação, o que corresponde a 21% do total nacional. Em termos de volume de biogás, o estado produziu o equivalente a 253 milhões Nm³/ano em 2021. Já o Goiás e Santa Catarina contabilizaram 64 e 63 plantas de biogás, respectivamente. Em Santa Catarina houve um aumento de 46% no volume de biogás produzido, enquanto Goiás registrou um incremento de 37% na produção, em relação ao ano anterior. Isso é reflexo, principalmente, da implantação de unidades de grande porte nos setores agropecuário e de saneamento (CIBiogás, 2021).

Desta forma, os resultados mostram que apesar do biogás ainda não compor uma grande parcela na matriz energética, sua produção vem se expandido gradualmente a cada ano.

2.2 BIOGÁS E SUAS PRINCIPAIS FONTES

A preocupação com o meio ambiente e com o setor energético tem levado a um número crescente de estudos e aplicações com foco em energia renovável, utilizando diferentes tipos de biomassa, na qual representa uma fonte abundante para o desenvolvimento e a aplicação de fontes alternativas e renováveis de energia (Makk et al., 2017).

Um ponto importante a considerar, é que a industrialização tem gerado grandes quantidades de resíduos tóxicos para o meio ambiente. Destarte, os desenvolvimentos de estudos sustentáveis são primordiais para manter a qualidade do meio ambiente, além de que a gestão de resíduos de subprodutos industriais é necessária para reduzir várias questões socioeconômicas levantadas pertencentes à poluição ambiental (Divya et al., 2015).

Desta forma, uma alternativa para suprir essa necessidade é utilizar resíduos para geração de energia, tornando um substrato que é altamente poluidor ao meio ambiente em produto com maior valor agregado, como o biogás, um biocombustível altamente valioso (Divya et al., 2015).

Sabe-se que a agronegócio é um dos principais setores em nível global que contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Com a utilização da tecnologia de produção de biogás neste setor, benefícios ecológicos podem ser alcançados. Assim, a implementação de biogás se torna uma ferramenta importante para reter o lucro econômico em conjunto com a sustentabilidade ambiental, trazendo múltiplos benefícios, como biofertilizante de alta qualidade,

eletricidade, calor, reciclagem completa de resíduos, redução de gases de efeito estufa e proteção ambiental de poluentes (Durdević & Huleníc, 2020; Divya et al., 2015).

O desenvolvimento e a implementação de tecnologia na agropecuária estão levando a um elevado consumo energético o que acarreta muitas falhas de abastecimento energético nos estabelecimentos agropecuários, fazendo com que os produtores rurais aumentem os seus custos ao precisarem gerar eletricidade utilizando combustível fóssil (EPE, 2019).

Desta forma, a conversão de resíduos agroindustriais em energia está recebendo cada vez mais atenção. Resíduos de biomassa, obtidos de lavouras agrícolas e de esterco de gado, possuem pontos positivos como sustentabilidade, diversidade, baixa emissão de gases de efeito estufa e baixo custo. O uso desse tipo de biomassa torna-se uma alternativa para produzir biocombustíveis, como o biogás, pelo processo de digestão anaeróbia (DA) (Safieddin Ardebili, 2020).

A cadeia produtiva do leite e derivados é um setor de grande importância econômica e social para o Brasil, recebendo dedicação especial do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de leite, com produção em 98% dos municípios brasileiros, tendo a predominância de pequenas e médias propriedades, empregando perto de 4 milhões de pessoas. O país conta com mais de 1 milhão de propriedades produtoras de leite (MAPA, 2023).

Desta forma, o mercado leiteiro vem se equilibrando em termos de produção. Onde a produção de leite aumentou continuamente entre os anos de 2005 a 2014, evoluindo de 16,3 bilhões a 24,7 bilhões, tendo uma recessão 2015/2016 e se estabelecendo até o ano de 2021, onde atingiu 25,1 bilhões de litros de leite. Porém no ano de 2022 houve uma queda na produção de leite, chegando 23,6 bilhões (Carvalho et al., 2023).

A cultura bovina leiteira é uma atividade importante para o agronegócio, onde há geração de renda e emprego direto, como já citado. No entanto, ela produz um elevado volume de dejetos, o que contribui para a degradação ambiental. Uma das alternativas para amenizar os impactos ambientais é a reciclagem através do processo da digestão anaeróbica para geração de biogás. Esse biogás pode ser usado de diversas formas como combustível, geração de calor e produção de energia

elétrica. Destaca-se a eletricidade advinda da produção de resíduos de gado e resíduos agrícolas, além de realizar a gestão de resíduos, colabora na mitigação de potenciais problemas ambientais e fornece energia limpa (Safieddin Ardebili, 2020).

O esterco de vaca como substrato é composto por proteína, gordura, celulose, amido e açúcar, porém tem baixa proporção de carbono para nitrogênio (C/ N), contém também grande quantidade de matéria orgânica, sendo fonte de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Deve-se considerar, ainda, que a composição do esterco bovino pode variar em função da dieta dos animais (Li et al., 2020; Muratçobanoğlu et al., 2020). A Tabela 1 mostra a composição do biogás proveniente de diferentes fontes.

Tabela 1. Metano e Biogás de diferentes fontes de biomassa (Khoshgoftar Manesh et al., 2020).

Tipo de esterco	Produção biogás m³/kg	% Metano	%CO₂	Volume de metano m³/kg
Esterco de aves	0,4-06	50-70	30-50	0,27
Esterco bovino	0,26-0,28	50-60	34-38	0,14
Esterco de ovelha	0,22-0,24	40-50	30-50	0,1

Assim, a produção de biogás de esterco animal é uma das tecnologias consideradas como uma solução eficaz para reciclagem de nutrientes, produção de energia e redução das emissões de GEE (Li et al., 2020; Wu et al., 2020).

2.3 BIOMASSA E A DIGESTÃO ANAERÓBIA

A Biomassa é um hidrocarboneto, e possui átomos de oxigênio na sua composição, o que resulta em menos emissões de poluentes, porém reduz também a quantidade de energia a ser liberada, diferente dos combustíveis fósseis (Rocha, 2010). Há diversas formas de aproveitamento energético de biomassas, incluindo a produção de biogás, bioetanol, biodiesel (Makk et al., 2017).

Assim, o biogás pode ser convertido por diversas fontes de biomassa, como resíduos agrícolas, resíduos sólidos municipais, esgoto municipal, lixo orgânico industrial, floresta, resíduos da indústria alimentícia e estrume de animal (Khoshgoftar Manesh et al., 2020).

Salienta-se que todos os tipos de biomassa podem ser usados como matéria-prima para a produção de biogás, contudo suas propriedades bioenergéticas se diferem umas das outras. Deste modo, as seleções dos substratos para a produção de biogás podem utilizar critérios como: a natureza do substrato, disponibilidade, relação carbono/nitrogênio, produtividade potencial e seu impacto ambiental (Divya et al., 2015).

Na produção de biogás um parâmetro muito importante a se considerar é a relação carbono: nitrogênio (C:N), onde deve se considerar que a proporção de nitrogênio seja inferior à de carbono. Sendo assim, a proporção ideal de carbono e nitrogênio dependerá do tipo de substrato, bem como das condições do processo (Tommy, Karlsson et al., 2014).

Segundo a literatura de Tommy, Karlsson et al., 2014, a relação C:N ideal em um processo de geração de biogás varia entre 20-30:1 no início do tratamento e entre 10-13:1 ao fim do tratamento.

No estudo realizado por Achmad et al. (2016) encontraram maior percentual de CH₄ no biogás advindo da mistura de esterco bovino e plantas aquáticas com C/N ajustada para 30 (Regazi, Almeida et al., 2021). Isso acontece devido o estrume sozinho não ser a forma mais eficiente para a produção de biogás devido à baixa relação carbono nitrogênio. No entanto, a produtividade pode ser melhorada através de métodos aditivos alternativos, como a mistura de outras biomassas (MURTO et al., 2004; Caillot, Vanessa Alueth, 2017).

Desta forma, a principal razão para o rendimento energético variado de cada biomassa está aliada à liberação de energia para o meio ambiente durante vários processos metabólicos que ocorrem em todo o seu estado nativo. A composição elementar da biomassa pode ser usada para determinar o rendimento máximo de metano obtido de cada substrato. Há de considerar a preocupação com o meio ambiente, mesmo que este tipo de abordagem teórica aconteça antes da seleção do substrato (Divya et al., 2015).

A viabilidade da digestão anaeróbia é influenciada pelas características da matéria-prima, condições operacionais e projeto do digestor, ou seja, a dinâmica microbiana e a descrição da matéria-prima são importantes para obter uma solução exata para o cenário atual de prosperidade energética (Divya et al., 2015). Para que

ocorra um bom processo de digestão anaeróbia múltiplos parâmetros devem ser considerados e controlados, como: pressão, temperatura, valor do pH, nutrientes, proporção carbono/nitrogênio da matéria prima (Kunz et al., 2019).

A digestão anaeróbia acontece por meio de um processo que depende de uma associação de microrganismos para transformar material orgânico em dióxido de carbono e metano, ou seja, em biogás, por meio de quatro etapas diferentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Divya et al., 2015; Kunz et al., 2019).

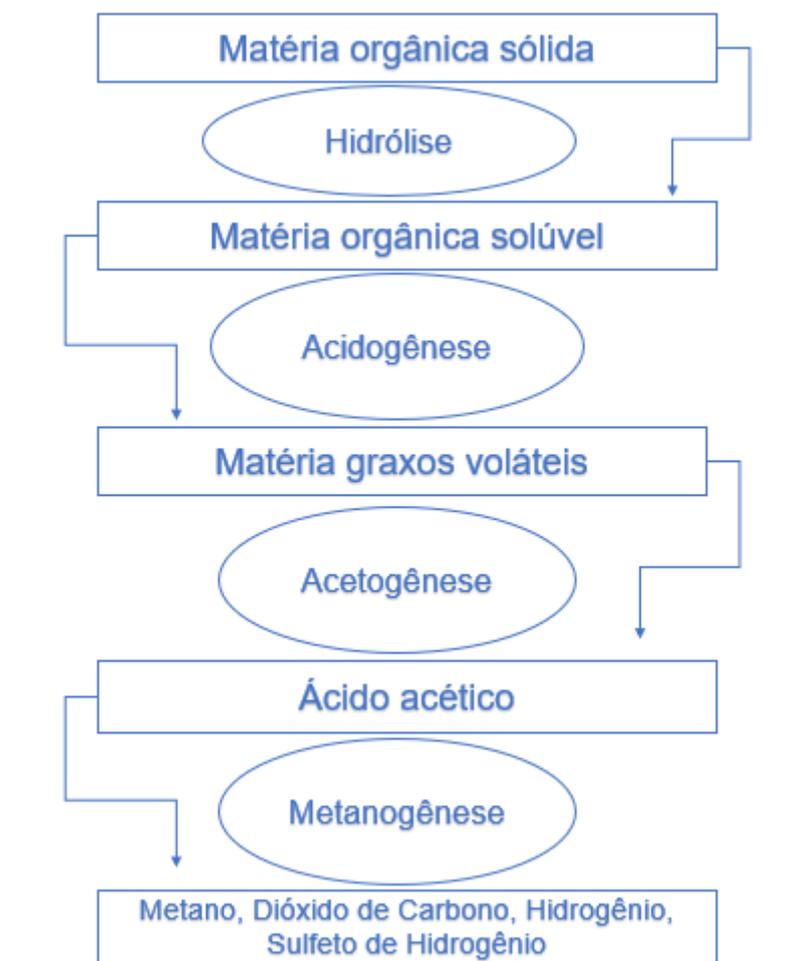


Figura 3. Fases da digestão anaeróbia.

A hidrólise ocorre com a degradação dos compostos de alta massa molecular como os polissacarídeos, proteínas e lipídios em compostos dissolvidos de menor peso molecular. As proteínas são degradadas por meio de (poli) peptídeos para formar aminoácidos. Os carboidratos se transformam em açúcares de cadeia curta e os lipídios são convertidos em ácidos graxos e glicerina. Esse processo ocorre pela ação

de enzimas extracelulares secretadas e pelas bactérias hidrolíticas. A velocidade da conversão do material orgânico em biogás é limitada pela velocidade da hidrólise, já o tempo de duração da etapa de hidrólise varia de acordo com as características do substrato (Kunz et al., 2019).

Na segunda etapa os compostos dissolvidos de menor peso molecular formados na hidrólise são metabolizados por bactérias anaeróbias e facultativas, e convertidos em ácidos graxos voláteis de cadeia curta, como álcoois, óxidos de nitrogênio, ácidos orgânicos, hidrogênio e dióxido de carbono (Kunz et al., 2019).

Na acetogênese, os ácidos de cadeia longa são convertidos em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono simultâneo com a produção de hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias consomem o hidrogênio e o gás carbônico para produção de acetato (Kunz et al., 2019).

A etapa final, metanogênese, ocorre a conversão do acetato e do hidrogênio, gerados pelas duas etapas anteriores, e metano e dióxido de carbono, é realizado por um grupo de microrganismos chamados de arqueas metanogênicas (Kunz et al., 2019). As arqueas metanogênicas são divididas de acordo com suas vias metabólicas em acetoclástica e hidrogenotróficas, onde as primeiras transformam o acetato em metano e as segundas convertem hidrogênio e dióxido de carbono em metano (Kunz et al., 2019).

O biogás é caracterizado pelo metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), é produzido através da decomposição bacteriana anaeróbia de matéria orgânica sem a presença de oxigênio. A Tabela 2 mostra a composição de teor em volume.

Tabela 2. Composição do biogás (Lombardi & Francini, 2020; Sarker et al., 2020).

GÁS	TEOR EM VOLUME	FÓRMULA QUÍMICA
Metano	50–75%	CH ₄
Dióxido de Carbono	25-50%	CO ₂
Nitrogênio	1–2%	N ₂
Hidrogênio	0–1%	H ₂
Sulfeto de Hidrogênio	0– 2%	H ₂ S
Oxigênio	1%	O ₂

Sendo assim, o biogás contém uma alta concentração de metano que é considerada uma fonte de energia limpa, eficaz e renovável que pode ser usado como substituto de outros combustíveis. Apresenta grandes vantagens quando se

comparado com outras fontes de energia renovável, devido ao fato de possuir instalações de fácil armazenamento e não gerar resíduos prejudiciais. Além disso, o seu resíduo é composto por vários elementos com alto valor nutricional, como o nitrogênio, potássio, fósforo e Zn, Fe, Cu, boro, Cr, Ni, Cd, sódio, cálcio, que pode ser utilizado na agricultura como biofertilizantes (Sarker et al., 2020).

2.4 A AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Existem muitos parâmetros a se avaliar na gestão dos resíduos, como os aspectos ambientais das diferentes opções de tratamento, as soluções técnicas adotadas, e a avaliação dos aspectos técnicos e econômicos. Além desses, existe a ACV, uma ferramenta quantitativa, que fornece suporte de base científica para uma tomada de decisão sustentável na gestão dos resíduos sólidos.

A técnica de avaliação do ciclo de vida consiste em quatro etapas: a) definição de objetivo e escopo, b) inventário do ciclo de vida, c) avaliação do impacto do ciclo de vida d) interpretação (Ramírez-Arpide et al., 2018). A figura 4 representa a estrutura da técnica de ACV.

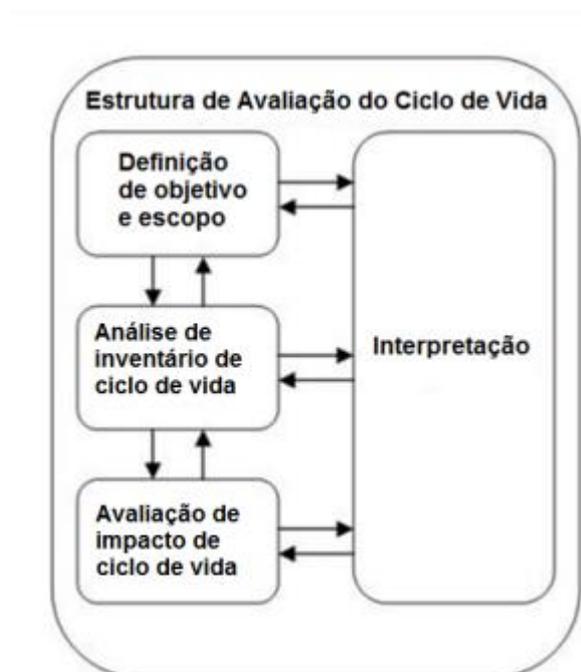


Figura 4. Estrutura da ACV, (ABNT,2001).

O presente estudo traz o foco para segunda etapa do ACV, o inventário do ciclo de vida onde os dados são coletados, os sistemas são modelados, e os resultados de

ICV são obtidos, baseando principalmente na análise do sistema tratando a cadeia de processos como uma sequência de subsistemas que interagem entre as entradas e saídas. Por isso, no ICV o sistema de produto é definido, onde inclui a definição das fronteiras do sistema, delimitando diagramas de fluxos com processos unitários, coletando dados para cada um desses processos, utilizando etapas de alocação para processos multifuncionais e completando os cálculos finais (Vilela, 2013). O principal resultado é uma tabela de inventário, em que os fluxos materiais e de energia associados com a unidade funcional são compilados e quantificados (ABNT, 2001). A Tabela 3 apresenta uma série de estudos de ACV de biogás pelo mundo, mostrando a ascensão da pesquisa nesta área, e a carência de estudos brasileiros.

Tabela 3- Estudos de ACV de biogás no mundo.

Título	Resumo	Und. Funcional	Fronteira	Dado ICV	Categorias	Referência
Thermodynamic, economic and environmental assessment of renewable natural gas production systems.	Análise de três tecnologia para produção de biometano, utilizando ACV.	1 MW	cradle-to gate	Entradas: eletricidade, esterco, água, produtos químicos. Saídas: biogás, emissões para o ar, digestado.	Aquecimento global, demanda cumulativa de energia não renovável e total, oxidação fotoquímica oxidação, acidificação e eutrofização.	Skorek-Osikowska et al., 2020
Life cycle assessment of biogas production through anaerobic co-digestion of nopal cladodes and dairy cow manure.	ACV Para analisar os impactos ambientais e o balanço energético da produção de biogás através da co-digestão de cladódios nopal e esterco de vaca leiteira.	1 MJ	-	Entradas: Ureia Superfosfato triplo Cloreto de potássio Estrume de vaca leiteira Atrazina Inseticida Gasolina Diesel Saídas: Biogás Digestado	Aquecimento global, acidificação, eutrofização, potencial de depleção abiótica, potencial de destruição da camada de ozônio, potencial de criação fotoquímica de ozônio, potencial de ecotoxicidade terrestre, potencial marinho de ecotoxicidade aquática, potencial de toxicidade humana	Ramírez-Arpide et al., 2018
Environmental assessment of digestate treatment technologies using LCA methodology	ACV da produção de biogás a partir de culturas energéticas, resíduos orgânicos e esterco.	-	-	Entradas:Eletricidade, calor Diesel,N, H ₂ SO ₄ , NaOH. Saídas:Co-produtos, digestado seco, mineral concentrado,Fertilizante e Biogás	-	Vázquez-Rowe et al., 2015
Environmental implications of anaerobic digestion for manure management in dairy farms in Mexico: A life cycle perspective.	ACV de uma fazenda leiteira mexicana que utiliza esterco para produção de biogás	-	cradle-to gate	Entradas: fertilizantes, pesticidas, sementes, diesel, eletricidade, esterco. Saídas: emissões para o ar, solo e água. Produtos: biogás, biofertilizantes, eletricidade.	-	Rivas-Garcia et al., 2015

Anaerobic digestion and milking frequency as mitigation strategies of the environmental burden in the milk production system	Avaliar o processo produtivo de uma fazenda leiteira na Itália, utilizando a metodologia de ACV	1 kg de gordura e leite corrigido com proteína	cradle-to-gate	-	Aquecimento global, acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e uso de energia não renovável	Bacchetti et al. em 2016.
Life cycle assessment of swine production in Brazil: A comparison of four manure management systems	Avaliar o impacto ambiental da produção de suínos utilizando a metodologia de ACV comparando gestão do esterco em diferentes sistemas	1000 kg de carcaças suínas	-	-	Aquecimento global acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, ecotoxicidade terrestre e transformação natural da terra	Cherubini et al., 2015.
Life cycle analysis of a biogas-centred integrated dairy farm-greenhouse system in British Columbia	ACV da integração de uma fazenda de laticínios com a produção de biogás	1100 toneladas de esterco leiteiro	-	-	Consumo de energia não renovável, mudanças climáticas, acidificação aquática, eutrofização aquática, efeitos respiratórios e toxicidade humana.	Zhang et al, 2015.

O estudo (Skorek-Osikowska et al., 2020) teve como objetivo analisar três tecnologias para a produção de biometano: a primeira fermentação de esterco e sua posterior melhoria pela remoção de CO₂, a segunda fermentação do esterco e metanação do biogás usando hidrogênio renovável e por último a gaseificação de biomassa na atmosfera de oxigênio e metanação do gás resultante. A análise ambiental realizada neste estudo foi baseada na aplicação da Abordagem de avaliação do ciclo de vida (ACV),

Uma pesquisa feita por (Ramírez-Arpide et al., 2018) apresentou uma avaliação do ciclo de vida para analisar os impactos ambientais e o balanço energético da produção de biogás através da co-digestão de cladódios nopal e esterco de vaca leiteira.

Em um estudo realizado no ano de 2015 feito por Vázquez-Rowe et al., 2015 contempla uma abordagem sobre a avaliação de ciclo de vida da produção de biogás a partir de culturas energéticas, resíduos orgânicos e esterco.

O trabalho de (Rivas-Garcia et al., 2015) foi embasado no estudo de caso de uma fazenda leiteira mexicana que utiliza esterco para produção de biogás, que compreende as seguintes etapas: produção de ração para gado, transporte para a fazenda, pecuária, produção leiteira, manejo de esterco, produção de biogás e biofertilizantes, realizando um estudo de ACV de todo o processo.

Assim, as pesquisas de Skorek-Osikowska, Ramírez-Arpide, Vázquez-Rowe, Rivas-Garcia levantaram informações relevantes que contribuíram para construção do escopo do presente estudo, como também na confecção dos questionários para o inventário do ciclo de vida. Os dados de entradas e saídas dos inventários, as unidades funcionais, fronteiras dos sistemas, unidades de medidas e as categorias impactos ambientais avaliados, deram embasamento de como é realizado um estudo de avaliação do ciclo de vida de biogás.

Bacenetti et al. em 2016, realizou uma pesquisa com o objetivo avaliar o processo produtivo de uma fazenda leiteira, utilizando a metodologia de avaliação de ciclo de vida. Os autores realizaram uma comparação dos desempenhos ambientais de uma fazenda de leite intensiva convencional no norte da Itália, avaliando os

resultados obtidos através da introdução de uma terceira ordenha e a da adoção da digestão anaeróbia (DA) de dejetos de animais.

Desta forma, esse estudo mostrou o quanto um cenário base, sem adição de meios tecnológicos e rotas alternativas para o resíduo, é ineficiente em termos ambientais, e como a gestão de resíduo utilizando a digestão anaeróbia (DA) contribui ligeiramente para redução dos impactos ambientais negativos.

O estudo realizado no Brasil feito por (Cherubini et al., 2015), teve como objetivo avaliar o impacto ambiental da produção de suínos utilizando a metodologia de avaliação do ciclo de vida. A avaliação foi conduzida comparando quatro sistemas de gestão de dejetos: armazenamento de dejetos líquidos em tanques de chorume, a biodigestor por flare, o biodigestor para fins energéticos e a compostagem.

Assim, este estudo trouxe a realidade do ACV de biogás no Brasil, apesar de tratar de esterco de suínos, outro tipo de matéria-prima, as informações contidas na pesquisa contribuíram para direcionar o presente estudo devido se tratarem de dados nacionais.

O estudo de (Zhang et al, 2015) realizou uma abordagem da integração de uma fazenda de laticínios com a produção de biogás, onde o consumo de gás natural foi substituído pelo de biogás renovável gerado a partir da digestão anaeróbia (DA) do esterco leiteiro, o CO₂ usado no enriquecimento de plantas é fornecido através da combustão de biogás e o digerido é usado como cama animal, adubo e fertilizantes líquidos. Uma análise do ciclo de vida (ACV) foi conduzida para quantificar os impactos ambientais do sistema eco industrial em comparação com as práticas agrícolas convencionais.

Assim, a pesquisa chegou à conclusão que o sistema integrado da fazenda de laticínios com a estufa de biogás reduz o consumo de energia não renovável, o impacto da mudança climática, a acidificação aquática, os efeitos respiratórios de emissões orgânicas e a toxicidade humana em mais de 40% em comparação com as operações convencionais. Se o excedente de digerido for descartado como resíduo, os impactos são aumentados nas categorias de eutrofização aquática e efeitos respiratórios de emissões inorgânicas. Já se o excedente digerido for utilizado como adubos e fertilizantes químicos, os impactos são reduzidos em todas as categorias,

incluindo eutrofização e efeitos respiratórios de emissões inorgânicas, com reduções percentuais na faixa de cerca de 20% a mais de 100% (Zhang et al., 2015).

Desta forma, o estudo traz relevantes dados para estudos de ACV na produção de biogás utilizando resíduos do gado leiteiro com também a reutilização dos subprodutos gerados na cadeia produtiva, apontando as melhorias do desempenho ambiental em diferentes categorias de impactos.

Diante de tantos estudos na área, nota-se insuficiência de dados primários brasileiros de biogás advindo de resíduos agrícolas, um país reconhecido por sua grande expansão no agronegócio, precisar aprimorar seus dados. Desta forma, constatou-se uma grande oportunidade e contribuição para pesquisa a elaboração de um ICV com dados nacionais. E os estudos mencionados, trouxeram um embasamento para a construção de inventário do ciclo de vida para produção de biogás advindo do esterco leiteiro.

3. METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de ACV compreende quatro principais etapas, iniciando-se pela definição do objetivo e escopo, a elaboração e análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e a interpretação dos resultados. Neste estudo de caso, foi definido o objetivo e escopo e realizada a elaboração e análise do Inventário do Ciclo de Vida para unidade funcional de 1 KWh de energia.

A etapa de coleta de dados foi dividida em duas partes distintas. Na primeira parte foram levantados dados referentes às entradas e saídas de matéria e energia da produção de biogás. Neste processo, quantificam-se as quantidades de energia, esterco, água, diesel, biogás, eletricidade, composto sólido e biofertilizantes com dados primários.

Em uma segunda etapa da coleta de dados foi realizada através da literatura. As duas etapas citadas da coleta de dados têm seus cálculos e estimativas.

3.2 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo deste estudo foi realizar o inventário da produção de biogás a partir do esterco bovino leiteiro de um sistema de produção em uma fazenda leiteira brasileira. O escopo do estudo incluiu a obtenção do esterco do gado e sua utilização como matéria-prima para a obtenção de biogás, pelo processo de digestão anaeróbica, destinando-se à geração de energia elétrica.

Função do sistema

Neste estudo, a função do sistema foi a obtenção de biogás advindo do resíduo da produção leiteira para geração de energia elétrica.

Unidade funcional

A unidade funcional de análise foi a energia, quantificada como eletricidade, medida em kWh, ou seja, 1 kWh.

3.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A fazenda Saia Velha, em Luziânia-GO, realiza atividades de agricultura e bovinocultura, sendo a produção de leite a principal atividade desenvolvida na fazenda, a figura 5 mostra a localização da fazenda. O rebanho é composto por 93 vacas leiteiras que produzem diariamente cerca de 34 kg de esterco por animal. Os dados do levantamento primário englobam o período temporal de maio de 2021. Para produção de biogás, a fazenda dispõe de um biodigestor tipo lagoa anaeróbica, com agitação, com capacidade total de 1576 m³ de líquido e 771,1 m³ de biogás. Foram considerados cinco processos principais para a construção do inventário: manejo e transporte do esterco; pré-tratamento da matéria-prima; produção de biogás; filtração do biogás e geração de energia elétrica.



Figura 5. Fazenda Saia Velha localizada em Luziânia- GO.

1. Manejo e transporte do esterco: inclui o manejo de gado para os locais destinados a coleta de esterco e o transporte até o tanque de homogeneização;
2. Pré-Tratamento: realizada a separação entre as partes líquidas e sólidas.
3. Produção do biogás: homogeneização da matéria-prima, pré-tratamento da matéria-prima e a conversão dela em biogás.
4. Filtração do biogás: Biogás passa por filtro para a retirada de impurezas.

5. Produção de energia elétrica: biogás inserido em um motor-gerador para transformação em energia elétrica.

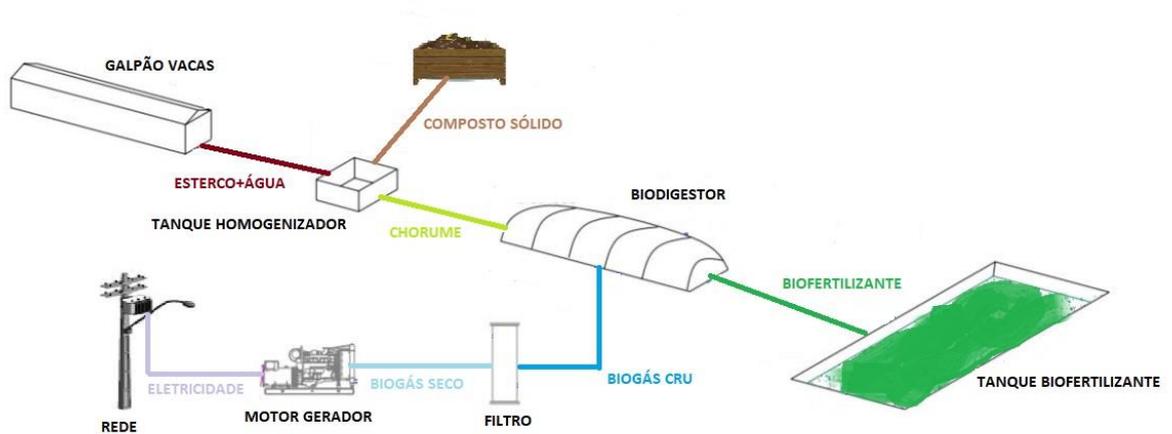


Figura 6. Digrama do processo produtivo da fazenda saia velha. Adaptado de Nishimura, 2009.

A seguir estão relacionadas as informações em maiores detalhes para cada processo.

3.3.1 Manejo e transporte do esterco

Os animais são direcionados diariamente para quatro pistas inclinadas de concreto, próprias para armazenagem dos dejetos expelidos pelos bovinos. A Figura 7 mostra os animais em confinamento e as pistas. Quando a capacidade das pistas é atingida, estas então são lavadas com água, utilizando um trator de jato d'água de 75 CV movido a diesel. Assim, os dejetos juntamente com a água são canalizados até um tanque homogeneizador, onde a mistura de dejetos e água é realizada com o auxílio de um misturador de potência 3 kW e uma bomba de sucção de 5,5 kW. O motor misturador tem como função homogeneizar a mistura água/estrupe, e a bomba de sucção, enviar a mistura ao motor separador.

A fazenda tem uma produção diária de 3160 kg de esterco, onde são utilizados 8000 litros de água para limpeza das pistas e 10 litros de diesel para alimentar no trator. O motor para homogeneização e a bomba de sucção consomem 4,25 KWh de energia.



Figura 7. Manejo do esterco. A: Galpão onde os animais habitam; B: pistas onde é despejado os dejetos.

3.3.2 Pré-tratamento da matéria prima

Nesta etapa, o motor separador de potência 9,2 kW proporciona a separação entre as partes líquidas e sólidas, consumindo 5,34 KWh de eletricidade. O chorume, parte líquida, é destinado ao biodigestor e a parte sólida, resíduo, é utilizada como cama animal, conforme mostrado na Figura 8. Nesta etapa é produzido 10044 litros de chorume e 1116 kg de cama animal por dia.



Figura 8. Pré-tratamento da matéria prima. A: Tanque de homogeneização; B: motor separador; e C: composto sólido usado como cama animal.

3.3.3 Produção de biogás

O líquido extraído pelo motor separador (chorume) é canalizado ao biodigestor, onde é realizado o processo de digestão anaeróbica transformando parte em biogás seco para alimentação do motor gerador, e parte em resíduo líquido, que é armazenado e reutilizado no biodigestor tipo lagoa anaeróbia, com agitação.

Nesta etapa são produzidos 195,11 Nm³ de biogás cru e 6 696 litros de biofertilizante por dia. A Figura 9 mostra o biodigestor tipo lagoa.



Figura 9. Produção de biogás, A: tanque de armazenamento de biofertilizante; B: Biodigestor tipo lagoa.

3.3.4 Filtração do biogás e produção de energia elétrica

O biogás produzido durante a biodigestão é então canalizado, passando por um queimador. Caso haja excesso de produção de biogás, este queimador é responsável pela queima do biogás excedente. Assim, o biogás cru é levado até um filtro, onde são retidas todas as impurezas contidas no biogás. Por fim, chegando ao grupo motor-gerador de 120 kVA, onde o gás é queimado como combustível, e é convertido em eletricidade. Nos horários de pico, o sistema elétrico é desligado da rede da concessionária. Daí então, o excedente de energia é utilizado para abastecer a sede da fazenda, como os processos de ordenha e o barracão onde ficam os bovinos. A Figura 10 mostra o filtro e grupo gerador movido a biogás.

Nesta etapa 186 Nm³ de biogás filtrado é capaz de gerar 283 KWh de energia elétrica por dia para a fazenda leiteira.



Figura 10. Filtração do biogás e produção de energia elétrica. A: filtro para biogás cru; B: Grupo gerador movido a biogás.

3.4 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

A coleta de dados deste trabalho envolveu a prospecção de informações primárias a partir de visitas técnicas à fazenda Saia Velha localizada em Luziânia - GO, bem como a partir de dados secundários da literatura.

A Figura 11 exibe o fluxograma do processo produtivo mapeando seus fluxos de entradas e saídas e a fronteira do sistema em estudo. Os limites do sistema incluem uma análise “do portão ao portão” (gate to gate).

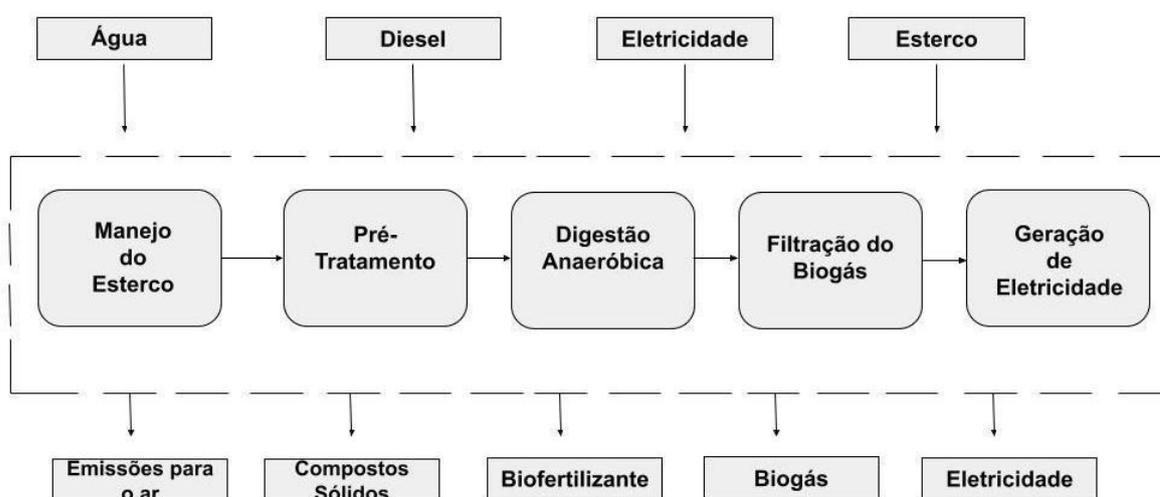


Figura 11. Fluxograma envolvendo as etapas de produção do biogás e geração de energia elétrica.

Para este estudo foi considerado a unidade funcional de 1kWh de energia elétrica, desta forma todos os dados foram convertidos.

Os principais dados de inventário são: Entrada: energia, esterco, água, diesel; e Saída: biogás, emissões para o ar, eletricidade, composto sólido e biofertilizantes.

3.4.1 Cálculo emissões manejo do esterco

O método Tier 1 das diretrizes do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) foi usado para estimar as emissões de metano e óxidos nitrosos do manejo de esterco (Gavrilova et al., 2006).

As emissões de metano para o manejo do esterco estão principalmente ligadas a condições anaeróbicas. Para o cálculo de emissões totais de metano foi desprezada as emissões devido à fermentação entérica que ocorre no processo digestivo dos animais, pois a fronteira em estudo inicia no manejo do esterco. As emissões de metano para a gestão de estrume estão principalmente ligadas a condições

anaeróbicas, por exemplo, sistemas de chorume. Desta forma foi utilizada a Equação 1 para cálculo do total de emissões de CH₄.

$$\text{Total emissão } CH_4 = FELL \times FP \times AH \times AP \times TC \quad (1)$$

Onde Fell é o fator de emissões de CH₄ - manejo esterco (Kg de CH₄/cab/ano); FP é o Fator peso; AH, Animais por hectares; AP, Área de pasto (ha); e TC é o Tempo para coleta do esterco (ano).

O fator de emissões de CH₄, foi recuperado do inventário do ministério de minas e energia (MME, 2020). Já o fator peso, animais por hectares e área de pasto foram calculados a partir de dados primários.

Os cálculos das emissões de óxido nitroso do manejo de dejetos são baseados em dados de nitrogênio (N) excretado pelo gado. Estimar a produção de N no esterco para gado em pastejo é incerto, devido à dificuldade de controlar a ingestão de forragem e a produção de esterco. Além disso, o teor de N na pastagem e no esterco pode variar ao longo do ano, devido às condições climáticas e aos estágios de desenvolvimento do capim. No entanto, sabe-se de várias fontes que a produção de carne bovina tem uma eficiência de N muito baixa, ou seja, apenas uma pequena parcela do nitrogênio consumido pelos animais é retida no corpo (Cederberg et al., 2009). Desta forma, foi utilizada a Equação 2 para cálculo do total de emissões N₂O.

$$\text{Total emissão } N_2O = (FEN_2O \times FEN_{EXC} \times AH \times AP \times TC \times FP) + EN_2OCN \quad (2)$$

Assim, para chegar ao resultado do Total de emissão N₂O, foram calculadas as equações representadas a seguir.

Primeiro o cálculo de emissão N₂O do ciclo do nitrogênio (EN₂OCN), onde:

$$EN_2OCN = N_{ent} \times FEN_2O \quad (3)$$

Após foram realizados os cálculos do total de nitrogênio na entrada do sistema (N_{ent}), utilizando a equação 4.

$$N_{ent} = (N_{DEPATM} \times TC + NPK) - (N_{EXC} \times TC) \quad (4)$$

Por fim foi feito o cálculo da massa do pasto (*NPK*), usando a equação 5.

$$NPK = (4 \times AP \times TC) \quad (5)$$

Onde FEN_{EXC} é o fator de emissões de Nitrogênio excretado-manejo esterco (N_2O /cab/ano); FP é o Fator peso; AH, Animais por hectares; AP, Área de pasto (ha); TC é o Tempo para coleta do esterco (ano); FEN_{2O} é o fator de emissão N_2O (Kg); N_{DEPATM} é a massa de nitrogênio depositada na atmosfera (ha/ano); e o N_{EXC} é o nitrogênio exportado por animal (kg/ha/ano).

O fator de emissão N_2O e o fator de emissões de nitrogênio excretado, foram levantamentos da literatura (Cederberg et al., 2009). Já os parâmetros de massa de nitrogênio depositada na atmosfera e nitrogênio exportado por animal foram obtidos do (Cadisch et al., 1994).

3.4.2 Vapor de água residual

O valor de vapor de água residual foi estimado a partir de dados secundários, recuperado da literatura de Ardolino et al. (2018), onde o autor considerou que após o processo de filtragem do biogás é perdido 4,9% do volume de gás. Desta forma, foi estimado que para geração de 1 KWh, são necessários $0,6572\text{Nm}^3$ de biogás, e $0,0322$ é eliminado como vapor de água residual.

3.4.3 Emissões motor a diesel

As emissões de motor a diesel foram estimadas a partir da literatura produzida pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) juntamente com Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) no ano de 2012, onde foram estabelecidos limites máximos de emissões de motores, através do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

Desta forma foram utilizados os limites estabelecidos nos programas para uma máquina agrícola movida a diesel de 75 CV e realizando as estimativas cálculos para fazenda leiteira, utilizando a unidade funcional.

Os valores usados como parâmetros foram emissões de 5 g/kWh para CO, 4,7 g/kWh NO_x e 0,4 g/kWh para material particulado (MP).

3.4.4 Emissões do biogás

Apesar da boa qualidade dos dados de inventário sobre entradas operacionais e fluxos em diferentes etapas do processo, alguns dados primários foram encontrados para as emissões ao ar. Portanto, os dados de emissões da queima do biogás foram recuperados da literatura.

Desta forma foi utilizado o estudo de Balcioglu et al., 2022, no qual trouxe dados de emissões de uma planta de 1MWh de energia elétrica, realizando medições de campo em motores movidos a biogás e realizando as estimativas cálculos para fazenda leiteira, utilizando a unidade funcional.

Os valores usados como parâmetros foram emissões de 0,89 Kg/MWh para NOx, 0,98 Kg/MWh para CO, 0,02 Kg/MWh para N₂O, 0,49 Kg/MWh para CH₄, 0,06 Kg/MWh para compostos orgânicos voláteis sem metano (NMVOC).

Após obtenção das estimativas de emissões geradas pelo motor movido a biogás e o diesel, foi construído um gráfico comparativo entre os valores de CO e NOx.

3.4.5 Balanço energético

Para a realização do balanço energético, foi selecionados dois tipos de energia, direta e indireta, a primeira se relaciona a energia elétrica, insumos consumidos no processo e ao trabalho humano, já segunda, é a energia empregada na fabricação das construções e equipamentos usados no processo.

A Tabela 4 recuperada da literatura de (Nishimura, 2009) traz a quantidade energética dos insumos com energia direta para ser multiplicado pelas quantidades físicas recuperadas na fazenda leiteira.

Tabela 4- Coeficientes energéticos energia direta.

Componente	Coeficiente energético
Diesel	9204 kcal/L
Eletricidade	860 kcal/kWh
Biogás	5339 kcal/m ³
Biofertilizante	4440 kcal/m ³
Trabalho humano	112,5 kcal/h/homem

A determinação da energia direta das edificações e dos equipamentos, foi calculada multiplicando a depreciação das máquinas e construções utilizando as equações 6 e 7 e pelos coeficientes energéticos fornecidos na Tabela 5 recuperada de (Nishimura, 2009).

Tabela 5-Coeficientes energéticos energia direta dos equipamentos e construções.

Componente	Coeficiente energético
Equipamento autopropelido	16679 kcal/kg
Equipamento não autopropelido	13662 kcal/kg
Edificação de serviço	64800 kcal/m ²

Cálculo depreciação equipamentos:

$$DE[kg] = \frac{\text{massa}[kg] - 0,1 \times \text{massa}[kg]}{\text{vida útil}[h]} \times \text{tempo de utilização}[h] \quad (6)$$

Cálculo depreciação construções:

$$DE[m^2] = \frac{\text{área}[m^2] - 0,1 \times \text{área}[m^2]}{\text{vida útil}[anos]} \times \text{tempo de utilização}[anos] \quad (7)$$

Por fim é calculado a eficiência energética utilizando a equação 8:

$$EE = \frac{\sum Edsaida + Eisaida}{\sum Edentrada + Eientrada} \quad (8)$$

Onde, Ed é energia direta, Ei é energia indireta e EE é a eficiência energética.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Nesta análise, os limites do sistema vão desde a coleta do esterco até a geração de energia elétrica que é usada na fazenda nos horários de pico abastecendo a sede, a ordenha e o barracão onde ficam os bovinos. Neste estudo, a coleta de dados de ICV foi realizada por meio do preenchimento de questionários de ICV. Foram incluídos no ICV os processos de manejo e transporte do esterco, tratamento da matéria-prima, produção de biogás, filtração do biogás e produção de energia elétrica.

As Tabelas 6, 7, 8, 9 e 10 apresentam o ICV elaborado com os dados primários coletados na fazenda, onde estão listados os insumos, produtos e coprodutos dos processos que compõem a obtenção de biogás na fazenda em estudo, e ainda, as emissões ao ar relativas ao processo de manejo do esterco, pré-tratamento e aos motores movidos a diesel e biogás. As emissões foram calculadas a partir da literatura em relação à quantidade de esterco produzida para gerar 1 kWh de energia.

Tabela 6. Inventário de Ciclo de Vida do manejo do esterco.

Manejo do esterco			
Produtos	Unidade de medida	Quantidade	Referências
Entradas			
Esterco	Kg	11,1915	Dados primários
Eletricidade	KWh	0,0151	Dados primários
Água	L	28,3329	Dados primários
Saídas			
Esterco+água	Kg	39,5245	Dados primários
CH ₄	Kg	0,002159	Gavrilova et al., 2006
N ₂ O	Kg	0,027811	Gavrilova et al., 2006

Tabela 7. Inventário de Ciclo de Vida do pré-tratamento.

Pré-tratamento do esterco			
Produtos	Unidade de medida	Quantidade	Referências
Entradas			
Esterco+água	Kg	39,5245	Dados primários
Eletricidade	KWh	0,0189	Dados primários
Diesel	L	0,039847	Dados primários
Saídas			
Cama animal	Kg	4,0118	Dados primários
Chorume	L	35,5127	Dados primários
CO	Kg	0,005	MMA & IBAMA, 2012
NO _x	Kg	0,0047	MMA & IBAMA, 2012
MP	Kg	0,0004	MMA & IBAMA, 2012

Tabela 8. Inventário de Ciclo de Vida da digestão anaeróbia.

Digestão anaeróbia			
Produtos	Unidade de medida	Quantidade	Referências
Entradas			
Chorume	L	35,5127	Dados primários
Eletricidade	KWh	0,0053	Dados primários
Saídas			
Biofertilizante	L	23,6763	Dados primários
Biogás cru	Nm ³	0,6894	Dados primários

Tabela 9. Inventário de Ciclo de Vida da filtração do biogás cru.

Filtração do biogás cru			
Produtos	Unidade de medida	Quantidade	Referências
Entradas			
Biogás cru	Nm ³	0,6894	Dados primários
Eletricidade	KWh	0,001024	Dados primários
Saídas			
Biogás	Nm ³	0,6572	Dados primários
Vapor de água residual	Nm ³	0,0322	Ardolino et al. (2018)

Tabela 10. Inventário de Ciclo de Vida da geração de energia elétrica.

Geração de energia elétrica			
Produtos	Unidade de medida	Quantidade	Referências
Entradas			
Biogás	Nm ³	0,6572	Dados primários
Saídas			
Eletricidade	KWh	1	Dados primários
NO _x	Kg	0,00089	Balcioglu et al., 2022
CO	Kg	0,00098	Balcioglu et al., 2022
N ₂ O	Kg	0,00002	Balcioglu et al., 2022
CH ₄	Kg	0,00049	Balcioglu et al., 2022
NMVOG	Kg	0,00006	Balcioglu et al., 2022

Por meio das visitas técnicas obtiveram-se os dados de quantidade de esterco, eletricidade, diesel consumido e água. Após esta etapa, os valores foram convertidos para a unidade funcional e confeccionada as tabelas anteriores.

O biogás pode ser obtido de diferentes tipos de esterco, neste estudo foi usado o esterco bovino, onde 11,1915 kg de esterco foi capaz de gerar 0,6572 Nm³ de biogás (17 kg de esterco/ Nm³ de biogás), quantidade necessária para a geração de 1 kWh de energia.

Em um estudo semelhante, utilizando 36,2 kg esterco de coelho, este foi convertido em 2,17 m³ de biogás, ou seja 16,7 kg de esterco/m³ de biogás. O tipo de biodigestor utilizado no estudo não foi especificado. (Wang et al., 2022). Em comparação ao presente estudo (17 Kg de esterco/m³), considerando a altitude de 930 metros, temperatura de 22°C, e umidade de 68% de umidade para conversão de Nm³ para m³. Nota-se que ambos produzem a mesma quantidade de biogás utilizando quase a mesma quantidade de matéria-prima, onde a fazenda saia velha teve apenas 2% a mais de matéria prima para conversão em 1m³ do biocombustível.

Uma pesquisa com diferentes tipos de esterco na Turquia pode ser utilizada como base para comparação dos resultados encontrados na fazenda leiteira. Em um cenário chamado planta A, foram usados 2360 Kg de esterco de gado e 1380 kg de esterco aves, ou seja 12,42 kg de esterco/m³ de biogás, que gerou um total de 1340 Kg de compostos sólidos, 2020 L de biofertilizante, 301 Nm³ de biogás para gerar 1 MWh de energia elétrica. O estudo não especificou tipo de biodigestor utilizado, apenas o volume do tanque que é de 15 m³ de gás (Balcioglu et al., 2022). Quando comparado a quantidade do esterco de gado e da galinha para a mesma produção de

biogás, a fazenda leiteira precisaria de uma maior quantidade de matéria-prima, cerca de 27% a mais, isso deve-se pela mistura de dois tipos de matérias-primas, alimentação dos animais e o tamanho e condições de operação da planta da planta.

Um estudo brasileiro, realizado no estado de Minas Gerais, traz um cenário base, que utiliza um biodigestor tipo lagoa, onde 4500 Kg esterco de porco gera 270 Nm³ biogás, cerca de 16,66 Kg/ Nm³ de biogás, convertidos em 6357 kWh de energia elétrica, ou seja 0,043 Nm³/ kWh (Freitas et al., 2022). Esta pesquisa obteve resultados semelhantes aos da fazenda Saia Velha para quantidade de matéria-prima, cerca de 98%, demonstrando a equivalência entre dados nacionais.

Ioannou-Ttofa et al., 2021, realizou um estudo de ACV de uma produção de biogás no Egito utilizando biodigestor de domo fixo com capacidade de 4m³ de gás, onde 17 Kg de esterco de gado obteve 0,595 m³ de biogás, 28,6 kg de esterco/ m³ de biogás, onde a produção foi quase a metade da fazenda Saia Velha (17Kg de esterco/m³ de biogás), cerca de 40% a menos, isso deve-se pela diferença da localidade das fazendas, tipo de alimentação dos animais, temperatura e o biodigestor usado que é um sistema menos robusto.

Em uma comparação com uma pesquisa realizada no Brasil de uma fazenda leiteira que utiliza de um biodigestor de fluxo contínuo para produzir cerca de 378 m³ de biogás ao mês convertidos em 2070 kWh/mês, cerca de cerca de 0,1826 m³/KWh (Martins Maciel et al., 2022). A Saia Velha apresentou uma produção de biogás e conversão de energia elétrica com menor desempenho, cerca de 27% a menos, isso se deve pela tecnologia utilizada ser diferente ao da fazenda em estudo.

No México foi realizado um ICV onde 2000 cabeças de gado holandês produzem 1200 t/ano de esterco, utilizando um biodigestor tipo lagoa obteve uma produção de 200000 m³/ano de biogás, ou seja, 6 kg de esterco/m³, convertidos em 140390 KWh (Huerta-Reynoso et al., 2022). Desta forma, quando realizada uma comparação ao cenário da fazenda leiteira, o estudo mexicano apresentou boa produção de biogás, onde necessita de 35% da matéria-prima usada na fazenda saia velha para se produzir 1 KWh/dia.

4.1.1 ICV consumo de energia elétrica

Ao estabelecer a necessidade energética com a produção de biogás da fazenda, os valores diários de 11,1915 kg de esterco, gerando 0,6512 Nm³ de biogás

são capazes de gerar 1 kWh de energia elétrica. Isso pode implicar uma grande economia mensal, levando em consideração o valor pago por kWh da concessionária local que é de R\$ 0,81.

A Figura 12 apresenta o gráfico detalhando a quantidade gasta em cada processo. Onde a etapa de pré-tratamento apresentou o maior consumo, de 0,0189 kWh isso deve-se pela quantidade de motores utilizados e o menor consumo foi o da etapa de filtração, de 0,001024 onde apresenta apenas um filtro para purificação do biocombustível.

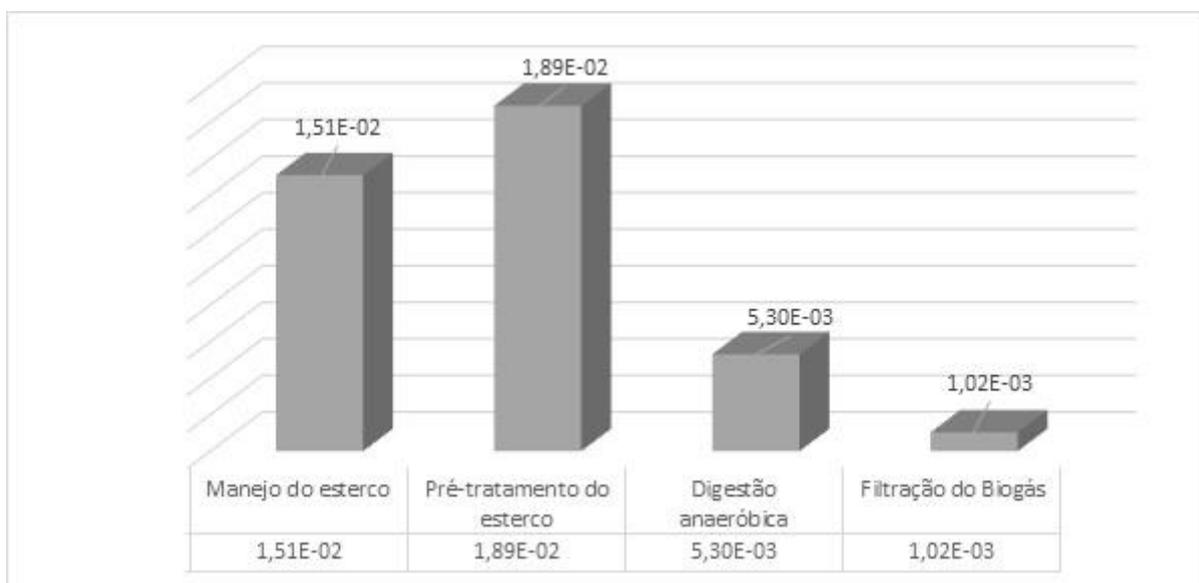


Figura 12. Consumo energético de cada processo para a obtenção de biogás pela fazenda Saia Velha. Dados em kWh.

O consumo energético em todo o processo foi de 0,040324 kWh, que custa cerca de R\$ 0,03, acarretando um lucro de R\$ 0,77 para cada 1 kWh gerado na fazenda leiteira, rentabilizando uma economia 95% em termos financeiros.

Barreira (2011), trouxe uma relação para determinar a conversão do biogás em energia, onde 0,7002 m³ de biogás pode gerar 1 kWh de energia. Que demonstra um valor bem próximo ao presente estudo.

Nunes (2014), levantou dados de uma fazenda leiteira de pequeno porte, onde produz 528 m³ de biogás ao mês, volume suficiente para a produção de 1.111,34 kWh de energia elétrica. Demonstrando que a fazenda leiteira tem uma produção de biogás eficiente para produção de energia.

4.1.2 Balanço energético

O consumo total de energia do sistema de produção para 1 kWh de energia de 20223,516 kcal, onde houve predominância de energia indireta, com 98%, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11-Consumo de energia direta e indireta.

Componente	Energia (kcal)	%
Diesel	365,832	90,65
Eletricidade	34,565	8,56
Trabalho humano	3,180	0,79
Subtotal	403,577	2
Edificações	19711,984	99,46
Equipamento	107,955	0,54
Subtotal	19819,939	98
Total	20223,516	100

As edificações apresentaram os maiores consumos de energia, responsáveis por 99,6%. O segundo componente com maior participação foi o diesel, com 365,83 kcal de energia consumida. Já os demais componentes tiveram participações pequenas, conforme apresenta nas figuras 13 e 14.

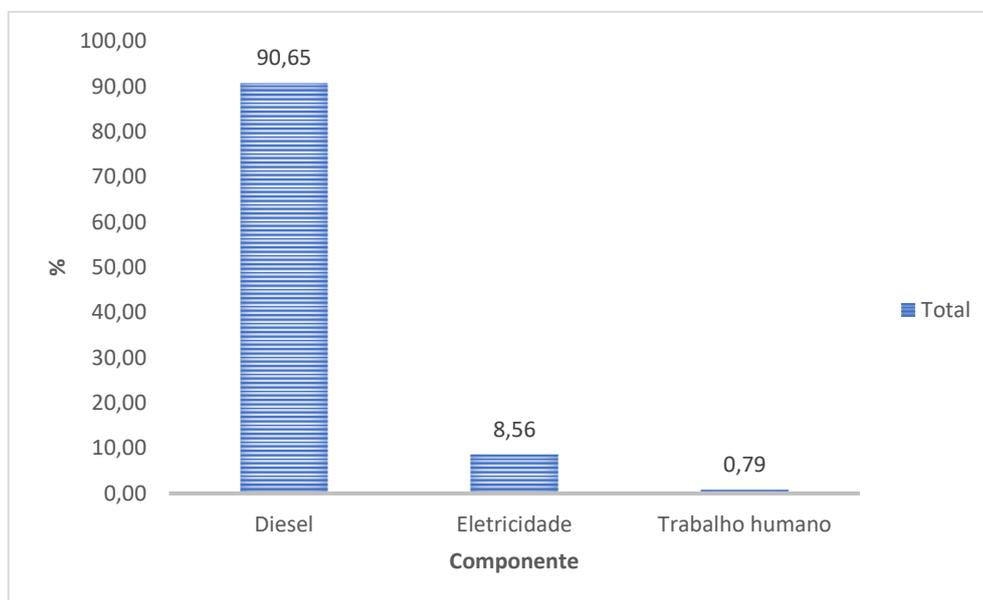


Figura 13- Entradas de energia direta no processo produtivo.

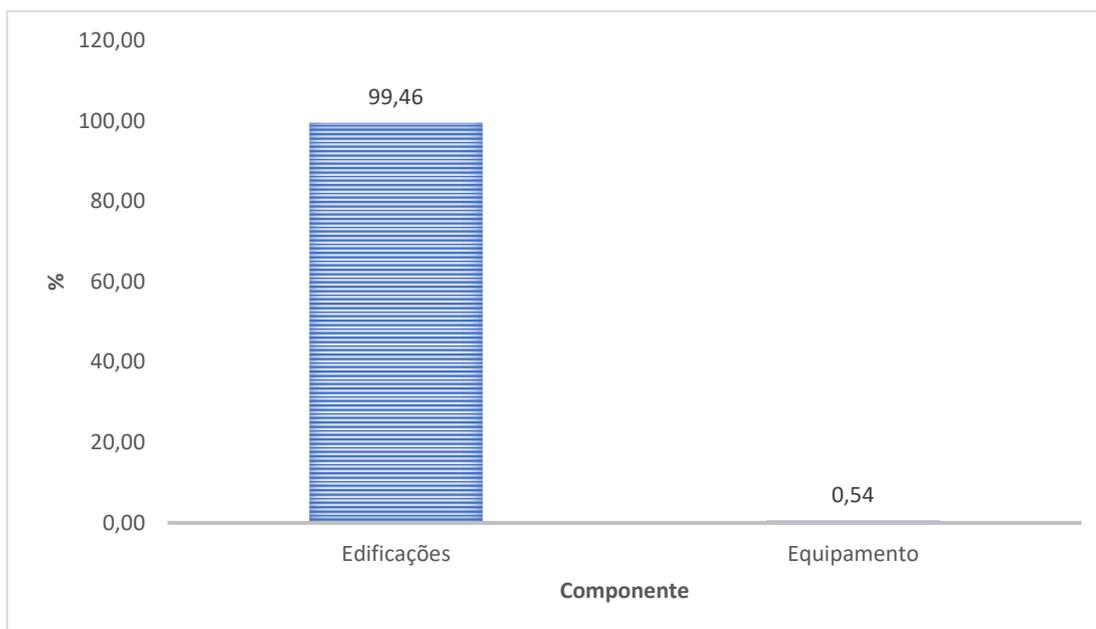


Figura 14- Entradas de energia indireta no sistema produtivo.

Para as saídas do sistema o componente com maior percentual foi biogás com 97,09% seguido biofertilizante que corresponde apenas 2,91% da energia que sai do sistema, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12. Saídas de energia do sistema produtivo.

Componente	Energia (kcal)	%
Biogás	3508,529	97,09
Biofertilizante	105,102	2,91
Total	3613,631	100

A Figura 15 mostra a participação dos componentes de saída.

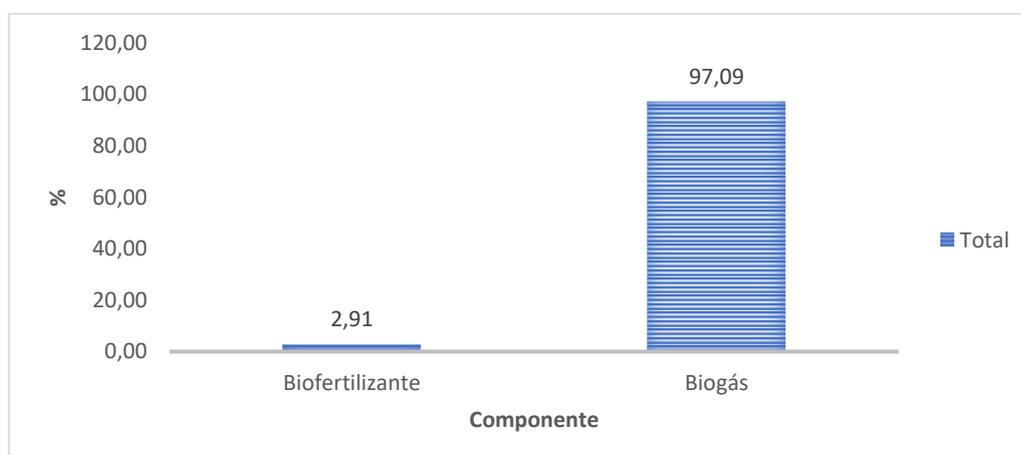


Figura 15- Saída de energia do sistema produtivo.

Por fim, calculou-se que a eficiência energética do sistema foi de 0,179. Porém vale salientar que apesar do balanço energético ser abaixo de 1. Não significa que o balanço econômico também é inferior a 1.

4.1.3 ICV emissões do manejo do esterco

As estimativas e cálculos contribuíram para estimativa do valor de 0,002159 Kg de CH₄ por kWh e de 0,027811 de N₂O por kWh gerado na fazenda leiteira.

No estudo de (Balcioglu et al., 2022) para geração de 1 MWh de energia elétrica foi encontrado o valor de 2,27 Kg de CH₄ e 16,42 Kg para emissões de N₂O, resultados muito próximos aos estimados na fazenda leiteira.

Através dos dados alcançados, pode-se concluir que a fazenda apresenta baixas emissões de GEE ao ar relacionadas ao processo de manejo do esterco, devido à gestão de resíduo do esterco sendo usado como fonte de biogás. Isso ressalta a importância não só da utilização de fontes limpas de energia, mas também do tratamento adequado que deve ser empregado para uma eficiente mitigação de impactos ambientais.

4.1.4 ICV emissões para o ar dos motores

Em busca de adotar limites dos valores de emissões coletados de acordo com as legislações brasileiras, foi utilizado também o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) elaborado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente.

O PROCONVE estabelece emissões de 5 g/kWh para CO, 4,7 g/kWh para NO_x e 0,4 g/kWh para MP para os motores movidos a diesel, para uma máquina agrícola de 75 CV. Assim, a partir destes dados foi estimado as emissões do trator usado na fazenda na fazenda velha.

A partir do estudo de Balcioglu et al., 2022, no qual trouxe dados de emissões de uma planta de 1MWh de energia elétrica, realizando medições de campo em motores movidos a biogás. Onde determinou as emissões de 0,89 Kg/MWh para NO_x, 0,98 Kg/MWh para CO, 0,02 Kg/MWh para N₂O, 0,49 Kg/MWh para CH₄, 0,06 Kg/MWh para compostos orgânicos voláteis sem metano (NMVOC). Assim, a partir destes valores foram estimadas as emissões para a unidade funcional do presente estudo.

Um inventário do ciclo de vida de vida trouxe as emissões de uma planta que utiliza biogás para geração de energia elétrica e ela produz emissões de 540 g/GJ para NOx, 273 g/GJ para CO, 0,5 g/GJ para N₂O, 323 g/GJ para CH₄, 14 g/GJ para NMVOC, 254 g/GJ para UHC e 2,63 g/GJ para MP, valores muito próximos ao estimados para fazenda (Kristensen et al., 2002).

A Figura 13 mostra o comparativo das emissões de CO e NOx entre o motor movido a biogás e o movido a diesel.

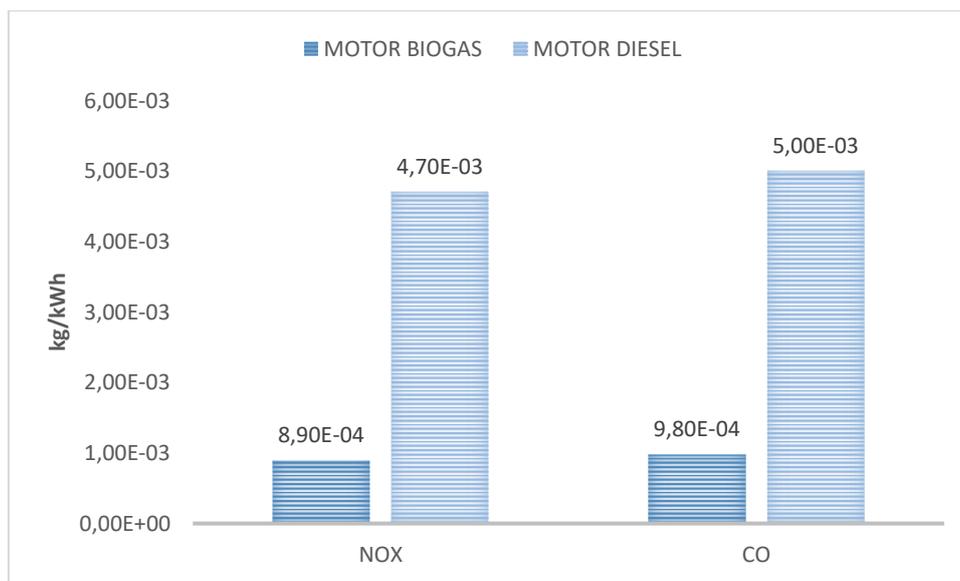


Figura 16. Comparativo das emissões de CO e NOx dos motores a diesel e biogás da fazenda Saia Velha.

As comparações entre os valores de emissões indicam a diferença entre os diferentes combustíveis utilizados, afirmando o potencial do combustível fóssil em causar impactos negativos ao meio ambiente. Os baixos valores de emissões do motor biogás revelam a vantagem em usar o biogás como fonte de energia alternativa, tanto do ponto de vista econômico como ambiental.

5. CONCLUSÕES

O Inventário do Ciclo de Vida do sistema de produção de biogás para geração de energia elétrica utilizando esterco de gado leiteiro traz resultados de dados nacionais de uma propriedade de médio porte. Esses dados podem ser inseridos no banco de dados nacional colaborando com melhoria do desempenho ambiental de produtos e serviços em conjunto com a competitividade da indústria brasileira.

Apesar das limitações em relação aos dados primários coletados, todas as informações de bases secundárias empregadas nesse estudo foram utilizadas considerando a realidade brasileira de uma fazenda leiteira de médio porte para produção de biogás, a qual se diferencia das demais existentes no mundo.

Os dados da produção diária de dejetos, biogás, eletricidade e coprodutos da fazenda leiteira, mostraram que a geração de energia elétrica com o biogás é suficiente para abastecer parte da fazenda em horários de picos. Além de ser uma produção sustentável, possibilitando também uma economia financeira nos gastos com energia elétrica, onde pode-se economizar cerca de 95% no valor do kWh cobrado pela concessionária local, e como também o aproveitamento de seus subprodutos, como o composto sólido usado como cama animal, e o biofertilizante que retorna ao processo de digestão anaeróbica, e futuramente pode ser irrigado nas pastagens.

O balanço energético mostrou que o maior consumo de energia direta de entrada foi o de óleo diesel com 90,65% da categoria, de energia indireta de entrada foi das edificações com 99,46% e o maior percentual de energia de saída do sistema foi de biogás com 97,09. O coeficiente de eficiência energética foi de 0,179.

Em comparação a outros estudos nacionais, os dados coletados neste estudo mostraram-se promissores, onde confirmou que existe uma boa produção do biogás advindo do resíduo do gado leiteiro, como também uma boa conversão do biocombustível em energia elétrica, isso se deve pelo bom dimensionamento do projeto de engenharia, como também da qualidade da matéria prima.

As baixas emissões ao ar dos processos de obtenção do biogás mostram os benefícios ambientais do uso do esterco como matéria-prima e do uso de biocombustível para geração de eletricidade. Essas condições apontam que a Fazenda Saia Velha se encontra dentro do padrão encontrado em literaturas, tendo

em vista seu significativo potencial como colaboradora para a consolidação do uso de energias renováveis no setor agropecuário.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para futuros trabalhos relacionados a consumos energéticos e inventário de ciclo de vida na agricultura, seria muito apropriada a elaboração de um banco de dados nacional para as emissões de gases com dados primários.

Realizar a análise ambiental utilizando a metodologia da ACV, fazendo a avaliação dos impactos, a interpretação dos resultados, e análises de sensibilidade de acordo com as normas ISO 14040 e 14044, utilizando software específico de ACV para a modelagem de três cenários, a fazenda sem o biodigestor, o cenário real e um cenário com melhorias no processo produtivo propondo melhorias para desempenho ambiental de futuras instalações, e realizando uma análise ambiental comparativa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, A. B. de N. T. (2009). ISO 14044 : Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, A. B. de N. Técnicas. (2001). ISO 14.040: Gestão-Ambiental-avaliacão do ciclo de vida principios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Achmad K., Yuli A., Dimas F., Oki I. The effect of C/N ratios of a mixture of beef cattle and water hyacinth (*Eichornia crassipes*) on the quality of biogás and sludge. *Lucrări Științifice*. Vol, 55. p. 117 – 120, 2016.

Ardolino, F., Parrillo, F., & Arena, U. (2018). Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 174, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.320>

Bacenetti, J., Bava, L., Zucali, M., Lovarelli, D., Sandrucci, A., Tamburini, A., & Fiala, M. (2016). Anaerobic digestion and milking frequency as mitigation strategies of the environmental burden in the milk production system. *Science of the Total Environment*, 539, 450–459. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.015>

Bacenetti, J., Bava, L., Zucali, M., Lovarelli, D., Sandrucci, A., Tamburini, A., & Fiala, M. (2016). Anaerobic digestion and milking frequency as mitigation strategies of the environmental burden in the milk production system. *Science of the Total Environment*, 539, 450–459. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.015>

Balcioglu, G., Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2022). Evaluating the environmental and economic sustainability of energy from anaerobic digestion of different feedstocks in Turkey. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 924–941. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.011>

Barreira, P. (2011). Biodigestores: energia fertilidade e saneamento para a zona rural. *São Paulo*, ISBN: 978-85-274-0235-4, Edição: 3ª, p. 106.

BNDES. (2018). Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. *Biogás, BNDES Setorial* 47, p.221-276.

CADISH, G.; SCHUNKE, R. M.; GILLER, K. E. (1994) Nitrogen cycling in a pure grass pasture and a grass-legume mixture on a red latosol in Brazil. *Tropical Grasslands, Brisbane*, v. 28, n. 1, p. 43-52.

Caillot, Vanessa Alueth. Avaliação do potencial de produção de biogás dos resíduos da suinocultura codigeridos com resíduos agricultura brasileira. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Carvalho et al.. Desempenho recente do setor lácteo e perspectivas para 2023. Embrapa, 2023.

Cederberg, C., Meyer D, & Flysjö A. (2009). Life cycle inventory of greenhouse gas emissions and use of land and energy in Brazilian beef production. *SIK Report*, 792. <https://www.researchgate.net/publication/242518937>

Cherubini, E., Zanghelini, G. M., Alvarenga, R. A. F., Franco, D., & Soares, S. R. (2015). Life cycle assessment of swine production in Brazil: A comparison of four manure management systems. *Journal of Cleaner Production*, 87(C), 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.035>

CIBiogás, (2021). Panorama do Biogás no Brasil. *CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2022*, Foz do Iguaçu, 20p.

Claudino, E. S., & Talamini, E. (2012). Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio-Uma revisão de literatura. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 77–85. <http://www.agriambi.com.br>

Divya, D., Gopinath, L. R., & Merlin Christy, P. (2015). A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 690–699). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.055>

Donke, C. G. (2016). Avaliação de desempenho ambiental e energético da produção de etanol de cana, milho e sorgo em uma unidade integrada, segundo a abordagem do ciclo de vida.

Durdević, D., & Hulenčić, I. (2020). Anaerobic digestate treatment selection model for biogas plant costs and emissions reduction. *Processes*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/pr8020142>

EPE. (2019). Relatório Síntese BEN 2019 Ano Base 2018. *Empresa De Pesquisa Energética*, p. 67.

EPE. (2022). Relatório Síntese BEN 2022 Ano Base 2021. *Empresa De Pesquisa Energética*, p. 67.

Freitas, F. F., Furtado, A. C., Piñas, J. A. V., Venturini, O. J., Barros, R. M., & Lora, E. E. S. (2022). Holistic Life Cycle Assessment of a biogas-based electricity generation plant in a pig farm considering co-digestion and an additive. *Energy*, 261, 125340. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125340>

Gavrilova, O., Leip, A., Dong, H., Douglas MacDonald, J., Alfredo Gomez Bravo, C., Amon, B., Barahona Rosales, R., del Prado, A., Aparecida de Lima, M., Oyhantçabal, W., John van der Weerden, T., Widiawati, Y., Bannink, A., Beauchemin, K., & Clark, H. (2006). Chapter 10 emissions from livestock and manure management. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

GEF Biogás Brasil, (2022). Metodologias para integração do biogás na cadeia de valor da agroindústria. *Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações*, p. 124.

Huerta-Reynoso, E. A., López-Aguilar, H. A., Gómez-Méndez, G., Gómez, J. A., & Pérez-Hernández, A. (2022). Uncertainty of the life cycle assessment of biogas power. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 38, 271–287. <https://doi.org/10.20937/RICA.54121>

Ioannou-Ttofa, L., Foteinis, S., Seifelnasr Moustafa, A., Abdelsalam, E., Samer, M., & Fatta-Kassinos, D. (2021). Life cycle assessment of household biogas production in Egypt: Influence of digester volume, biogas leakages, and digestate valorization as biofertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125468>

Khoshgoftar Manesh, M. H., Rezazadeh, A., & Kabiri, S. (2020). A feasibility study on the potential, economic, and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran. *Renewable Energy*, 159, 87–106. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.173>

Kristensen, P. G., Jensen, J. K., Nielsen, M., & Boll Illerup, J. (2002). Emission factors from gas fired CHP units < 25 MW. *National Environmental Research Institute, Frederiksborgvej, 399*.

Kunz, A., Luis, R., Steinmetz, R., & Cestonaro, A. (2019). *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato* (EMBRAPA, Vol. 1).

Li, B., Dinkler, K., Zhao, N., Sobhi, M., Merkle, W., Liu, S., Dong, R., Oechsner, H., & Guo, J. (2020). Influence of anaerobic digestion on the labile phosphorus in pig, chicken, and dairy manure. *Science of the Total Environment, 737*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140234>

Lombardi, L., & Francini, G. (2020). Techno-economic and environmental assessment of the main biogas upgrading technologies. *Renewable Energy, 156*, 440–458. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.083>

Lopes, T. A. de S. (2014). *Avaliação do ciclo de vida de uma ete composta por reator uasb seguido de wetlands construídos*.

Macedo, I. de C., Sousa, L., & L., E. (2010). *Etanol e bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética*.

Makk, Á. N., Rétfalvi, T., & Hofmann, T. (2017). Utilization of Oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) bark for anaerobic digested biogas production. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 13*(2), 125–134. <https://doi.org/10.1515/aslh-2017-0009>

MAPA, 2023. Mapa do leite: Políticas públicas e privadas para o leite. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2023.

Martín-Hernández, E., Guerras, L. S., & Martín, M. (2020). *Optimal technology selection for the biogas upgrading to biomethane*.

Martins Maciel, A., Henrique Otenio, M., Romário de Paula, V., Mendonça Lourenço Benhami, V., Moro Piekarski, C., Marçal da Rocha, C., & Oliveira Barros, N. (2022). Life cycle assessment of milk production system in Brazil: Environmental impact reduction linked with anaerobic treatment of dairy manure. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 54*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102883>

MCTI, (2010). Emissões de metano por fermentação entérica e manejo de dejetos de animais. *Ministério da Ciência e Tecnologia*, p.121.

MMA, IBAMA (2012). Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). Ministério do Meio Ambiente e *Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente e Dos Recursos Naturais Renováveis*, p.10.

Muratçobanoğlu, H., Gökçek, Ö. B., Mert, R. A., Zan, R., & Demirel, S. (2020). Simultaneous synergistic effects of graphite addition and co-digestion of food waste and cow manure: Biogas production and microbial community. *Bioresource Technology*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123365>

Murto, m.; bjornsson, l.; mattiasson, b. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management*, 70 p.101-107, 2004.

Nishimura, R. Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: implementação de aplicativo computacional. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Fundação Universidade Federal de Matogrosso do Sul, 2009.

Nunes, M. (2014). Análise da Viabilidade econômica para geração de energia elétrica através do uso de biodigestor em pecuária de leite de pequeno porte. *Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR)*.

Oliveira, A. de S. (2017). Avaliação de impactos ambientais do módulo fotovoltaico: produção e uso como fonte de energia elétrica. Dissertação - *Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília*. Brasília, p.77.

Ramírez-Arpide, F. R., Demirer, G. N., Gallegos-Vázquez, C., Hernández-Eugenio, G., Santoyo-Cortés, V. H., & Espinosa-Solares, T. (2018). Life cycle assessment of biogas production through anaerobic co-digestion of nopal cladodes and dairy cow manure. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2313–2322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.180>

Regazi, Almeida et al. Effects of the carbon-nitrogen ratio on the biogas production from municipal organic solid waste. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.9, p. 87033-87044 sep. 2021. DOI:10.34117/bjdv7n9-050

Rivas-Garcia, P., Botello-Alvarez, J. E., Abel Seabra, J. E., da Silva Walter, A. C., & Estrada-Baltazar, A. (2015). Environmental implications of anaerobic digestion for manure management in dairy farms in Mexico: A life cycle perspective. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36(17), 2198–2209. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1024758>

Rocha, M. V. P. (2010). *Produção de bioetanol a partir de pendúnculo de caju (Anacardium occidentale L.) por fermentação submersa*. Tese- Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte Centro De Tecnologia Departamento De Engenharia Química Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Química, Natal, p.213.

Rodrigues, T. O. (2013). *Avaliação dos impactos ambientais da produção de bioóleo a partir de serragem no estado do Pará*. Tese- Universidade De Brasília faculdade De Tecnologia Departamento De Engenharia Florestal, Brasília, p.197.

Safieddin Ardebili, S. M. (2020). Green electricity generation potential from biogas produced by anaerobic digestion of farm animal waste and agriculture residues in Iran. *Renewable Energy*, 154, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.102>

Sarker, S. A., Wang, S., Adnan, K. M. M., & Sattar, M. N. (2020). Economic feasibility and determinants of biogas technology adoption: Evidence from Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109766>

Skorek-Osikowska, A., Martín-Gamboa, M., & Dufour, J. (2020). Thermodynamic, economic and environmental assessment of renewable natural gas production systems. *Energy Conversion and Management: X*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100046>

Tommy, Karlsson et al. *Manual básico de biogás*. Lajeado : Ed. da Univates, 2014.

Vázquez-Rowe, I., Golkowska, K., Lebuf, V., Vaneekhaute, C., Michels, E., Meers, E., Benetto, E., & Koster, D. (2015). Environmental assessment of digestate treatment technologies using LCA methodology. *Waste Management*, 43, 442–459. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.007>

Vázquez-Rowe, I., Golkowska, K., Lebuf, V., Vaneekhaute, C., Michels, E., Meers, E., Benetto, E., & Koster, D. (2015). Environmental assessment of digestate treatment

technologies using LCA methodology. *Waste Management*, 43, 442–459. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.007>

Vilela, F. S. V. (2013). Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar estudo de caso: usina jalles machado s/a. Dissertação – *Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília*. Brasília, p.93.

Wang, H., Liu, J., Li, J., Jia, Z., & Li, C. (2022). Comparative life cycle assessment of rex rabbit breeding industry chains: benefits of a circular industry chain. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(3), 366–379. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02036-x>

Wu, W., Cheng, L. C., & Chang, J. S. (2020). Environmental life cycle comparisons of pig farming integrated with anaerobic digestion and algae-based wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110512>

Zhang, S., Bi, X. T., & Clift, R. (2015). Life cycle analysis of a biogas-centred integrated dairy farm-greenhouse system in British Columbia. *Process Safety and Environmental Protection*, 93, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.02.017>

Apêndice

Questionários utilizados para levantamento do inventário.

INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA				
TOTAL DE ANIMAIS:				
MANEJO E TRANSPORTE DO ESTRUME				
FLUXOS	QUANTIDADE	UNIDADE DE MEDIDA	OBSERVAÇÃO	DADOS REFERENCIA
MATERIAS				
ESTERCO				
ÁGUA				
ENERGIA				
DIESEL				
PRODUTO				
H2O+ ESTERCO				
EMISSÕES				
RESÍDUOS				
EMISSÕES			DADOS SECUNDÁRIOS	
TRATAMENTO DA MATÉRIA-PRIMA				
FLUXOS	QUANTIDADE	UNIDADE DE MEDIDA	OBSERVAÇÃO	DADOS REFERENCIA
MATERIAS				
H2O+ ESTERCO				
ENERGIA				
DIESEL				
PRODUTO				
CHORUME				
emissoes				
RESÍDUOS				
COMPOSTO SÓLIDO				
PRODUÇÃO DE BIOGÁS				
FLUXOS	QUANTIDADE	UNIDADE DE MEDIDA	OBSERVAÇÃO	DADOS REFERENCIA
MATERIAS				
CHORUME				
ENERGIA				
PRODUTO				
BIOGÁS				
RESÍDUOS				
BIOFERTILIZANTE				
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA				
FLUXOS	QUANTIDADE	UNIDADE DE MEDIDA	OBSERVAÇÃO	DADOS REFERENCIA
MATERIAS				
BIOGÁS				
PRODUTO				
ELETRICIDADE				
RESÍDUOS				
EMISSÕES AR			DADOS SECUNDÁRIOS	
RESIDUO LÍQUIDO			DADOS SECUNDÁRIOS	

ENERGIA			
MANEJO E TRANSPORTE DO ESTRUME			
EQUIPAMENTO	POTENCIA/COSUMO	HORAS/KM	CONSUMO DIA
TRATOR			
MOTOR AGITADOR TANQUE			
BOMBA SUCCÃO			
TRATAMENTO DA MATÉRIA-PRIMA			
EQUIPAMENTO	POTENCIA/COSUMO	HORAS/KM	COSUMO DIA
MOTOR SEPARADOR			
COMPRESSOR			
TRATOR			
PRODUÇÃO DE BIOGÁS			
EQUIPAMENTO	POTENCIA/COSUMO	HORAS/KM	COSUMO DIA
MOTOR AGITADOR			
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA			
EQUIPAMENTO	POTENCIA/COSUMO	HORAS/KM	COSUMO DIA
GERADOR			

MATÉRIA PRIMA	
PRODUTO	QTE
COMPOSTO	
ESTERCO+H2O	

EQUIPAMENTOS	
EQUIPAMENTO	POTÊNCIA
TRATOR	
MOTOR AGITADOR TANQUE	
BOMBA SUCCÃO	
MOTOR SEPARADOR	
COMPRESSOR	
MOTOR AGITADOR BIO	
GERADOR	
FILTRO	

BIODIGESTOR	
TIPO	
DIMENSÃO	
VOLUME GÁS	

Proprietário	
Fazenda	
Município	
Plantel	
Regime	

Matéria Orgânica		
Descrição	Quantidade	Unidade
Produção Dejeto / Animal / Dia	120	L
Produção Dejeto Total Dia		L
TRH	40	dias
Total em tratamento		m ³
Produção composto / animal / dia		Kg/d
Produção composto estimado / dia		Kg/d
Produção composto estimado / mês		Kg/mês
Produção biofertilizante / animal / dia		Lt/d
Produção biofertilizante estimado /dia		Lt/d
Produção biofertilizante estimado / mês		Lt/mês

Biogás		
Descrição	Quantidade	Unidade
Produção biogás / animal / dia*	2	Nm ³ /d
Produção biogás estimada / dia*		Nm ³ /d
Consumo Grupo Gerador 120Kva*		Nm ³ /h
Geração Kw/H Estimada Gerador 120Kva*		Kw/h
Hora trabalhadas estimadas*		Hrs/dia
Total gerado estimado dia*		Kw/h/dia
Custo Estimado Kw/h*		R\$/h