



ANAIS

SEGURANÇA OPERACIONAL E VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE BIODIGESTORES ARTESANAIS EM PEQUENAS AGROINDÚSTRIAS FAMILIARES: RELATO TÉCNICO APLICADO À PRODUÇÃO DE DOCE DE LEITE

ALYSSON LEONEL DA SILVA

alysson.leonel@unesp.br

UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

RICARDO SANTOS FERREIRA

ricardo.s.ferreira@unesp.br

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

RESUMO: A crescente busca por alternativas energéticas sustentáveis tem ampliado o interesse pelo aproveitamento dos resíduos gerados na atividade agropecuária, especialmente em pequenas agroindústrias familiares. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um protocolo técnico para implantação segura e avaliação da viabilidade econômico-financeira de biodigestores artesanais aplicados à produção artesanal de doce de leite. O estudo caracteriza-se como um relato tecnológico, estruturado a partir da elaboração de um protocolo contemplando etapas de planejamento da implantação, dimensionamento preliminar, critérios de segurança operacional, rotinas de operação e manutenção e análise de viabilidade econômica. Para demonstrar sua aplicabilidade, o protocolo foi aplicado a um Cenário Simulado de Referência representativo de uma pequena agroindústria familiar integrada a um sistema leiteiro com quinze vacas em lactação. Os resultados da simulação indicaram disponibilidade estimada de 600 kg de dejetos por dia, potencial de produção de aproximadamente 18 m³ de biogás por dia e capacidade energética suficiente para atender integralmente a demanda de GLP considerada no cenário analisado. Na avaliação econômico-financeira, observou-se potencial de recuperação do investimento inicial estimado em período inferior a um ano, considerando exclusivamente a economia decorrente da substituição do combustível convencional. Conclui-se que o protocolo desenvolvido pode atuar como ferramenta de apoio à tomada de decisão para avaliação preliminar da implantação de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares, integrando critérios técnicos, operacionais e econômicos em uma estrutura sistematizada. Ressalta-se que os resultados apresentados decorrem de um cenário simulado, sendo recomendada a realização de estudos futuros para validação do protocolo em condições reais de operação.

PALAVRAS CHAVE: biodigestor artesanal; agroindústria familiar; biogás; viabilidade econômica; doce de leite.

ABSTRACT: The growing search for sustainable energy alternatives has increased interest in the use of waste generated by agricultural activities, particularly in small family-based agro-industries. In this context, the present study aimed to develop a technical protocol for the safe implementation and economic-financial feasibility assessment of artisanal biodigesters applied to traditional dulce de leche production. The study is characterized as a technological report and was structured through the development of a protocol comprising implementation planning, preliminary sizing, operational safety criteria, operation and maintenance routines, and economic feasibility analysis. To demonstrate its applicability, the protocol was applied to a Reference Simulated Scenario representing a small family agro-industry integrated with a dairy production system consisting of fifteen lactating cows. The simulation results indicated an estimated availability of 600 kg of manure per day, a biogas production potential of approximately 18 m³ per day, and sufficient energy capacity to fully meet the LPG demand considered in the analyzed scenario. The economic-financial assessment indicated the potential recovery of the initial investment within less than one year, considering exclusively the savings resulting from the replacement of conventional fuel. It is concluded that the proposed protocol may serve as a decision-support tool for the preliminary evaluation of artisanal biodigester implementation in small family agro-industries, integrating technical, operational, and economic criteria into a systematic framework. The results are based on a simulated scenario, and future studies are recommended to validate the protocol under real operating conditions.

KEY WORDS: artisanal biodigester; family agro-industry; biogas; economic feasibility; dulce de leche.

SEGURANÇA OPERACIONAL E VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE BIODIGESTORES ARTESANAIS EM PEQUENAS AGROINDÚSTRIAS FAMILIARES: RELATO TÉCNICO APLICADO À PRODUÇÃO DE DOCE DE LEITE

2026

1 INTRODUÇÃO

A elevação dos custos energéticos tem ampliado os desafios econômicos enfrentados pelas pequenas agroindústrias familiares brasileiras, especialmente aquelas voltadas ao processamento artesanal de produtos lácteos. Na produção de doce de leite, o gás liquefeito de petróleo (GLP) permanece como a principal fonte de energia térmica utilizada no processo produtivo, representando parcela significativa dos custos operacionais (MATHIAS; SILVA, 2023; MENEZES *et al.*, 2023). Nesse cenário, torna-se necessário buscar alternativas capazes de reduzir despesas, aumentar a eficiência econômica e fortalecer a sustentabilidade dos empreendimentos rurais (Kadam *et al.*, 2024).

A bovinocultura leiteira oferece uma oportunidade para o aproveitamento energético dos resíduos gerados na própria atividade. Por meio da biodigestão anaeróbia, os dejetos bovinos podem ser convertidos em biogás para utilização energética e em biofertilizante para aplicação agrícola, promovendo o aproveitamento dos resíduos e contribuindo para a redução da dependência de fontes energéticas convencionais (Aguirre-Villegas; Larson; Sharara, 2019).

Apesar desse potencial, a adoção de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares ainda é limitada. Entre os principais obstáculos destacam-se a ausência de orientações padronizadas para implantação dos sistemas, as incertezas relacionadas à segurança operacional e a dificuldade de avaliação da viabilidade econômico-financeira do investimento. Dessa forma, a decisão de adoção da tecnologia depende não apenas da disponibilidade dos resíduos ou da capacidade de geração de biogás, mas também da existência de instrumentos que auxiliem produtores e gestores na análise dos riscos e benefícios envolvidos. (Chiariello; Mauad; Dublin, 2023; MATHIAS; SILVA, 2023)

Aspectos relacionados ao dimensionamento do sistema, seleção do local de instalação, controle de pressão, estanqueidade, ventilação, prevenção do retrocesso de chama e procedimentos de operação e manutenção constituem requisitos essenciais para o funcionamento seguro dos biodigestores. Entretanto, tais informações geralmente encontram-se dispersas na literatura técnica e raramente são apresentadas de forma integrada à avaliação econômica do investimento (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024; Beswick *et al.*, 2025).

Observa-se, portanto, uma lacuna quanto ao desenvolvimento de ferramentas que

articulem critérios técnicos, requisitos mínimos de segurança operacional e indicadores econômicos em um único instrumento de apoio à tomada de decisão. Diante desse contexto, este relato tecnológico apresenta um protocolo técnico para implantação segura de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares produtoras de doce de leite, integrando procedimentos de implantação, critérios de segurança operacional e avaliação da viabilidade econômico-financeira. Assim, busca responder à seguinte questão de pesquisa: como estruturar um protocolo técnico que integre critérios de implantação segura e avaliação da viabilidade econômico-financeira para apoiar a tomada de decisão sobre a adoção de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares produtoras de doce de leite?

1.1 Objetivo

Desenvolver um protocolo técnico para implantação segura de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares produtoras de doce de leite, integrando critérios de segurança operacional e avaliação da viabilidade econômico-financeira, com o propósito de apoiar a tomada de decisão sobre a adoção dessa tecnologia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO PRODUTO TECNOLÓGICO

2.1 Gestão energética e sustentabilidade em pequenas agroindústrias familiares

As pequenas agroindústrias familiares apresentam elevada sensibilidade aos custos energéticos, especialmente em atividades que demandam energia térmica contínua, como a produção artesanal de doce de leite. Nesse contexto, a adoção de fontes renováveis de energia pode contribuir para a redução dos custos operacionais, aumento da eficiência produtiva e fortalecimento da sustentabilidade econômica e ambiental dos empreendimentos rurais(Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024; Beswick *et al.*, 2025).

2.2 Biodigestores artesanais como alternativa tecnológica para valorização dos resíduos pecuários

Os biodigestores artesanais constituem uma alternativa acessível para o aproveitamento energético dos resíduos gerados pela atividade pecuária. Por meio da biodigestão anaeróbia, os dejetos bovinos podem ser convertidos em biogás para uso energético e em biofertilizante para aplicação agrícola. Além do aproveitamento dos resíduos, a tecnologia apresenta potencial para reduzir a dependência de combustíveis convencionais e agregar valor às atividades desenvolvidas na propriedade rural (Ahlberg-Eliasson *et al.*, 2021; Baek *et al.*, 2020).

2.3 Segurança operacional como fator determinante para adoção da tecnologia

A segurança operacional representa um fator essencial para a implantação de biodigestores artesanais. Aspectos relacionados à localização do sistema, estanqueidade, controle de pressão, ventilação, dispositivos de segurança e manutenção preventiva são fundamentais para minimizar riscos e garantir a operação adequada da tecnologia. A sistematização desses requisitos em protocolos estruturados contribui para ampliar a confiabilidade do sistema e favorecer sua adoção por pequenos produtores (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024; Beswick *et al.*, 2025).

2.4 Viabilidade econômico-financeira como instrumento de apoio à tomada de decisão

A adoção de tecnologias no meio rural depende da percepção de seus benefícios econômicos e da capacidade de gerar retorno compatível com o investimento realizado. Nesse sentido, a avaliação econômico-financeira constitui importante instrumento de apoio à tomada de decisão, permitindo analisar custos, benefícios e o potencial de retorno do investimento. Para biodigestores artesanais, indicadores como economia gerada pela substituição do GLP e período de retorno do investimento auxiliam na avaliação da atratividade da tecnologia e na redução das incertezas associadas à sua implantação (MATHIAS; SILVA, 2023; MENEZES *et al.*, 2023; Kadam *et al.*, 2024).

Dessa forma, a integração entre critérios técnicos, requisitos de segurança operacional e avaliação econômico-financeira fornece a base conceitual para o desenvolvimento do protocolo tecnológico proposto neste estudo.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho caracteriza-se como um relato tecnológico de natureza aplicada, cujo produto consiste em um protocolo para implantação segura de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares produtoras de doce de leite. O protocolo integra recomendações técnicas de instalação, critérios de segurança operacional e procedimentos para avaliação da viabilidade econômico-financeira da tecnologia, com o objetivo de apoiar a tomada de decisão quanto à sua adoção.

O desenvolvimento do protocolo ocorreu em quatro etapas complementares. A primeira consistiu no levantamento e análise da literatura científica e técnica relacionada à produção de biogás, biodigestores artesanais, segurança operacional, aproveitamento energético de resíduos pecuários e avaliação econômico-financeira de tecnologias aplicadas ao meio rural, visando identificar critérios relevantes para a implantação segura desses sistemas.

Na segunda etapa, as informações obtidas foram sistematizadas para elaboração do protocolo técnico, contemplando planejamento da implantação, dimensionamento preliminar, requisitos mínimos de segurança operacional, procedimentos de operação e manutenção, bem como orientações para utilização do biogás na produção artesanal de doce de leite.

A terceira etapa compreendeu a definição dos procedimentos de avaliação econômico-financeira, considerando investimento inicial, potencial de geração de biogás, substituição do consumo de GLP e estimativa dos benefícios econômicos associados à redução dos custos energéticos.

Por fim, os procedimentos técnicos e econômicos foram integrados em um protocolo estruturado de apoio à tomada de decisão, posteriormente aplicado a um Cenário Simulado de Referência (CSR) representativo de uma pequena agroindústria familiar produtora de doce de leite.

4 PROTOCOLO TECNOLÓGICO PARA IMPLANTAÇÃO SEGURA DE BIODIGESTORES ARTESANAIS

4.1 Planejamento da implantação

O planejamento da implantação constitui a etapa inicial do protocolo tecnológico e tem como finalidade verificar as condições técnicas e operacionais necessárias para adoção do biodigestor antes da realização de investimentos. Nessa fase são avaliadas a disponibilidade de biomassa, a demanda energética da agroindústria e as condições mínimas para instalação segura do sistema.

Para aplicação do protocolo, foi considerado um Cenário Simulado de Referência (CSR) representativo de uma pequena propriedade rural familiar dedicada à bovinocultura leiteira e à produção artesanal de doce de leite. A unidade produtiva possui 15 vacas em lactação, com coleta diária dos dejetos e destinação integral do leite para processamento na própria agroindústria.

Antes da definição das características construtivas do biodigestor, recomenda-se a realização de um diagnóstico simplificado da propriedade, contemplando aspectos como disponibilidade de resíduos, consumo atual de GLP, área para instalação do sistema, facilidade de abastecimento com biomassa e condições para operação e manutenção (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024; Kadam *et al.*, 2024). Essas informações permitem verificar a compatibilidade entre o potencial de geração de biogás e a demanda energética da atividade produtiva.

No cenário adotado, considera-se que a propriedade dispõe de área adequada para instalação do biodigestor em local aberto e ventilado, além de mão de obra familiar para condução das atividades operacionais. As premissas utilizadas para desenvolvimento do

protocolo são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Premissas da propriedade rural simulada utilizada para desenvolvimento do protocolo tecnológico

Variável	Valor adotado na simulação
Vacas em lactação	15
Sistema de produção	Agricultura familiar
Destinação do leite	100% para produção de doce de leite
Coleta de dejetos	Diária
Destinação atual dos dejetos	Aproveitamento para biodigestor
Fonte térmica atual	GLP
Objetivo da implantação	Substituição parcial ou total do GLP
Produto tecnológico	Protocolo de implantação segura

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir dessas premissas, o protocolo prossegue para o dimensionamento preliminar do sistema e para a avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos gerados na propriedade.

4.2 Dimensionamento preliminar

Concluído o planejamento da implantação, a etapa seguinte do protocolo consiste no dimensionamento preliminar do biodigestor artesanal. Seu objetivo é estimar a capacidade necessária do sistema a partir da disponibilidade de biomassa e da demanda energética da agroindústria.

No Cenário Simulado de Referência (CSR), o dimensionamento considera os dejetos produzidos pelas 15 vacas em lactação como matéria-prima para geração de biogás. A quantidade de biomassa disponível constitui o principal parâmetro para definição da capacidade do biodigestor e do potencial de produção energética do sistema (Aguirre-Villegas; Larson; Sharara, 2019).

Além da disponibilidade de resíduos, o protocolo considera a demanda térmica da agroindústria, atualmente atendida pelo GLP. Dessa forma, o dimensionamento busca compatibilizar o potencial de geração de biogás com a necessidade energética associada à produção artesanal de doce de leite.

Para propriedades familiares, recomenda-se a adoção de modelos de biodigestores artesanais de baixo custo, priorizando simplicidade construtiva, facilidade de manutenção e operação contínua (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024; Kadam *et al.*, 2024). Também

devem ser considerados aspectos como regularidade da alimentação do sistema, disponibilidade hídrica e espaço físico para instalação segura dos componentes.

Como resultado desta etapa, são definidos os parâmetros necessários para estimativa do volume do biodigestor, da capacidade de produção de biogás e da infraestrutura mínima requerida para implantação do sistema, servindo de base para as etapas subsequentes do protocolo.

4.3 Implantação segura

A implantação segura constitui a etapa central do protocolo tecnológico, pois reúne os critérios técnicos destinados a minimizar os riscos associados à utilização do biogás em pequenas agroindústrias familiares. Embora os biodigestores artesanais apresentem reconhecido potencial para geração de energia renovável e redução dos custos operacionais, sua eficiência e confiabilidade dependem diretamente da correta implantação do sistema e da adoção de medidas preventivas capazes de garantir condições adequadas de operação (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024; Beswick *et al.*, 2025).

No protocolo proposto, a implantação segura inicia-se pela seleção do local de instalação. Recomenda-se que o biodigestor seja implantado em terreno estável, com boa drenagem, ventilação natural e facilidade de acesso para alimentação diária e manutenção periódica (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024). O sistema deve permanecer afastado das áreas destinadas ao processamento de alimentos, fontes de ignição e locais de grande circulação de pessoas, reduzindo a exposição a riscos operacionais e facilitando eventuais intervenções de manutenção.

Outro aspecto essencial refere-se à utilização de materiais compatíveis com as condições de operação do biodigestor. A escolha de componentes resistentes à umidade, à pressão de trabalho e às características químicas do biogás contribui para aumentar a vida útil do sistema e reduzir a probabilidade de vazamentos. Da mesma forma, as conexões hidráulicas e de condução do gás devem ser cuidadosamente vedadas, garantindo a estanqueidade do conjunto e evitando perdas energéticas e riscos decorrentes da liberação não controlada do biogás (Beswick *et al.*, 2025).

O protocolo estabelece ainda que todo o sistema de condução do biogás seja dotado de dispositivos mínimos de segurança. Entre eles destacam-se mecanismos para controle da pressão interna, filtragem de impurezas e umidade, além de dispositivos destinados à prevenção do retrocesso de chama durante a utilização do biogás em fogões ou queimadores (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024; Beswick *et al.*, 2025). Esses componentes não apenas aumentam a segurança operacional, mas também contribuem para a estabilidade da combustão e para o melhor aproveitamento energético do combustível produzido.

Outro requisito considerado indispensável refere-se à organização das rotinas de

inspeção e manutenção preventiva. O protocolo recomenda que o produtor realize verificações periódicas da integridade estrutural do biodigestor, das tubulações, conexões, válvulas e dispositivos de segurança, observando possíveis vazamentos, obstruções ou desgastes que possam comprometer o funcionamento do sistema (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024). A adoção dessas práticas reduz a ocorrência de falhas operacionais, prolonga a vida útil dos equipamentos e aumenta a confiabilidade da tecnologia ao longo do tempo.

Sob a perspectiva da gestão de riscos, a implantação segura não deve ser compreendida apenas como um conjunto de procedimentos técnicos, mas como uma etapa decisiva para o sucesso da adoção da tecnologia. A incorporação de requisitos mínimos de segurança desde a fase de implantação reduz incertezas, minimiza custos decorrentes de falhas operacionais e favorece a utilização contínua do biogás na produção artesanal de doce de leite (Beswick *et al.*, 2025).

Como resultado desta etapa, o protocolo consolida um conjunto padronizado de critérios para implantação segura de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares. Esses critérios servirão de base para a elaboração do checklist operacional do protocolo e para a análise da viabilidade econômico-financeira apresentada nas etapas subsequentes, uma vez que a adoção de medidas preventivas influencia diretamente a confiabilidade, os custos de manutenção e a sustentabilidade operacional do sistema.

Tabela 2 – Critérios mínimos para implantação segura do biodigestor artesanal

Critério	Objetivo	Verificação
Local ventilado	Evitar acúmulo de biogás	Conforme
Distância da agroindústria	Reduzir riscos de operação	Conforme
Sistema estanque	Evitar vazamentos	Conforme
Controle de pressão	Garantir operação segura	Conforme
Filtro de umidade	Melhorar a qualidade do biogás	Conforme
Dispositivo contra retrocesso de chama	Prevenir acidentes	Conforme
Plano de inspeção periódica	Reduzir falhas operacionais	Conforme

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4 Operação e manutenção

Após a implantação do biodigestor artesanal, a obtenção dos benefícios energéticos e econômicos depende da adoção de rotinas padronizadas de operação e manutenção. O objetivo desta etapa do protocolo é garantir a continuidade da produção de biogás e preservar as condições adequadas de funcionamento do sistema (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024).

A operação deve ocorrer de forma contínua, respeitando a capacidade de alimentação definida no dimensionamento preliminar. No Cenário Simulado de Referência (CSR), os dejetos produzidos diariamente pelas 15 vacas em lactação constituem a principal fonte de biomassaC utilizada pelo biodigestor. A regularidade da alimentação contribui para a estabilidade da produção de biogás e para o atendimento da demanda energética da agroindústria produtora de doce de leite (Ahlberg-Eliasson *et al.*, 2021).

Além da alimentação diária, recomenda-se a realização de inspeções periódicas nas tubulações, conexões, dispositivos de segurança, filtros e reservatório de biogás. Essas verificações permitem identificar vazamentos, obstruções ou desgastes que possam comprometer o desempenho do sistema (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024; Beswick *et al.*, 2025).

A manutenção preventiva inclui atividades como limpeza dos componentes de filtragem, verificação dos dispositivos de segurança e inspeção geral das estruturas do biodigestor. A execução dessas atividades em intervalos regulares contribui para aumentar a confiabilidade operacional e reduzir a necessidade de intervenções corretivas (Issahaku; Derkyi; Kemausuor, 2024).

O plano simplificado de operação e manutenção preventiva recomendado pelo protocolo é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Plano simplificado de operação e manutenção preventiva do biodigestor artesanal

Atividade	Frequência	Responsável
Alimentação do biodigestor	Diária	Operador
Inspeção visual de tubulações	Semanal	Operador
Verificação de vazamentos	Semanal	Operador
Limpeza do filtro de umidade	Mensal	Operador
Verificação dos dispositivos de segurança	Mensal	Operador
Inspeção geral do sistema	Trimestral	Responsável técnico

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A adoção dessas práticas contribui para a continuidade operacional do biodigestor e para a preservação dos benefícios econômicos e energéticos associados à tecnologia.

4.5 Avaliação econômico-financeira

A avaliação econômico-financeira integra o protocolo tecnológico com a finalidade de verificar a viabilidade da implantação do biodigestor artesanal em pequenas agroindústrias familiares. Essa etapa permite comparar os custos de implantação com os benefícios

econômicos esperados, subsidiando a decisão de investimento (MATHIAS; SILVA, 2023; MENEZES *et al.*, 2023).

O processo inicia-se pela estimativa do investimento necessário para implantação do sistema, incluindo materiais construtivos, dispositivos de segurança, sistema de condução do biogás e demais componentes necessários ao funcionamento do biodigestor.

Em seguida, são estimados os benefícios econômicos associados à utilização do biogás, especialmente a redução do consumo de GLP empregado na produção de doce de leite. A economia gerada pela substituição desse combustível constitui o principal parâmetro para análise do retorno financeiro do investimento (MATHIAS; SILVA, 2023; Kadam *et al.*, 2024).

Para avaliação da atratividade econômica da tecnologia, o protocolo recomenda a utilização de indicadores como Payback Simples, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), quando aplicáveis. Esses indicadores permitem estimar o período de recuperação do investimento e o potencial de geração de benefícios econômicos ao longo do tempo (MENEZES *et al.*, 2023).

Além dos resultados financeiros, a análise pode considerar benefícios complementares relacionados ao aproveitamento dos resíduos pecuários, à produção de biofertilizante e à redução da dependência de combustíveis convencionais.

A aplicação desses critérios ao Cenário Simulado de Referência é apresentada na seção seguinte, permitindo verificar o potencial de retorno econômico do biodigestor artesanal nas condições analisadas.

5 APLICAÇÃO DO PROTOCOLO AO CENÁRIO SIMULADO DE REFERÊNCIA

Com o objetivo de demonstrar a aplicabilidade do protocolo tecnológico desenvolvido, apresenta-se sua aplicação em um Cenário Simulado de Referência (CSR) representativo de uma pequena agroindústria familiar produtora de doce de leite integrada à atividade leiteira.

O cenário foi elaborado para reproduzir condições operacionais compatíveis com propriedades rurais de pequeno porte, permitindo a avaliação dos requisitos técnicos, operacionais e econômico-financeiros relacionados à implantação de um biodigestor artesanal. A aplicação do protocolo contempla as etapas de planejamento, dimensionamento preliminar, verificação dos critérios de segurança, definição das rotinas de operação e manutenção e avaliação da viabilidade econômica do investimento.

Nas subseções seguintes são apresentados os parâmetros adotados para caracterização do cenário, a estimativa do potencial de produção de biogás e os resultados da avaliação econômico-financeira da tecnologia proposta.

5.1 Caracterização do cenário simulado de referência

O Cenário Simulado de Referência (CSR) representa uma pequena agroindústria familiar dedicada à produção artesanal de doce de leite, integrada a um sistema de produção leiteira composto por quinze vacas em lactação. O leite produzido é integralmente destinado ao processamento agroindustrial, enquanto os dejetos bovinos são considerados matéria-prima para alimentação do biodigestor artesanal.

Atualmente, a produção utiliza GLP como principal fonte de energia térmica. Nesse contexto, o biodigestor é avaliado como alternativa para aproveitamento energético dos resíduos gerados na propriedade e redução dos custos associados ao consumo de combustível.

As características adotadas para o cenário analisado são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização do Cenário Simulado de Referência utilizado na aplicação do protocolo

Variável	Valor adotado
Sistema produtivo	Agroindústria familiar
Atividade principal	Produção artesanal de doce de leite
Rebanho leiteiro	15 vacas em lactação
Destinação do leite	100% para fabricação de doce de leite
Fonte energética atual	GLP
Resíduos utilizados	Dejetos bovinos
Tecnologia avaliada	Biodigestor artesanal
Produto energético	Biogás
Coproduto	Biofertilizante
Objetivo da implantação	Redução dos custos energéticos e aproveitamento dos resíduos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir dessas características, procede-se à estimativa da disponibilidade de resíduos orgânicos e do potencial de produção de biogás, etapa necessária para a aplicação dos critérios de viabilidade previstos no protocolo.

5.2 Estimativa de geração de resíduos e potencial de produção de biogás

A primeira etapa da aplicação do protocolo consistiu na estimativa da disponibilidade de resíduos orgânicos para alimentação do biodigestor artesanal. No Cenário Simulado de Referência (CSR), foi considerado um rebanho composto por quinze vacas em lactação, com produção média de 40 kg de dejetos por animal ao dia (Ahlberg-Eliasson *et al.*, 2021; Kadam *et al.*, 2024).

Com base nesses parâmetros, estimou-se uma disponibilidade diária de aproximadamente 600 kg de resíduos orgânicos. Considerando valores médios de conversão para dejetos bovinos, foi estimada uma produção de 18 m³ de biogás por dia, equivalente a aproximadamente 6.570 m³ por ano (Ahlberg-Eliasson *et al.*, 2021).

Tabela 5 – Estimativa de geração de resíduos e potencial de produção de biogás no Cenário Simulado de Referência

Parâmetro	Valor
Número de vacas em lactação	15 animais
Produção média de dejetos por animal	40 kg dia ¹
Produção total de dejetos	600 kg dia ¹
Produção estimada de biogás	18 m ³ dia ¹
Produção estimada de biogás	6.570 m ³ ano ¹

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados indicam disponibilidade de biomassa suficiente para operação de um biodigestor artesanal de pequeno porte, possibilitando a geração de biogás para utilização energética na agroindústria analisada.

5.3 Estimativa da demanda energética da produção de doce de leite

Após a estimativa do potencial de produção de biogás, procedeu-se à avaliação da demanda energética da agroindústria familiar. A produção artesanal de doce de leite demanda energia térmica contínua para aquecimento e concentração do leite, sendo o GLP a principal fonte energética utilizada no processo.

Para aplicação do protocolo, adotou-se um consumo médio de seis botijões de GLP (13 kg) por mês, valor compatível com a escala produtiva considerada no Cenário Simulado de Referência. Com base nessa premissa, estimou-se um consumo anual equivalente a 936 kg de GLP.

Tabela 6 – Estimativa da demanda energética atual da agroindústria familiar

Parâmetro	Valor
Fonte energética utilizada	GLP
Consumo mensal estimado	6 botijões de 13 kg
Consumo mensal equivalente	78 kg
Consumo anual equivalente	936 kg
Finalidade energética	Produção artesanal de doce de leite

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados evidenciam uma demanda energética contínua associada ao processo produtivo, permitindo avaliar o potencial de substituição do GLP pelo biogás gerado no biodigestor artesanal.

5.4 Equivalência energética e potencial de substituição do GLP

Após a estimativa da produção de biogás e da demanda energética da agroindústria, procedeu-se à análise da equivalência energética entre o biogás gerado pelo biodigestor artesanal e o GLP utilizado na fabricação do doce de leite.

Considerando a produção estimada de 6.570 m³ de biogás por ano e a equivalência energética de 1 kg de GLP para 1,9 m³ de biogás (Kadam *et al.*, 2024), obteve-se um potencial energético equivalente a aproximadamente 3.458 kg de GLP por ano.

Tabela 7 – Equivalência energética entre biogás e GLP no Cenário Simulado de Referência

Parâmetro	Cabeçalho
Produção estimada de biogás	18 m ³ dia ¹
Produção anual de biogás	6.570 m ³ ano ¹
Equivalência energética adotada	1 kg GLP = 1,9 m ³ biogás
GLP equivalente disponível	3.458 kg ano ¹
Consumo anual estimado de GLP	936 kg ano ¹
Potencial de atendimento da demanda	Superior a 100%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados indicam que o potencial energético disponível é suficiente para atender integralmente a demanda atual da agroindústria, apresentando excedente em relação ao consumo anual de GLP. Esse resultado evidencia a capacidade do biodigestor artesanal de reduzir a dependência de combustíveis convencionais e ampliar a autonomia energética da propriedade.

Diante desse potencial, procedeu-se à avaliação econômico-financeira da implantação da tecnologia.

5.5 Avaliação econômico-financeira

A etapa final da aplicação do protocolo consistiu na avaliação econômico-financeira da implantação do biodigestor artesanal no Cenário Simulado de Referência. A análise foi conduzida de forma conservadora, considerando apenas a economia obtida pela substituição do consumo atual de GLP, sem atribuir valor econômico ao excedente energético potencialmente disponível.

Para a simulação, foi considerado investimento inicial estimado de R\$ 8.000,00, abrangendo materiais construtivos, dispositivos de segurança, tubulações e demais componentes necessários à implantação do sistema.

Com base no consumo anual estimado de 936 kg de GLP e no preço médio de R\$ 120,00 por botijão de 13 kg, obteve-se despesa anual aproximada de R\$ 8.640,00 com aquisição de combustível.

Tabela 8 – Estimativa simplificada de custos e benefícios econômicos da implantação

Parâmetro	Valor
Investimento inicial estimado	R\$ 8.000,00
Consumo anual de GLP	936 kg
Consumo anual equivalente	72 botijões de 13 kg
Preço médio do botijão	R\$ 120,00
Despesa anual com GLP	R\$ 8.640,00
Economia anual potencial	R\$ 8.640,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com base nesses valores, o Payback Simples estimado foi de aproximadamente 11 meses, indicando potencial de recuperação do investimento em período inferior a um ano.

Embora baseada em premissas simplificadas, a análise evidencia o potencial econômico da tecnologia para pequenas agroindústrias familiares que apresentam consumo contínuo de energia térmica. Os resultados reforçam a importância da compatibilidade entre a disponibilidade de biogás e a demanda energética da propriedade, aspecto contemplado pelo protocolo tecnológico desenvolvido.

5.6 Síntese dos resultados e apoio à tomada de decisão

A aplicação do protocolo tecnológico permitiu avaliar, de forma integrada, os aspectos técnicos, operacionais e econômicos relacionados à implantação de um biodigestor artesanal em uma pequena agroindústria familiar produtora de doce de leite.

Os resultados demonstraram disponibilidade de resíduos suficiente para geração de biogás, potencial para substituição integral do GLP utilizado no processo produtivo e viabilidade econômica associada à redução dos gastos com combustível.

Os principais resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Síntese dos resultados da aplicação do protocolo tecnológico

Indicador	Resultado
Rebanho analisado	15 vacas em lactação
Produção diária de dejetos	600 kg dia ¹
Produção estimada de biogás	18 m ³ dia ¹
Produção anual de biogás	6.570 m ³ ano ¹
Consumo anual de GLP	936 kg
Potencial de substituição do GLP	Superior a 100%
Investimento estimado	R\$ 8.000,00
Economia anual potencial	R\$ 8.640,00
Payback simples estimado	Aproximadamente 11 meses

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

De forma geral, os resultados indicam que o protocolo pode ser utilizado como ferramenta de apoio à tomada de decisão para avaliação preliminar da implantação de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares, integrando critérios de segurança operacional, dimensionamento e viabilidade econômico-financeira em uma estrutura sistematizada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um protocolo técnico para implantação segura e avaliação da viabilidade econômico-financeira de biodigestores artesanais em pequenas agroindústrias familiares produtoras de doce de leite. Por meio da aplicação do protocolo a um Cenário Simulado de Referência, foi possível integrar aspectos relacionados ao planejamento da implantação, à segurança operacional, ao aproveitamento energético dos resíduos pecuários e à avaliação econômica da tecnologia.

Os resultados indicaram que a disponibilidade de dejetos gerados por um rebanho de quinze vacas em lactação apresenta potencial para produção de biogás suficiente para atender a demanda energética da agroindústria analisada. Adicionalmente, a estimativa de economia decorrente da substituição do GLP evidenciou potencial de recuperação do investimento em prazo reduzido, demonstrando a atratividade da tecnologia nas condições consideradas.

Como principal contribuição, o protocolo desenvolvido oferece uma ferramenta simplificada de apoio à tomada de decisão para produtores rurais e gestores interessados na adoção de biodigestores artesanais. Como limitação do estudo, destaca-se a utilização de um cenário simulado, o que reforça a necessidade de pesquisas futuras voltadas à aplicação e validação do protocolo em propriedades rurais reais e em diferentes escalas de produção.

Referências

- AGUIRRE-VILLEGAS, H. A.; LARSON, R. A.; SHARARA, M. A. Anaerobic digestion, solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission. **Science of The Total Environment**, Elsevier BV, v. 696, p. 134059 –, Dezembro 2019. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134059>.
- AHLBERG-ELIASSON, K. *et al.* Anaerobic Digestion of Animal Manure and Influence of Organic Loading Rate and Temperature on Process Performance, Microbiology, and Methane Emission From Digestates. **Frontiers in Energy Research**, Frontiers Media SA, v. 9, Dezembro 2021. ISSN 2296-598X. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.740314>.
- BAEK, G. *et al.* Treatment of Cattle Manure by Anaerobic Co-Digestion with Food Waste and Pig Manure: Methane Yield and Synergistic Effect. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, MDPI AG, v. 17, n. 13, p. 4737 –, Julho 2020. ISSN 1660-4601. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17134737>.
- BESWICK, A. *et al.* Process safety at anaerobic digestion sites and its workplace impact: A rapid review. **Process Safety Progress**, Wiley, v. 44, n. 3, p. 359 – 367, Maio 2025. ISSN 1066-8527. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/prs.12688>.
- CHIARIELLO, C. L.; MAUAD, J. C.; DUBLIM, J. A percepção dos agricultores familiares do assentamento Itamarati-MS na aplicação de biodigestores: debate teórico e empiria sobre uma tecnologia social. **Retratos de Assentamentos**, Retratos de Assentamentos, v. 26, n. 2, p. 125 – 140, Setembro 2023. ISSN 2527-2594. Disponível em: <https://doi.org/10.25059/2527-2594/retratosdeassentamentos/2023.v26i2.574>.
- ISSAHAKU, M.; DERKYI, N. S. A.; KEMAUSUOR, F. A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters. **Heliyon**, Elsevier BV, v. 10, n. 1, p. e24019 –, Janeiro 2024. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24019>.
- KADAM, R. *et al.* A Review on the Anaerobic Co-Digestion of Livestock Manures in the Context of Sustainable Waste Management. **Energies**, MDPI AG, v. 17, n. 3, p. 546 –, Janeiro 2024. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17030546>.
- MATHIAS, J. F. C. M.; SILVA, S. S. Oportunidades e desafios para o desenvolvimento do biogás na agricultura familiar do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 87 – 101, 2023. Disponível em: https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1865?utm_source. Acesso em: 06 jul. 2026.
- MENEZES, F. G. *et al.* O papel dos biodigestores na agropecuária para mitigação das mudanças climáticas: uma análise dos benefícios ambientais. In: MENEZES, F. G. *et al.* (Ed.). **Mudanças Climáticas e seus Impactos Socioambientais: concepções, fundamentos, teorias e práticas mitigadoras**. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, 2023. v. 1, p. 278 – 286. ISBN 978-65-5360-384-4. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1155537/1/O-PAPEL-DOS-BIODIGESTORES-NA-AGROPECUARIA-PARA-MITIGACAO-DAS-MUDANCAS-CLIMATICAS-UMA-ANALISE-DOS-BENEFICIOS-AMBIENTAIS-2023.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2026.