



## Potencial de geração de metano e energia elétrica em fazenda leiteira

Felipe Bernardo Soldano<sup>1\*</sup>

Marcus Cesar Avezum Alves de Castro<sup>2</sup>

**Resumo:** O Brasil possui um dos maiores rebanhos leiteiros do mundo, alcançando o 6° lugar na produção de leite. Como consequência, devido ao tamanho do rebanho, são geradas grandes quantidades de esterco com alto potencial energético que pode ser alcançado através da conversão do biodigestor. A utilização desse dejetos pode se tornar uma opção viável ambiental e economicamente, uma vez que o manejo inadequado desse tipo de resíduo sólido pode causar danos ao solo, ar e água. A pesquisa foi realizada em uma fazenda leiteira com 126 animais em lactação criados no sistema Compost Barn o leite é obtido por ordenha mecânica. Foram realizadas análises de sólidos totais, fixos e voláteis de diferentes amostras de dejetos para estimar a geração de metano por meio de modelos matemáticos. O resultado obtido foi então comparado com o consumo de energia da propriedade, visando descobrir se o uso do biodigestor para geração de energia pode diminuir os gastos com energia e ao mesmo tempo reduzir os potenciais impactos ambientais causados pelo esterco.

**Palavras-chave:** Esterco; Pecuária leiteira; Biogás; Energia; Metano.

### Potential for methane and electricity generation on a dairy farm

**Abstract:** Brazil has one of the biggest dairy herds worldwide, reaching 6° place in milk production. As a consequence, great amounts of manure with high energy potential through biodigester conversion are generated due to the size of the herd. The usage of that manure could become a viable option both environmentally and economically once the bad management of this type of solid waste can cause damage to soil, air and water. The research was carried out in a dairy farm with 126 lactating animals raised under Compost Barn's system and milked by a milking machine. Analyzes of total, fixed and volatile solids of different manure samples were realized in order to estimate the generation of methane through mathematical models. The result obtained was then compared to the energy consumption of the property, willing to discover if the usage of biodigester to generate energy can low the expenses with energy whilst reducing potential environment impacts caused by the manure.

**Keywords:** Manure; Dairy farming; Biogas; Energy; Methane.

<sup>1</sup> Universidade de Araraquara – UNIARA, Brasil. \*Autor correspondente: [felipe\\_soldano@hotmail.com](mailto:felipe_soldano@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista- UNESP, Brasil.

## Introdução

O desempenho da agropecuária no Brasil é notável (GOMES *et al.*, 2014). Em 2021, o setor cresceu 10,78% em relação a 2020, segundo o CEPEA. A pecuária leiteira é uma parte significativa desse setor e, em 2016, produziu um recorde de 798 milhões de toneladas de leite cru, ocupando o 6º lugar no ranking mundial da FAO (2018). Esse recorde foi impulsionado pelo aumento do consumo per capita de laticínios, que alcançou 175 kg por ano em 2017 (EMBRAPA, 2019), e pelo crescimento do rebanho nacional, que atingiu 25 milhões de animais (EMBRAPA, 2018). Esse crescimento se deve à mudança do manejo extensivo para intensivo e a melhores práticas de cuidado animal.

O principal resíduo da pecuária leiteira é o dejetos animal, com uma vaca gerando entre 24 e 40 kg/dia (ENSMINGER *et al.*, 1990; FRASER, 1980), totalizando aproximadamente 1.000.000 t/dia para o rebanho nacional. Esses dejetos frequentemente são mal aplicados em lavouras e pastos como adubos e fertilizantes orgânicos (GOMES, 2014). A aplicação inadequada pode causar impactos ambientais, como eutrofização devido ao escoamento para corpos hídricos (HOODA *et al.*, 2000; SHIGAKI *et al.*, 2006 apud MORI *et al.*, 2009) e a emissão de gases de efeito estufa durante a decomposição ao ar livre (ARRIAGA *et al.*, 2017).

A mecanização do setor, promovida pela Instrução Normativa 51/2002, que exige o uso de ordenhadeiras mecânicas e tanques de resfriamento, contribuiu para o crescimento do setor, mas também aumentou o consumo de energia elétrica, elevando os custos de produção e reduzindo a margem de lucro.

Os biodigestores surgem como uma solução para esses problemas. Eles produzem biogás, que pode ser usado para gerar energia, e biofertilizante, que pode substituir fertilizantes químicos e reduzir os impactos ambientais. No Brasil, o número de biodigestores aumentou para 675 em 2020, com 79% processando resíduos agropecuários (CIBiogás, 2020).

A estimativa do potencial de geração de energia pela decomposição anaeróbia foi realizada teoricamente devido às restrições impostas pela pandemia de COVID-19, que impossibilitou simulações práticas. Utilizaram-se modelos matemáticos para calcular a produção de biogás e sua conversão em energia.

Foram adotados dois cenários: o modelo de Kunz & Oliveira (2006) e o IPCC TIER 2 (2006). O modelo de Kunz & Oliveira é amplamente utilizado para estimativas em propriedades leiteiras, com um valor constante de  $B_0$  de 0,13  $m^3CH_4/Kg$  dejetos. Os dados de entrada incluem o peso total dos dejetos gerados diariamente, o teor de sólidos voláteis e o tamanho do rebanho. As equações 5 e 6 fornecem a estimativa volumétrica de metano gerado em 24 horas.

O modelo do IPCC TIER 2 também usa o valor de  $B_0$  de 0,13  $m^3CH_4 /Kg$  dejetos, mas considera a produção de metano ao longo de um ano, exigindo dados como o peso de sólidos voláteis por animal e o tamanho do rebanho.

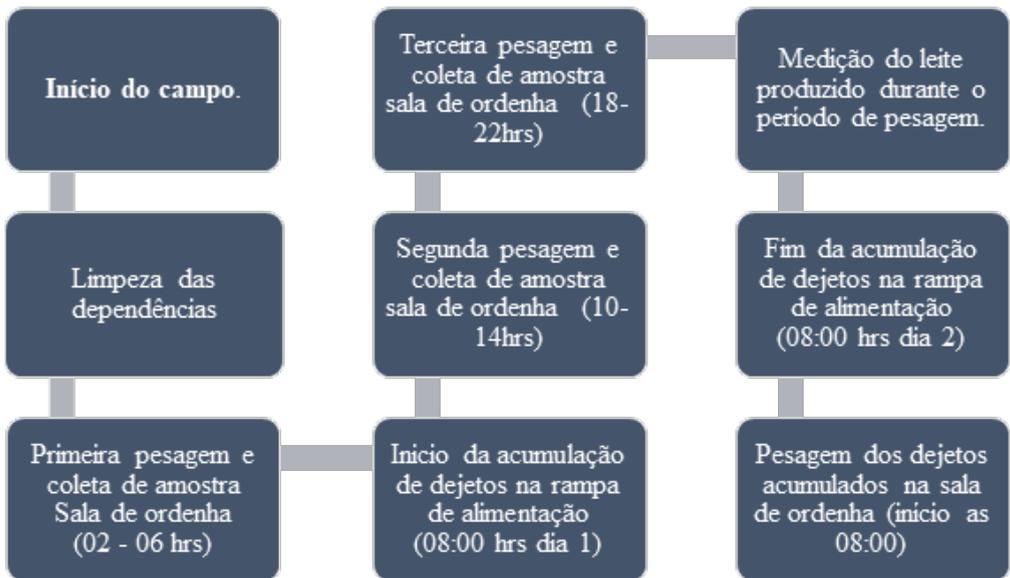
Inclui fatores adicionais como o Fator de Conversão de Manejo (FCM) e o Fator do Sistema de Gerenciamento (SM). Este modelo oferece uma análise mais ampla do impacto ambiental e energético anual.

A comparação entre os modelos revela que o de Kunz & Oliveira é mais adequado para estimativas diárias e manejo intensivo, enquanto o IPCC é mais útil para análises de longo prazo. A combinação de ambos modelos aumenta a confiabilidade das estimativas do potencial energético e a viabilidade financeira de biodigestores. Os dados utilizados estão na Tabela 2, adaptada de Mito (2018).

### Metodologia

O trabalho respeitou três etapas de planejamento sendo, trabalho de campo, análises laboratoriais e análise de dados. A primeira etapa respeitou o fluxograma abaixo (Figura 1).

**Figura 1** - Fluxograma das atividades realizadas para quantificação dos dejetos gerados na propriedade.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As amostras foram homogêneas para coleta e separadas em relação ao seu local de origem, para só então serem enviadas para análise laboratorial.

As análises em laboratório foram realizadas no Centro de Estudos Ambientais (CEA) - UNESP, no campus Rio claro, e se limitaram a análises do segundo e terceiro campo devido a presente pandemia do vírus Sars-cov-2

(Covid-19) que impossibilitou o uso das dependências do CEA no período da realização do primeiro campo.

As análises realizadas foram: sólidos totais, fixos e voláteis, seguindo a metodologia descrita pela SABESP (NTSO13). As amostras foram analisadas em triplicata.

### Cenários de geração

*Kunz e Oliveira (2006)*

O modelo indica a geração de metano de forma volumétrica pela digestão dos dejetos gerados pelo rebanho no período de 24 horas através das equações 1 e 2. O cálculo deste modelo se inicia pela equação 6, que fornece o valor de Q utilizado na equação 1. As equações, as variáveis e os valores utilizados estão expostos abaixo.

Equação 1: Cálculo da estimativa da produção diária de Metano conforme Kunz.

$$PrM = B_0 \times SV \times Q$$

Onde:

PrM - produção diária de Metano – ( $m^3CH_4$  dia<sup>-1</sup>)

BO - capacidade máxima teórica de produção de Metano pelo dejetos – ( $m^3CH_4$  kgSV<sup>-1</sup>) – Valor obtido na literatura 0,13

Sv - concentração de sólidos voláteis – (gSV L<sup>-1</sup>) – Valor obtido em laboratório 88,93

Q - Volume total de dejetos produzidos ao dia – ( $m^3$  dia<sup>-1</sup>). O valor de Q é obtido da equação 6.

Equação 2: Cálculo do volume de efluentes gerados ao dia.

$$Q = N^o \times PD$$

Onde:

Q - Volume total de dejetos produzidos ao dia – ( $m^3$  dia<sup>-1</sup>)

N - Número de animais – (Número inteiro) – Valor obtido em campo - 126

PD - Volume de dejetos produzidos por animal e categoria ao dia – ( $m^3$ /cab. dia) – Valor calculado 0,03

O valor requerido na variável Sv é a unidade de medida “gSV/L” que expressa seu volume dos sólidos totais na amostra, enquanto os valores obtidos em laboratório representavam a quantidade de sólidos voláteis na amostra através do peso (g), tornando necessária a conversão dos resultados iniciais. Primeiramente, foi identificada a representatividade da amostra processada em laboratório em 1L de dejetos com densidade de 944,8g/L, o resultado obtido foi multiplicado pelo peso de sólidos voláteis da amostra, fornecendo então

quantos gramas de sólidos voláteis existem em 1,0 L dos dejetos coletados em campo.

Finalizada a conversão, foi utilizada a equação 5, cujo produto final (PrM) expressa o volume de gás metano gerado em 24 horas.

### IPCC (2006)

O modelo é composto pelas equações 3 e 4, e expressa o resultado considerando a geração de metano por um sistema produtivo leiteiro ao decorrer de 365 dias, para equalizar os resultados obtidos entre os cenários, os valores foram ser retrabalhados para também expressar a geração de biogás no período de 24 horas.

Equação 3: Cálculo do fator de emissão de metano.

$$FEM = SV \times 365 \times \beta_0 \times 0,67 \times \frac{FCM}{100} \times SM$$

Onde:

FEM - Fator de emissão de metano por população/categoria – (kgCH<sub>4</sub> cab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>)

Sv – Sólidos voláteis – (kgSV cab<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>) – Valor obtido em laboratório - 2,68

BO - Capacidade de produção de metano pelo dejetos – (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.kgSV<sup>-1</sup>) – Valor obtido na literatura 0,13

0,67 - Conversão de m<sup>3</sup> metano para kg metano - adimensional

FCM - Fator de conversão de acordo com o manejo - %

SM - Fator do sistema de gerenciamento dos resíduos – adimensional

Equação 4: Cálculo da emissão de metano.

$$CH_4dejetos = \sum \frac{FEM \times N}{10^6}$$

Onde:

CH<sub>4</sub>dej - emissão de metano durante o manejo de dejetos – GgCH<sub>4</sub> ano

FEM - Fator de emissão de metano por população/categoria - KgCH<sub>4</sub>

N - Número de animais da categoria em questão – Número inteiro – Valor obtido em campo – 126

O cálculo realizado para determinar a quantidade de sólidos voláteis gerados por animal consistiu em extrapolar a relação “gramas de sólidos voláteis por gramas de amostra”, tendo como terceiro elemento conhecido o peso total dos dejetos gerados, realizando uma relação direta entre três variáveis, onde, o valor a ser identificado é o peso total de sólidos voláteis no total de dejetos gerados em 24 horas, sendo este resultado dividido pelo número de animais no rebanho.

O produto final foi dividido pelo tamanho médio do rebanho e representa a quantidade de sólidos voláteis presentes nos dejetos de 1 animal do rebanho no decorrer de um dia.

*Barros, Filho e Silva (2014)*

Os valores obtidos em ambos os cenários de geração de metano integrarão a equação 5, sendo representados pela variável "Q". Foi necessário realizar a conversão do resultado obtido no cenário do IPCC (2006) de peso ( $GgCH_4$ /ano) para volume ( $m^3CH_4$ /ano). Esta conversão foi realizada multiplicando o resultado obtido em  $GgCH_4$  pela densidade do gás.

Equação 5: Calculo utilizado para projetar a geração de energia.

$$P_{energia} = \frac{Q \cdot PC_{metano} \cdot n \cdot h}{31.536.000}$$

Onde:

Penergia – Potencial de energia disponível por ano (kWh)

Q – Vazão de metano por ano ( $m^3$ /ano) – Obtido nos cenários de geração de Metano.

PCmetano – Poder calorífico do metano (KJ/h) – 35.530 – Valor obtido na literatura.

N – Eficiência do grupo motor gerador (%) – 28,8 – Valor obtido na literatura

H – Horas de funcionamento do grupo motor gerador por ano (h) – 2.920 – Valor obtido na literatura.

31536.000 – Segundos por ano (s/Ano) – Valor obtido na literatura.

## Resultados

Os primeiros resultados obtidos foram produto do questionário aplicado ao início do trabalho, relativos ao tamanho do rebanho, produção de leite diário e consumo de energia elétrica por mês. Os valores obtidos estão na Tabela 1.

**Tabela 1** - Resultados obtidos através do questionário sobre características da propriedade.

Rebanho (cabeças)	Leite produzido (L/d)	Energia consumida (kWh/d)	Energia consumida (kWh/Mês)
126	3.985	81	2.430

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O cruzamento dos dados obtidos em campo possibilitou a geração de 3 indicadores, Leite produzido por animal, energia consumida por animal e leite

produzido por kWh de energia consumida. Os valores destes indicadores estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Indicadores calculados a partir dos resultados do questionário sobre características da propriedade.

Leite produzido por animal por dia(L/cab)	Energia consumida por animal por dia (kWh/cab)	Energia consumida por leite produzido (kWh/L)
31,209	0,643	0,0203

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir dos trabalhos de campo realizados foi estabelecido uma média de dejetos gerados por animal por dia, com valores discriminados para a geração na sala de ordenha e na rampa de alimentação, os valores estão dispostos na Tabela 3.

**Tabela 3** - Dejetos gerados na propriedade em 24 horas, de acordo com o local de origem.

Dejetos (kg) sala de ordenha	Dejetos(Kg) Rampa de alimentação	Total dejetos (Kg)
451,4	3141,3	3592,7

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise dos resultados do questionário dos campos permitiu apurar a geração de dejetos por animal, e assim comparar o resultado obtido com os valores disponíveis na bibliografia, como exposto na Tabela 4.

As análises de laboratório forneceram dados referentes às características dos dejetos, os valores de sólidos totais, voláteis e fixos foram convertidos de peso para porcentagem. Os resultados estão organizados na Tabela 5.

**Tabela 4** - Comparação dos valor de geração de dejetos/bovino obtido na pesquisa com os dados da literatura.

Autor	Rebanho	Dejetos por vaca (Kg)
Marsh & Campling (1970)	Não Informa	19 – 40
Fraser (1980)	Não Informa	40
Ensminger et al. (1990)	Não Informa	24
Hirata (1990)	22	15,5
Coldebella (2006)	130	46
Santos & Morais (2009)	68	14
Grimello & Velázquez (2013)	350	18
Adam et al. (2014)	22	16
Junqueira (2014)	80	25
Montoro et al. (2014)	5000	13,3
Montoro et al. (2017)	5000	13,9
Hamid & Blanchard (2018)	25	25,1
Hirano & Silva (2018)	240	40
Autor	126	28,51

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 5** - Resultados obtidos através das análises laboratoriais.

Teor de umidade (%)	Sólidos Totais (%)	Sólidos voláteis (%)	Sólidos fixos (%)
88,1	11,8	80,05	19,95

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Cada modelo de geração de metano gerou um cenário produtivo único. Iniciando pelo modelo proposto por Kunz & Oliveira (2006), que indica primeiramente a quantidade volumétrica de dejetos gerados por animal no período de 24 horas, o resultado obtido nesta etapa foi de 0,030 m<sup>3</sup>/dia.

Com base na geração volumétrica de dejetos por animal, foi estimada a geração de metano (em volume) no período de 24 horas (geração de m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/dia) por todo o rebanho. Os resultados gerados pelo roteiro estão expostos na Tabela 6.

**Tabela 6** - Estimativa de geração de metano pelo roteiro matemático proposto por Kunz e Oliveira (2006).

Categoria do resultado	Valor obtido
Volume de dejetos gerado por animal	0,03 m <sup>3</sup> /animal.dia
Volume total de dejetos gerado pelo rebanho	3,80 m <sup>3</sup> /dia
Metano gerado por dia	43,99 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /dia
Metano gerado por mês	1.338,08 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mês
Metano gerado por ano	16.056 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ano

Fonte: Elaborada pelo autor.

O cenário baseado no roteiro matemático proposto pelo IPCC – TIER 2 (2006) considera a geração de metano por um sistema produtivo leiteiro ao decorrer de 365 dias, para equalizar os resultados obtidos entre os cenários, os valores foram retrabalhados para também expressar a geração de biogás no período de 24 horas.

Neste cenário os dados de entrada são teor de sólidos voláteis e o tamanho do rebanho. Os resultados obtidos são expressos em KgCH<sub>4</sub> e estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7**- Resultados obtidos através do roteiro matemático do IPCC (2006).

Categoria do resultado	Valor obtido
Sv gerados por animal/dia	2,68 KgSv/cab.dia
Metano gerado por cada animal/ano	67,44 KgCH <sub>4</sub> /cab.ano
Volume de metano gerado por mês	1.077 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mês
Volume de metano gerado pelo rebanho/ano	12.935 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ano

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para fins de comparação e análise dos modelos, os valores obtidos foram convertidos de peso para volume, nesse sentido, até o momento os resultados indicam a geração de 0,28m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/cab (35,44m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/dia). O resultado final será posteriormente convertido em potencial geração de energia.

A estimativa de geração de energia foi realizada de acordo com metodologia descrita, e gerou um valor para cada cenário de geração de metano. Os resultados obtidos estão na Tabela 8.

**Tabela 8** - Energia obtida pela conversão do metano estimado nos cenários de geração, por mês e por ano.

Cenário	Consumo de energia elétrica/mês	Geração de CH <sub>4</sub> /ano	Geração de CH <sub>4</sub> /mês	Potencial energia elétrica/mês	Potencial energia elétrica/ano
Kunz & Oliveira (2006)	2.430 kWh/mês	16.054 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mês	1.338,08 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mês	1.232,5 kWh/mês	15.212,78 kWh/ano
IPCC (2006)	2.430 kWh/mês	12.935 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mês	1.077 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mês	992,08 kWh/mês	12.550,9 kWh/ano

Fonte: Elaborada pelo Autor.

## Discussão

### Avaliação dos Cenários de Geração de Metano

A comparação entre os modelos de Kunz e Oliveira (2006) e o IPCC (2006) revela aspectos importantes sobre as diferentes metodologias para o cálculo da geração de metano e suas respectivas implicações práticas, especialmente no contexto de propriedades leiteiras de médio porte que buscam adotar a biodigestão como solução energética. O modelo de Kunz & Oliveira, ao considerar parâmetros mais ajustados às condições locais e práticas de manejo do gado no Brasil, estimou uma produção de metano diária de 43,99 m<sup>3</sup>, enquanto o modelo do IPCC, que segue uma abordagem mais global, estimou uma produção menor, de 35,44 m<sup>3</sup> por dia. Essa diferença, que corresponde a aproximadamente 19%, destaca como os modelos podem divergir ao considerar variáveis locais e específicas.

Uma das principais razões para essa discrepância entre os resultados reside no fato de que o modelo de Kunz & Oliveira leva em consideração fatores diretamente relacionados às práticas de manejo intensivo utilizadas nas propriedades brasileiras, como o confinamento dos animais em áreas restritas, que facilita a coleta e o aproveitamento dos dejetos. Esse modelo também reflete melhor as características da pecuária intensiva adotada em propriedades de médio porte, onde o uso de compost barn, ordenhadeiras mecânicas e outros equipamentos padronizados influenciam diretamente na produção de dejetos e, conseqüentemente, no potencial de geração de metano.

Já o modelo do IPCC, sendo um padrão internacional, busca oferecer uma metodologia aplicável a uma ampla gama de realidades, desde sistemas de produção intensiva até extensiva, em diferentes regiões do mundo. Por essa razão, ele pode subestimar o potencial de geração de metano em propriedades brasileiras que utilizam práticas mais intensivas de manejo, uma vez que não

considera com o mesmo nível de detalhe as particularidades de cada região ou sistema de produção. Isso explica a estimativa mais conservadora de 35,44 m<sup>3</sup> por dia de metano, apesar de ser uma quantidade ainda significativa.

A diferença de aproximadamente 19% entre os dois modelos, embora possa parecer considerável, não compromete a viabilidade econômica ou técnica de nenhum dos cenários analisados. Pelo contrário, ambos os modelos confirmam que a propriedade estudada apresenta um grande potencial para a geração de metano e, portanto, para a produção de energia a partir dos dejetos gerados. Independentemente do modelo utilizado, os resultados indicam que a implementação de um biodigestor seria uma solução viável para a geração de energia, promovendo benefícios tanto econômicos quanto ambientais para a propriedade.

O cenário apresentado pelo modelo de Kunz & Oliveira, ao sugerir um maior volume de metano gerado, também aponta para um potencial ainda maior de retorno econômico para propriedades que adotem práticas otimizadas de manejo e coleta de dejetos. Esse resultado destaca a importância de otimizar as práticas de manejo para maximizar a coleta de dejetos e, conseqüentemente, aumentar a produção de biogás. A adoção de sistemas que favorecem a coleta eficiente de dejetos, como o compost barn, a limpeza regular e o uso de sistemas de captação adequados, pode aumentar substancialmente o volume de metano gerado e, com isso, melhorar o retorno sobre o investimento na instalação de biodigestores.

Além disso, é importante ressaltar que a implementação de biodigestores não apenas contribui para a produção de energia limpa, mas também oferece uma série de benefícios adicionais, como a redução das emissões de gases de efeito estufa e a diminuição de problemas ambientais associados ao manejo inadequado de dejetos. A produção de biogás a partir de dejetos não tratados pode reduzir significativamente a emissão de metano na atmosfera, um gás de efeito estufa com um potencial de aquecimento global muito superior ao do dióxido de carbono. Assim, além de melhorar a eficiência energética da propriedade, a adoção dessa tecnologia pode contribuir diretamente para mitigar os impactos ambientais da pecuária intensiva.

Ao considerar os aspectos econômicos, o cenário de Kunz & Oliveira, que apresenta uma maior estimativa de geração de metano, sugere que propriedades que adotam essa abordagem podem esperar um retorno econômico mais rápido e significativo. Com um maior volume de biogás disponível, a geração de energia elétrica e térmica se torna mais eficiente, possibilitando uma maior economia nos custos com energia. Essa economia pode ser particularmente relevante em regiões onde o custo da energia elétrica é elevado ou onde há oscilações nas tarifas de energia ao longo do ano, como no caso das bandeiras tarifárias.

Portanto, a comparação entre os modelos não deve ser vista apenas como uma diferença de resultados numéricos, mas sim como uma oportunidade para entender como diferentes metodologias podem se ajustar melhor a diferentes realidades. O modelo de Kunz & Oliveira, com seu foco específico nas condições brasileiras, oferece uma visão mais otimista e precisa do potencial de geração de metano em propriedades leiteiras de médio porte no Brasil. Já o modelo do IPCC, mais generalista, pode ser utilizado como um ponto de referência, mas sem deixar de lado as particularidades regionais que podem impactar significativamente os resultados.

Em resumo, a análise comparativa entre os dois modelos reafirma a viabilidade da instalação de biodigestores em propriedades leiteiras de médio porte, independentemente do modelo adotado. Ambos os cenários apontam para um grande potencial de geração de energia e benefícios ambientais, mas o modelo de Kunz & Oliveira, por estar mais alinhado à realidade brasileira, sugere um retorno econômico ainda mais atrativo. Assim, a adoção de práticas eficientes de manejo e a escolha de um modelo de biodigestor adequado à realidade local são fatores-chave para maximizar o aproveitamento dos dejetos e garantir a sustentabilidade econômica e ambiental da propriedade.

### **Impactos do manejo de dejetos**

O manejo de dejetos em propriedades leiteiras, apesar de representar desafios consideráveis, também se mostra como uma excelente oportunidade para transformar resíduos em recursos valiosos, como energia e fertilizantes. A coleta sistemática e eficiente dos dejetos, como descrito na metodologia, é um fator crucial para maximizar o rendimento de biogás, e o sucesso dessa prática depende diretamente da implementação de um sistema adequado de gestão de resíduos. A pesquisa evidencia que o modelo de confinamento compost barn (CB), além de otimizar o conforto e a saúde animal, também facilita a coleta de dejetos, o que é essencial para o processo de biodigestão. O confinamento em CB, que concentra os animais em áreas delimitadas, permite uma coleta mais organizada e contínua dos resíduos, potencializando o aproveitamento dessa biomassa.

Entretanto, é importante destacar que nem todas as propriedades leiteiras adotam sistemas de manejo intensivo como o compost barn. Muitas propriedades menores ou com práticas mais tradicionais ainda utilizam sistemas de manejo mais dispersos, em que os dejetos são espalhados por áreas maiores, tornando a coleta mais difícil e menos eficiente. Nessas propriedades, a implementação de biodigestores pode enfrentar desafios operacionais e econômicos. A dispersão dos resíduos aumenta o tempo e o custo da coleta, além de diminuir a quantidade de dejetos disponíveis para o processo de biodigestão em um dado momento. Portanto, a transição para

sistemas de manejo mais eficientes, como o compost barn, pode ser um passo necessário para aumentar a viabilidade de projetos de biodigestão nessas propriedades.

Os resultados das análises laboratoriais, especialmente no que diz respeito aos sólidos voláteis encontrados nas amostras dos campos 2 e 3, reforçam ainda mais a importância de um manejo adequado. A presença de mais de 79% de sólidos voláteis nos sólidos totais demonstra uma alta concentração de matéria orgânica nos dejetos, o que é essencial para a produção eficiente de biogás. Os sólidos voláteis representam a fração de matéria orgânica que pode ser degradada pelas bactérias anaeróbias durante o processo de biodigestão, transformando-se em metano e dióxido de carbono. Esse alto teor de material orgânico pronto para ser convertido em metano indica um excelente potencial para a geração de biogás, o que, por sua vez, se traduz em uma significativa capacidade de produção de energia elétrica.

Esse ponto é central, pois reforça a correlação entre o manejo adequado dos dejetos e a eficiência na geração de energia. Quanto mais eficiente for a coleta e o tratamento dos dejetos, maior será o volume de sólidos voláteis disponíveis para biodigestão, o que maximiza a geração de biogás. Propriedades que adotam práticas sistemáticas de manejo dos resíduos, como a raspagem regular da rampa de alimentação e a coleta cuidadosa dos dejetos na sala de ordenha, conseguem obter uma maior proporção de sólidos voláteis em suas amostras, o que resulta diretamente em um aumento no volume de biogás produzido.

Além disso, a alta proporção de sólidos voláteis encontrada nas amostras sugere que os dejetos bovinos são uma biomassa extremamente rica em material orgânico. Isso sublinha o potencial desses resíduos para a produção de biogás, especialmente quando comparados a outros tipos de biomassa, que podem ter teores de matéria orgânica mais baixos. Em termos práticos, isso significa que, com um manejo adequado e uma coleta eficiente, os dejetos bovinos podem não apenas suprir a necessidade energética da propriedade, mas também gerar excedentes de energia, que podem ser revertidos em economias para o produtor ou vendidos à rede elétrica, dependendo das políticas de geração distribuída.

Adicionalmente, o uso de biodigestores em propriedades leiteiras pode gerar benefícios econômicos e ambientais significativos. Além de reduzir os custos com energia, o biogás produzido pode ser utilizado para aquecer instalações ou alimentar sistemas de geração de eletricidade. O resíduo sólido restante, conhecido como digestato, é um excelente fertilizante orgânico, rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, e pode ser aplicado nas lavouras da própria propriedade, fechando o ciclo de sustentabilidade. Esse

aspecto circular da biodigestão é uma das grandes vantagens do processo, transformando um problema ambiental – o acúmulo de dejetos – em uma solução econômica e sustentável.

Portanto, a pesquisa demonstra de forma clara que o sucesso na implementação de biodigestores em propriedades leiteiras depende não apenas da tecnologia utilizada, mas também de práticas eficazes de manejo de resíduos. Propriedades que adotam sistemas como o compost barn, com coleta sistemática de dejetos, estão mais bem posicionadas para aproveitar ao máximo o potencial de geração de biogás. A alta proporção de sólidos voláteis nos dejetos bovinos reforça ainda mais esse potencial, indicando que há uma grande quantidade de material orgânico disponível para a produção de energia. Com isso, fica evidente que a adoção de biodigestores pode trazer uma série de benefícios, tanto para o produtor quanto para o meio ambiente, desde que seja acompanhada por um manejo eficiente dos resíduos gerados na propriedade.

### **Comparação com estudos da literatura**

Ao comparar os dados desta pesquisa com a literatura existente, algumas divergências e similaridades surgem. Marsh & Campling (1970) e Hirano & Silva (2018), por exemplo, relatam variações significativas na produção de dejetos por bovino, variando de 19 a 40 kg/dia, dependendo do manejo e do tipo de alimentação. Na presente pesquisa, a média foi de 28,51 kg/animal/dia, o que está em consonância com muitos estudos internacionais, mas ainda assim mais próximo da realidade brasileira, especialmente em sistemas mais intensivos de produção leiteira.

A tabela 18, que compara a produção de dejetos por bovino em diferentes cenários, mostra que há uma grande variação entre os estudos. Essa variação pode ser explicada por diferenças nas práticas de manejo, nos tipos de alimentação, no clima e até mesmo na raça dos animais. Estudos como o de Santos & Moraes (2009) e Adam *et al.* (2014) relatam produções de dejetos mais baixas, o que pode ser atribuído a sistemas de manejo menos intensivos ou ao uso de diferentes raças de gado.

Por outro lado, a pesquisa de Coldebella (2006), que apresentou uma produção de 46 kg/cabeça/dia, destaca como sistemas altamente produtivos, que utilizam confinamento total, podem aumentar substancialmente a geração de dejetos. Isso reforça a importância de ajustar as estimativas de produção de metano com base no tipo de manejo utilizado, especialmente ao considerar a implementação de biodigestores em larga escala.

### Potencial econômico e ambiental

A análise de viabilidade financeira realizada nesta pesquisa demonstra que a instalação de biodigestores é economicamente viável, especialmente quando se considera a redução de custos com energia elétrica. O cenário de Kunz & Oliveira estima uma geração de 15.212,78 kWh/ano, representando uma economia significativa nos custos de eletricidade. Essa economia é especialmente importante em um contexto de crescente demanda por energia e aumento das tarifas de eletricidade, como mostrado na tabela 20, onde a variação do consumo e as bandeiras tarifárias influenciam diretamente o retorno econômico.

Além disso, a implantação de biodigestores também apresenta benefícios ambientais claros. A conversão de dejetos bovinos em biogás reduz as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o metano, que é 25 vezes mais potente que o CO<sub>2</sub> em termos de capacidade de retenção de calor. Nesse sentido, a adoção dessa tecnologia pode ser vista como uma estratégia importante na mitigação das mudanças climáticas.

Outra vantagem ambiental significativa é a possibilidade de utilizar o digestato, subproduto da biodigestão, como fertilizante orgânico. Estudos de Abbasi *et al.* (2011) e Costa *et al.* (2005) mostram que o digestato pode melhorar a fertilidade do solo, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e contribuindo para a sustentabilidade das práticas agrícolas. A aplicação direta do digestato em pastagens ou lavouras, como observado em várias propriedades, não só fecha o ciclo de nutrientes, mas também reduz a contaminação do solo e das águas subterrâneas, um problema comum quando os dejetos são mal manejados.

### Barreiras e desafios para a implementação

Apesar dos benefícios econômicos e ambientais demonstrados, ainda existem barreiras significativas para a implementação de biodigestores em propriedades rurais de médio porte. O custo inicial elevado, como demonstrado na tabela 21, continua sendo uma das principais barreiras, especialmente para pequenos e médios produtores. Embora o retorno sobre o investimento seja atraente a longo prazo, muitos produtores podem enfrentar dificuldades em acessar o capital necessário para a instalação do equipamento.

Além disso, a ausência de políticas públicas robustas para incentivar o uso de biodigestores no Brasil limita a adoção em larga escala dessa tecnologia. A comparação com políticas implementadas em países como Alemanha e Itália, que oferecem subsídios diretos e incentivos para a geração de energia a partir de fontes renováveis, mostra que o Brasil ainda tem um longo caminho a percorrer em termos de suporte governamental para energias renováveis em propriedades rurais.

Outro desafio significativo é a falta de conhecimento técnico entre os produtores rurais. A operação de biodigestores exige um certo nível de habilidade técnica para garantir que o sistema funcione de forma eficiente e segura. Sem o treinamento adequado, é possível que o equipamento não atinja seu potencial máximo de geração de biogás, o que poderia reduzir o retorno econômico do investimento.

### **Conclusão**

A implementação de biodigestores em propriedades leiteiras de médio porte no Brasil tem o potencial de transformar a forma como os dejetos bovinos são manejados, promovendo uma economia circular e sustentável. Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que a produção de energia a partir de biogás pode atender a mais de 50% da demanda energética de uma propriedade, reduzindo os custos operacionais e mitigando os impactos ambientais da produção de leite.

A análise comparativa entre os modelos de Kunz e Oliveira (2006) e IPCC (2006) revelou que, apesar das diferenças nos resultados, ambos os modelos são viáveis para estimar a produção de metano em propriedades rurais. O modelo de Kunz & Oliveira mostrou-se mais alinhado com as condições brasileiras, especialmente devido ao seu foco em sistemas intensivos de confinamento. No entanto, ambos os cenários indicam que há um grande potencial para a geração de energia a partir de dejetos bovinos, o que pode se traduzir em benefícios econômicos e ambientais para os produtores.

Os benefícios ambientais da biodigestão são claros: a redução das emissões de metano e a produção de fertilizantes orgânicos são dois dos principais resultados positivos da adoção dessa tecnologia. No entanto, para que o biogás se torne uma solução amplamente adotada, é necessário superar as barreiras econômicas e técnicas que ainda limitam sua disseminação.

A criação de políticas públicas específicas para incentivar a instalação de biodigestores é fundamental. Países como Alemanha e Itália têm demonstrado que subsídios governamentais, linhas de crédito e incentivos fiscais podem transformar o mercado de biogás. No Brasil, a criação de uma política nacional voltada para a geração de energia renovável em propriedades rurais poderia acelerar significativamente a adoção de biodigestores, promovendo uma agricultura mais sustentável e eficiente.

Além disso, a capacitação dos produtores e a oferta de assistência técnica especializada são essenciais para garantir o sucesso da implementação dessa tecnologia. Muitos produtores ainda desconhecem os benefícios da biodigestão e podem enfrentar dificuldades na operação do equipamento. Programas de capacitação, oferecidos por instituições públicas e privadas, podem ajudar a superar essa barreira.

A longo prazo, a implementação de biodigestores tem o potencial de contribuir para a transição energética no Brasil, promovendo o uso de fontes renováveis de energia e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Além disso, o uso de digestato como fertilizante pode reduzir a dependência de fertilizantes químicos, promovendo uma agricultura mais sustentável e alinhada com as demandas globais por práticas agrícolas mais responsáveis.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

### Referências

ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, Shahid A. **Biogas energy**. Springer Science & Business Media, 2011.

ADAM, F. G. *et al.* **Viabilidade econômica para implantação de biodigestores em pequenas propriedades rurais da bacia leiteira no município de Taquara – RS**. Porto Alegre, 2014. 4<sup>a</sup> RenoMat - Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis.

ARRIAGA, H., Viguria, M., López, D. M., & Merino, P. (2017). Ammonia and greenhouse gases losses from mechanically turned cattle manure windrows: A regional composting network. **Journal of Environmental Management**, 203, 557–563.

BARROS, M. R., Filho, T. G. L., & da Silva, T. R.. **The electric energy potential of landfill biogas in Brazil**. Energy Policy, 65, 150–164. 2014. doi:10.1016/j.enpol.2013.10.028

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 51, de 18 de Setembro de 2002. Aprova os Regulamentos Técnicos de Produção, Identidade, Qualidade, Coleta e Transporte de Leite. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 20 set. 2002. Seção 1, p.13-22.

CAÑOTE, S. J. B. **Caracterização da Biodigestão de Lodos UASB e de Lodos Ativado e ACV do Aproveitamento Energético do Biogás Resultante**. 2018. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada-Esalq/USP.

CIBIOGÁS. **Centro Internacional do Biogás**. Panorama do biogás no Brasil, 2020. Disponível em: <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2021/04/PANORAMA-DO-BIOGA%CC%81S-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2024.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do Biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. Cascavel, 2006. 74f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

COSTA, DPB; RODRIGUES, V. C.; SILVA, J. C. G. Comparação entre a composição mineral de esterco e vermicompostos originários de bubalinos e bovinos. **Livestock Research for Rural Development**, v. 17, n. 11, 2005.

EMBRAPA. **Anuário leite 2018**. Disponível em: [embrapa.br/gado-de-leite](http://embrapa.br/gado-de-leite). Acesso em: 04 ago. 2024.

EMBRAPA. **Circular técnica**: O mercado consumidor de leites e derivados. 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199791/1/CT-120-MercadoConsumidorKenya.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2024.

ENSMINGER M. E., OLDFIELD, J.E. , W.W. HEINEMANN. **Feeds & Nutrition**. 2 ed. Clovis, California, The Ensminger Publishing Company, 1990. 1544 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Dairy Production and Products** – Milk Production, 2016. Disponível em <<http://www.fao.org/3/i1522e/i1522e02.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2024.

FRASER, A. F. **Comportamiento de los animales de granja**. Zaragoza (Espanña), Editorial Acribia, p. 291, 1980.

GOMES, A. C. A. et al. Incentivos para a viabilização do biogás a partir dos resíduos da pecuária leiteira no Estado de Minas Gerais. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 30, 2014.

GRIMELLO, R. D. D. N.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. Aproveitamento do biogás proveniente de dejetos da bovinocultura para geração de energia – um estudo de caso. São Paulo, 2013. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 13, n. 1, p. 61-74.

HAMID, R. G.; Blanchard, R. E. **As Assesment of Biogas as a Domestic Energy Source in Rural Kenya**: Developing a Sustainable Business Model. *Renewable Energy*, 2018.

MORI, H. F.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, W. L. Perda de água, solo e fósforo com aplicação de jato líquido bovino em latossolo sob planejamento direto e com chuva simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2009 . Disponível. Acesso em : 07 abr . 2025 ., v. 1, pág. 189-198, 2009.

HIRANO, M. Y.; SILVA, C. L. D. Dairy cattle biogas usage in microturbines for energy generation and thermal exploitation. Bauru, 2018. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.38, n.4, p.526-535, jul./ago. 2018.

HIRATA, M. et al. Return of dung to be hiagrass (*Paspalum notatum* Fliigge) pasture by dairy cattle. **Journal Japanese Grassland Society Science, Nishinasuno**, v. 35, n. 4, p.350-357, 1990.

IPCC. INTERGOVERMMETAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. emissions from livestock and manure management. IPCC Guidelines for **National Greenhouse Gas Inventories**, v. 4, c. 10. 2006.

JUNQUEIRA, J. B. **Biodigestão anaeróbia e compostagem com dejetos de bovinos confinados e aplicação do biofertilizante e do composto em área cultivada com Panicum**

**maximum Jacq.**, cv Tanzânia. 2011. xi, 92 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011.

KONZEN, E. A.; ALVARENGA, R. C. **Manejo e utilização de dejetos animais**: aspectos agronômicos e ambientais. Documentos/Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas-MG), 2005. Disponível em: Acesso em: 04 ago. 2024.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, ano 15, n. 3, p. 28-35, 2006.

MACHADO, C. R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar**. Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Botucatu/SP:2011.

MARSH, R.; CAMPLING, R. C. Fouling of pasture by dung. *Herbage Abstracts*. **Bucks**, v. 40, n. 2, p.123-30, 1970.

MITO, J, Y, L.; KERKHOFF, S. S.; GONÇALVES, J. L.; VENDRAME, M., Go. STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2018.

MONTORO, S. B.; et al. **Sustentabilidade energética e ambiental**: viabilidade econômica da implantação de biodigestores anaeróbios para tratamento de dejetos bovinos. Jaboticabal, 2014. XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014

MONTORO, S. B.; JUNIOR, J. D. L.; SANTOS, D. F. L. Economic and financial viability of digester use in cattle confinement for beef. Jaboticabal, 2017. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.37, n.2, p.353-365, mar./abr. 2017

SABESP; **Norma Técnica Interna NTS 013**, Sólidos, Método de ensaio. São Paulo, Junho, 1999.

SANTOS, I. A.; MORAIS, M. A. **Aproveitamento de Biogás para Geração de Energia Elétrica a partir de Dejetos de Bovinos Leiteiros**: Um Estudo de Caso na EAFMUZ. In: I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais Geração de Energia a partir de Resíduos Animais. Florianópolis, 2009

SANTOS, P. **Guia técnico de biogás**. Centro para a Conservação de Energias. Portugal: 2000.

SCHMOELLER, L. **Análise de rendimento para grupos motogeradores movidos a biogás de fabricação nacional**. 2019.

SHUBEITA, F. de M. *et al.* **Análise e modelagem de sistema de digestão anaeróbica monitorado para previsão e busca de eficiência de operação**. 2016.