



REUNIR:
Revista de Administração,
Contabilidade e
Sustentabilidade

www.reunir.revistas.ufcg.edu.br



ARTIGO ORIGINAL, Submetido em: 13.12.2019. Avaliado em: 30.07.2022. Apto para publicação em: 08.09.2022. Organização Responsável: UFCG.

Viabilidade energética e econômica da produção de biogás a partir de dejetos bovinos em um sistema de integração lavoura-pecuária

Energy and economic feasibility in the production of biogas from cattle wasting in a crop-livestock system

Viabilidad energética y económica de la producción de biogás a partir de estiércol bovino en un sistema integrado agropecuario

Daniel Henrique Dario Capitani

Universidade Estadual de Campinas

Doutorado em Ciências (Economia Aplicada) Universidade de São Paulo, e-mail: danieldc@unicamp.br

 <https://orcid.org/0000-0002-8025-4152>

João Victor Farina

Graduado em Administração - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

e-mail: joao.victor_farina@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-6426-7404>



PALAVRAS-CHAVE

Biogás; Análise econômico-financeira; Sustentabilidade

Dada a cada vez maior importância do agronegócio para a economia brasileira, muitas questões referentes às externalidades ambientais que podem decorrer de diferentes atividades no campo têm ganhado destaque no debate acadêmico e político, visando discutir e propor alternativas que conciliem uma produção, na medida do possível, mais sustentável e, concomitantemente competitiva. Neste sentido, este trabalho traçou uma análise de viabilidade econômica da implementação de um projeto de biodigestão anaeróbica a partir de resíduos da bovinocultura inseridos em sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP), voltado à produção de biogás. Para isso, foi aplicado um estudo de caso em uma pequena propriedade produtora de leite e milho localizada no Noroeste do estado de São Paulo. Em geral, identificou-se que o investimento é viável em diferentes cenários, gerando eficiência energética na propriedade, incrementando a receita do produtor e reduzindo riscos e incertezas financeiras. Ademais, o aproveitamento do biofertilizante como substituto à ureia também contribui para o melhor aproveitamento energético. Destarte, pode-se inferir que os investimentos na produção de biogás no sistema em estudo permitiram incrementar a competitividade do produtor simultaneamente a melhores práticas ambientais, em consonância com os preceitos elementares da sustentabilidade.

KEYWORDS

Biogas; Financial-economic analysis; Sustainability

Abstract: Given the importance of the agribusiness to the Brazilian economy, several issues have been discussed related to the environmental externalities that could be derived from the farming activities. The debate is focused in promote more sustainable practices in according to the production competitiveness. Therefore, this study assess the economic feasibility in implementing a project of anaerobic digestion for biogas production, from livestock residues in a crop-livestock system in a dairy and corn farm in the Northwest of Sao Paulo state. Overall, the investment seems to be feasible in different scenarios, leading to the increment of energy efficiency in the farm, as well as increasing on income and reduction on production risks and uncertainties. In addition, energy efficiency is improved from the substitution of urea by the bio-fertilizer. Thus, the biogas investments in a crop-livestock system lead the producer to increase the farm productivity and competitiveness, and simultaneously use better environmental practices, following the principles of sustainability.

PALABRAS CLAVE

Biogás; Análisis económico-financiero; Sostenibilidad

Resumen: Con la creciente importancia de los agronegocios para la economía brasileña, algunas reflexiones sobre las externalidades ambientales que pueden surgir de diferentes actividades en el campo han ganado importancia en el debate académico y político. La discusión tiene como objetivo proponer alternativas que concilien, en la medida de lo posible, una producción más sostenible y concurrentemente competitiva. Por lo tanto, este manuscrito analizó la viabilidad económica de implementar un proyecto de biodigestión anaeróbica a partir de residuos de la ganadería inseridos en un sistema de integración con o cultivo de maíz, dirigido a la producción de biogás, considerando un productor de leche y de maíz en el noroeste del estado de São Paulo. Los resultados sugieren que la inversión es viable, con una mejora en la eficiencia energética en la propiedad, aumentando los ingresos del productor y reduciendo sus riesgos. Además, el uso de biofertilizante como sustituto de la urea también contribuye a la eficiencia. Por lo tanto, se puede inferir que las inversiones en la producción de biogás en el sistema integrado aumentaron la competitividad del productor. Además, se observan las mejores prácticas ambientales, en línea con los preceptos elementales de sostenibilidad.

Introdução

O agronegócio brasileiro se consolida a cada ano como um dos protagonistas no mercado mundial de commodities e como importante fonte de criação de riqueza para a economia do país. Segundo Barros e Adami (2012), no setor de grãos e proteínas, a taxa de crescimento absoluta das exportações foi de 322% entre 2000 a 2011. Conforme Barros e Adami (2014), o total acumulado com as exportações de produtos advindos do agronegócio rendeu US\$ 101,5 bilhões em 2013. Ainda, de acordo com MDIC (2017), as exportações de grãos e carnes vêm crescendo sucessivamente em termos de valor, consolidando ganhos na balança comercial do país e demonstrando a solidez do Brasil no mercado exterior.

Mais recentemente, apesar da recessão econômica no Brasil entre 2014-2017, o setor apresentou taxas de crescimento significativas, representando 23,5% do PIB em 2016 (IBGE, 2017). Em 2015, ano em que o PIB teve uma retração de 3,8%, o agronegócio cresceu 3,6% em relação a 2017. Enquanto isso, a indústria e os serviços caíram 6,3% e 2,7%, respectivamente (IBGE, 2017). Os números do agronegócio internamente, conjuntamente com um ganho de competitividade internacional, são indícios de que o Brasil possui vantagens distintivas e comparativas nessa atividade econômica.

No que diz respeito à bovinocultura, especificamente, o Brasil apresenta o segundo maior rebanho e figura como grande exportador de carnes. Conforme IBGE (2018), o abate vem atingindo patamares históricos desde 2013. Em 2015, alcançou-se o valor recorde de 215,2 milhões de cabeças no rebanho total nacional. Ao fim do terceiro trimestre de 2018, registrou-se o maior valor histórico de aquisição de leite cru, 6.702.110 litros (IBGE, 2018).

Porém, na contramão do bônus econômico da agropecuária, podem-se citar algumas externalidades ambientais, sobretudo da pecuária, como o desmatamento em áreas de abertura de pastagens, o aumento de emissões, dentre outras. Ademais, na bovinocultura, tem-se a geração do metano entérico pelo gado, o que impulsiona a produção de gases de efeito estufa. De acordo com FAO (2014), a agropecuária mundial gera, em média, emissões na ordem de 5 bilhões de toneladas de CO₂ por ano, considerando neste cálculo o valor médio para o período de 2001 a 2010.

Segundo o Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia - IPAM (2017) algumas das fontes de emissão de gases do efeito estufa, no Brasil, de maneira geral, estão ligadas, diretamente ou indiretamente, à atividade pecuária. As duas

principais fontes citadas são o desmatamento de áreas nativas, atividade que pode ser representada pela expansão da fronteira agrícola e da migração da bovinocultura, e à queima de combustíveis fósseis, que, embora em menor escala de uso, também são utilizados nos processos de preparo e cultivo de solo. Ainda, o uso de fertilizantes químicos e a própria fermentação entérica, já citada, também figuram dentre atividades que contribuem nas emissões de gases do efeito estufa (GEEs) (IPAM, 2017).

Tendo em vista a intensidade da produção pecuária brasileira e sua relevância na economia, concomitante ao seu potencial de geração de externalidades ao ambiente, é importante compreender alternativas que conciliem um aumento da competitividade desse setor, com técnicas que tornem a relação entre produção e meio ambiente mais sustentável.

Esforços para o melhoramento do sistema de produção em busca de um aproveitamento dos resíduos da bovinocultura, alinhados a técnicas menos emissoras de preparação de pastagem, se tornam possibilidades para redução dos impactos. Neste sentido, mecanismos alternativos vêm sendo implementados no campo, dentre os quais se verifica o aproveitamento de resíduos orgânicos para a produção de biocombustíveis, como o biogás em biodigestores, que permite uma produção sustentável e eficiência energética à propriedade (Wu et al., 2015).

Além do aproveitamento de resíduos da pecuária para geração de energia, outro sistema que permite incrementar a sustentabilidade da produção, otimizar as relações de custo e receitas, reduzir riscos e diversificar as atividades da propriedade é o sistema integrado entre pecuária e agricultura, como os conhecidos sistemas de integração lavoura pecuária (ILP), que permite a adoção de ambas atividades em sinergia ao meio ambiente e com práticas controladas (EMBRAPA, 2006; Moraes et al., 2014).

Assim sendo, considerando os potenciais esforços para otimização do sistema de produção da bovinocultura, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade econômica da aplicação de projetos de biodigestão anaeróbica abastecidos por resíduos da produção bovina inserida em sistemas ILP em uma propriedade rural familiar, utilizando, para isso, ferramentas de análise de investimentos. Adicionalmente, reforçou-se a sinergia existente na produção de biocombustíveis in loco com sistemas de produção energeticamente eficientes.

Para tanto, o estudo de caso para a análise de viabilidade de implantação de um sistema de biodigestão foi aplicado em uma propriedade de

bovinocultura leiteira de médio porte, situada no município de Clementina-SP e que aplica o sistema ILP no plantio simultâneo de milho e brachiaria.

A partir do estudo de caso, projetou-se o sistema de biodigestão que melhor se adequaria ao local. Ademais, a construção do projeto serviu para as considerações de custos que refletiriam nas saídas de fluxos de caixas utilizadas para o cálculo da taxa interna de retorno (TIR) e do valor presente líquido (VPL) do sistema avaliado.

Devido a problemas de vazamento no modelo construído e pela falta de tempo hábil para o comprimento do tempo de retenção hidráulica do projeto, foram utilizados dados de retorno obtidos na literatura para a consideração das entradas do fluxo de caixa.

No que diz respeito à avaliação energética, traçou-se uma análise comparativa entre a projeção de biocombustíveis que se espera produzir no sistema implementado em relação ao volume de diesel utilizado na plantação e cultivo do sistema ILP local.

Entende-se que esta pesquisa, ainda que aplicada à realidade de uma única propriedade, têm potencial contributivo à literatura, uma vez que seu ensaio permite identificar a aplicabilidade de um sistema de baixo custo de fácil implementação em propriedades rurais de pequeno e médio porte, permitindo diversificar o portfólio de produção e melhorar a gestão da propriedade, mitigar riscos, gerar eficiência energética e, atender aos preceitos da sustentabilidade de dos objetivos para o desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, conhecidos como ODS, sendo passível instrumento para aplicação de políticas públicas, sobretudo voltadas às metas de redução de emissões de carbono previstas no *RenovaBio*.

Elementos teóricos da pesquisa

A produção de biogás e biodigestores anaeróbicos

O biogás utiliza a biodigestão anaeróbica para sua produção e, segundo Dhanalakshmi e Ramanujam (2012), demonstrou ser eficiente não só pela geração do biogás e de biofertilizantes, subproduto da biodigestão anaeróbica, mas como solucionador do descarte dos resíduos animais no meio ambiente e como sequestrador de GEEs. Sua produção permite incrementar o sistema de produção rural e alcançar melhor performance no uso de recursos, permitindo uma produção mais sustentável, tanto do lado ambiental, quanto econômico (Wu et al., 2015; Pooja, Goldy, Shivali, Lakhveer & Virendra 2020). Ainda, Gueri, Schirmer, Buratto e Ribeiro (2015), Matos, Paes, Pinheiro e Campos (2017) e Demeu et al. (2021) mostram que esse sistema, considerando resíduos de pecuária leiteira no Brasil, gera maior possibilidade de produção de biogás em

relação ao sistema convencional.

Sumariamente, Kunz e Oliveira (2006) demonstram a divisão do processo de fermentação da biomassa, responsável pela produção do biogás em: (i) hidrólise, parte de liberação enzimática extracelular das bactérias, responsável pela quebra de partículas por hidrólise; (ii) acidogênese, transformação de macromoléculas, proteínas, carboidratos e gorduras, em ácido butílico, ácido lácteo, etanol, dióxido de carbono, hidrogênio entre outros; (iii) acetogênese, transformação dos produtos da acidogênese em ácidos etanoicos, gás carbônico e hidrogênio; e (iv) metanogênese, em que, somente nessa etapa do processo, e na presença de gás carbônico e hidrogênio, ocorrerá a produção de metano.

Para Korys, Latawiec, Grotkiewicz e Kubon (2020), o uso de resíduos das atividades pecuárias e agrícolas para produção de biogás possuem um potencial de valorização energética, sendo que a biodigestão anaeróbica nesses sistemas fornece a estabilização e desodorização de esturme bruto, também permitindo a obtenção de um fertilizante orgânico que possa ser descartado com maior facilidade, embora seja necessário atentar-se aos custos envolvidos.

Os principais fatores que impulsionaram as pesquisas voltadas à geração de biocombustíveis foram a ratificação do Protocolo de Kyoto, o aumento na implementação de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) e ao aumento nos preços dos combustíveis fósseis na década de 1970 e 2000 (Salomon & Lora, 2009).

Atualmente, programas como o *RENOVABIO* e o desenvolvimento de possibilidades de transformação do biogás em renda condicionam o aumento da utilização desse sistema e geram um retorno financeiro positivo ao agropecuarista, além do benefício ambiental.

Segundo Kunz e Oliveira (2006), os programas pioneiros na produção de biogás foram desenvolvidos justamente nas décadas de 1970 e 1980. O foco se dava na produção de energia limpa e na autonomia de insumo. Conjuntamente, mitigava-se a poluição causada pelos resíduos da produção agropecuária. Vê-se, logo em seu início, que o aproveitamento dos resíduos da pecuária sempre esteve ligado à questão financeira, social e ambiental.

Já em relação à produção de biogás como possibilidade factível (viável tecnicamente e economicamente) para a produção de energia limpa, e alternativa ao descarte de resíduos, começa a tomar força partir dos anos 2000, com a adesão de materiais que simplificavam e barateavam o sistema (Oliveira, 2005).

Como possibilidades de retorno financeiro a partir do aproveitamento do biogás, segundo Salomon e Lora (2009), a consideração da produção de energia in loco, por meio da energia térmica produzida com a sua queima e a viabilidade de venda do excedente da produção à rede elétrica, após sua transformação em energia elétrica por geradores termelétricos, é um atrativo, conjuntamente à possibilidade de substituição de fertilizantes químicos pelos biofertilizantes (Salomon & Lora, 2009). Ademais, podem contribuir com as metas de redução na emissão de carbono e colaborar com as metas propostas, de acordo com os

objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) das Nações Unidas (Korys, Latawiec, Grotkiewicz & Kubon, 2020).

Sistemas de integração lavoura pecuária

Em paralelo à produção de biogás é interessante que a produção animal, a qual será responsável pela produção de dejetos para o biodigestor, insira-se em um sistema de produção que estabeleça uma relação menos agressiva ao meio ambiente e que gere maior diversificação e potencial de renda ao produtor.

Uma alternativa amplamente discutida na literatura é o sistema de integração lavoura pecuária (ILP), que consiste na forma integrada das produções agrícolas e pecuária, em formato de rotação ou sucessão, na mesma área e em diferentes períodos, visando reduzir os impactos ao meio ambiente a partir de práticas controladas e conservacionistas, diversificando a produção com maior eficiência no uso de recursos naturais (EMBRAPA, 2006).

Em suma, o sistema ILP tem como propósito atingir o sinergismo nas áreas rurais como resultado das interações entre solo, planta, animal e atmosfera, sendo seus benefícios a redução dos riscos e custos, incremento na eficiência produtiva no campo, mitigação de emissão de GEE, redução de pragas nas lavouras e incrementos na rentabilidade da propriedade (Moraes et al., 2014). Ainda, de acordo com Sekaran, Lai, Ussiri, Kumar e Clay (2021), permite diversificar a produção de alimentos e reduzir potenciais risco de insegurança alimentar em países de baixa renda, sendo um atrativo para pequenas propriedades rurais, incrementando os benefícios sociais. No entanto, sua gestão requer conhecimentos prévios, desde os técnicos relacionados às produções, até os econômicos, para uma gestão adequada dos custos e comercialização.

Segundo Sá et al. (2013), o sistema ILP tem demonstrado possuir melhor eficiência energética na comparação com o cultivo especializado de gramíneas, o que, associado à produção de biogás, faz com que o saldo energético entre a produção de bioenergia e a preparação do solo e cultivo no sistema consorciado para pecuária possa ter um balanço energético eficiente. Tal constatação também é observada por Sekaran et al. (2021), ao observarem os estudos aplicados na Europa Ocidental e América do Sul.

Dessa forma, vê-se que a sinergia entre o tratamento de resíduos orgânicos da produção bovina integrado a sistemas de cultivo de pastejo que demonstrem ser menos intensivos no uso de recursos é benéfica pelo aspecto ambiental e econômico.

Pela óptica ambiental, além da economia de insumos, citada por Sá et al. (2013) e Macedo (2009), a capacidade de recuperação de solos degradados e a ciclagem de nutrientes, proveniente da rotação e ou consorciamento com culturas gramineiras, são chaves para a implementação desse sistema em solos brasileiros (Macedo, 2009). Ainda, Moraes et al. (2014), apontam que o sistema ILP apresenta uma maior performance em relação aos sistemas convencionais, uma vez que tende a trazer maiores produtividades e um sistema mais sustentável, acentuados

pela promoção da biodiversidade nas propriedades.

Analisando o sistema ILP à luz da questão econômica, identificam-se dois potenciais benefícios que, segundo Martha Junior, Alves e Contini (2011), são a economia de escopo e a diversificação das atividades. A primeira é resultante do menor custo da atividade produtiva nos sistemas consorciados ou rotativos, já que minimizam gastos com preparação do solo. A segunda, pela redução dos riscos das atividades, já que um potencial dano à uma espécie pode não ser prejudicial à outra (Martha Junior, Alves & Contini, 2011). Adicionalmente, Asante e Villano (2019) apontam que é necessário um planejamento de médio e longo prazo, uma vez as imposições à produção demandam investimentos em novas tecnologias e conhecimentos técnicos, sendo necessário, nesse sentido, considerar os custos fixos de implantação em decorrência da curva de aprendizagem.

Elementos metodológicos da pesquisa

Inicialmente, este estudo propôs uma pesquisa bibliográfica descritiva referente aos modelos de biodigestores para aplicação no estudo de caso, às possibilidades de retorno financeiro com o aproveitamento de seus produtos e sobre a sinergia com sistemas ILP. É importante ressaltar que a pesquisa bibliográfica é uma abordagem que possibilita caracterizar eventos e estabelecer relações entre as variáveis e generalizar os resultados encontrados (Gil, 2008).

O estudo também foi desenvolvido utilizando como base um estudo de caso para a análise de viabilidade de implantação de um sistema de biodigestão em uma propriedade de bovinocultura leiteira que aplica o sistema ILP, situada no município de Clementina-SP. O estudo de caso, segundo Yin (2015), tem como princípio a investigação de uma questão contemporânea, no mundo real, de um fato em que as fronteiras de entre os fenômenos e efeitos ainda não se mostraram claras.

Em primeiro momento, para incorporação das variáveis-chave para início do estudo de caso, tem-se a delimitação dos dejetos bovinos, matéria orgânica considerada na biodigestão e nas projeções de conversão, os quais foram avaliados da forma indicada por Gueri et al., (2013) e Miranda, Lucas Junior, Thomaz, Pereira e Fukayama (2012), para que se tenha o melhor aproveitamento da atividade microbiana, e assim uma maior taxa de produção de biogás. Após a conclusão do projeto implementado no estudo de caso, projetou-se uma expectativa de produção de biogás a partir das relações estabelecidas por Deganutti, Palhaci, Rossi, Tavares e Santos (2002), e se desenvolveu uma análise econômica empregando metodologias de análise de investimento, sendo aplicado o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR) e o valor presente líquido (VPL), utilizando para tanto o capital investido no projeto e as projeções de entrada de caixa pelo aproveitamento do biogás e do biofertilizante.

Segundo Assaf Neto (2012), a TIR equivale à taxa de juros que faz com que os investimentos se igualem aos retornos financeiros durante o período analisado, tal como:

$$FC_0 = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (1)$$

sendo FC_0 o valor do investimento; i a TIR; e FC_j as entradas de caixa no período (j).

O VPL, por sua vez, representa o valor esperado de ganho atualizado para o tempo da realização do investimento, considerando o desconto da taxa mínima de atratividade identificada, sendo expresso de acordo com a equação 2.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0 \quad (2)$$

sendo FC_j as entradas de caixa; FC_0 a saída de caixa, ou investimento inicial; i a taxa mínima de atratividade identificada; e j o período analisado (Assaf Neto, 2012).

Segundo Schroeder, Schroeder, Costa e Shinoda (2005), a taxa mínima de atratividade (TMA) mais apropriada ao investimento é a taxa do custo do capital, considerando o custo do capital como sendo o retorno exigido pelos financiadores de capital para a firma, para que, caso seja aprovado o projeto pela premissa TIR maior que TMA, seja possível o pagamento do custo do capital aos credores e obtenção de valor econômico adicionado à empresa.

Para o estudo de caso, toda estrutura de capital foi dada de maneira própria, ou seja, não dependendo da captação junto a terceiros. Logo, o custo do capital para o empreendimento equivale aos custos de oportunidade de aplicação desse montante.

Tomando a taxa Selic como TMA, justamente por representar a média das taxas de juros aplicadas pelo sistema financeiro em um período, tem-se uma taxa mínima de atratividade para o projeto equivalente a 6,5% ao ano, valor fixado em setembro de 2018 pelo comitê de política monetária do Banco Central do Brasil - BACEN vigente durante a aplicação deste estudo (BACEN, 2018).

Além da análise de rentabilidade do investimento, a comparação da projeção da energia produzida com o total gasto na preparação e cultivo do solo foi dada a partir da quantidade entre a expectativa de geração durante um ano de biogás, convertido em diesel, pela relação proposta por Nogueira (1986), e que considera a quantidade de diesel gasta na preparação e cultivo do sistema ILPs que foi implementado na propriedade do estudo de caso.

Avaliação e dimensionamento do sistema de biodigestão

O modelo de biodigestor escolhido para o estudo de caso foi do tipo canadense, que se diferencia dos demais modelos por possuir sentido de fluxo tubular e retangular. A construção da sua câmara de fermentação é feita com materiais de característica impermeabilizante, com largura e comprimento maiores do que sua profundidade, fazendo com que a área de exposição ao sol seja maior, obtendo maior aproveitamento dessa energia térmica. A temperatura da câmara de fermentação demonstra relação direta com a produção de biogás por propiciar uma melhor ação microbiana (Gueri, Schirmer, Buratto & Ribeiro,

2013).

O biodigestor canadense é constituído por uma caixa de entrada, local onde fica depositado o material orgânico para inserção na câmara de fermentação; uma câmara de fermentação interna feita de alvenaria e/ou revestida com material impermeabilizante, local onde será realizada a fermentação da biomassa; e gasômetro feito por lona plástica de PVC ou PEAD, que será responsável pela retenção do biogás. A lona, componente principal do gasômetro, fica superior ao nível do solo, inflando conforme há produção de biogás. Adicionalmente, é necessária uma caixa de saída em alvenaria ou fibra, onde será retirado o biofertilizante; e, por fim, um canal para a saída do biogás (Oliveira, 2012).

A opção pelo modelo biodigestor canadense também foi baseada em seu menor custo de implementação e instalação (Calza, Lima, Nogueira, Siqueira & Santos, 2015), o que impacta de maneira direta na construção de fluxo de caixa e nos resultados dos cálculos da TIR e do VPL. Os custos do projeto também foram reduzidos pela escolha das geomembranas de PEAD para revestimento da câmara e construção do gasômetro (Coelho & Lavoie, 2017).

Para o dimensionamento do biodigestor, foi necessário o uso das relações propostas por Fonseca Araújo e Hendges (2009). O cálculo volumétrico do biodigestor (VB) é expresso como:

$$VB = VC * TRH \quad (3)$$

sendo VC o volume da carga diária de biomassa e TRH o tempo de retenção hidráulica.

O volume da carga diária de biomassa depende da proporção de diluição. A diluição escolhida para o trabalho foi de 1 m³ de água para cada 1 m³ de esterco, proporção necessária para o bom funcionamento do sistema hidráulico e para o melhor percentual de sólidos totais no afluente (Cortez, Silva, Lucas Júnior, Jordan, & Castro, 2014). O tempo de retenção hidráulica estimado para o projeto foi de 30 dias, próximo do tempo de retenção hidráulica verificado no trabalho de Calza, Lima, Nogueira, Siqueira e Santos (2015).

Dessa maneira, pode-se calcular as variáveis necessárias da seguinte maneira:

$$VC = 0,25 \text{ m}^3 \text{ de esterco/dia} + 0,25 \text{ m}^3 \text{ de água/dia} = 0,5 \text{ m}^3/\text{dia}$$

(4)

$$VB = 0,5 \text{ m}^3/\text{dia} \times 30 \text{ dias} = 15 \text{ m}^3 \quad (5)$$

Ainda no que tange ao dimensionamento do biodigestor, utilizando os dados obtidos a partir das fórmulas de Fonseca et al. (2009) e considerando o comprimento do tanque de fermentação do biodigestor fixado em 5 metros, valor que melhor se adequa ao local de construção, foi possível adotar as relações de Ribeiro (2011) para as dimensões do tanque em formato trapezoidal, seguindo o modelo canadense, e das dimensões do gasômetro, como se evidencia a partir das equações 6 a 14, especificadas abaixo.

$$P = C = 2r\pi \quad (6)$$

sendo P o Perímetro total transversal (campana mais tanque de fermentação); C a Circunferência da bolsa e; r o raio da bolsa.

$$A\% = 0,621p^2 - 0,042p + 0,352 \quad (7)$$

em que $A\%$ = Porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco e; p = Proporção da fase gasosa desejada ($p \leq 0,4$).

$$B = (-0,3333A\% + 0,3333)P \quad (8)$$

em que b é igual à lateral, base ou largura menor do tanque de fermentação.

$$a = 1,618b \quad (9)$$

sendo a é igual à largura maior do tanque de fermentação.

$$h = 0,951b \quad (10)$$

em que h corresponde à profundidade do tanque de fermentação.

$$Af = 0,4755 (a+b) b \quad (11)$$

sendo Af corresponde à área transversal do tanque de fermentação.

$$At = \frac{Af}{(1-p)} \quad (12)$$

em que At é a área total transversal ou área transversal do tanque de fermentação mais a área transversal da campana; e p é a proporção da fase gasosa desejada.

$$Ag = At - Af \quad (13)$$

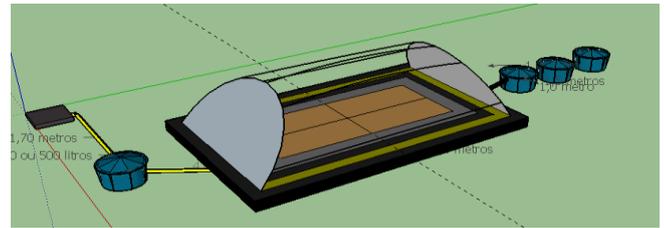
sendo Ag a área transversal da campana ou área transversal destinada para o gás.

$$Vt = At * L \quad (14)$$

em que Vt é o volume total do biodigestor (campana mais gás); e L é o comprimento do biodigestor.

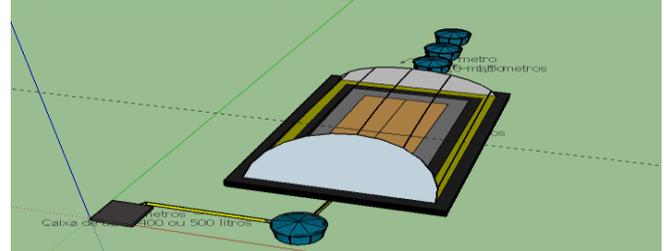
Para o desenho do projeto do biodigestor, utilizou-se o software SketchUP (2017), tendo o desenho sido projetado em escala (Figuras 1 e 2).

Figura 1 - Visão lateral do projeto de biodigestor para estudo de caso



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2 - Visão superior do projeto de biodigestor



Fonte: Elaborado pelos autores.

As estimativas diárias de geração de biogás foram projetadas segundo as proporções analisadas por Junqueira (2014), que relacionam quantidade de biomassa específica, esterco de bovino leiteiro, e a produção de biogás (equação 15).

$$Pb = Vbm * Kp \quad (15)$$

em que Pb equivale à produção de biogás gerada; Vbm é igual ao volume de biomassa diário e; Kp representa a constante de proporção (0,040 a 0,049) (Junqueira, 2014).

Em relação à produção de biofertilizante, espera-se que, passado o tempo de retenção hidráulica (TRH), a produção seja equivalente ao volume da carga diária, que é constituído pelo volume da biomassa somada a diluição (Cortez et al., 2014).

Composição dos custos do projeto

Como destacado por (Calza et al., 2015), a opção do modelo de fluxo tubular tem como vantagem a redução dos custos de implementação. Todavia, a opção dos materiais que comporão o projeto também é protagonista na formação do custo total.

Para a construção do sistema hidráulico do biodigestor, responsável pela entrada e saída do material orgânico e, também, pela saída de biogás, utilizou-se canos de PVC com diâmetro variados: 50 mm para saída do biogás e 100 mm para entrada e saída do material orgânico. Ainda foram utilizados registros de abertura e saída dos canais hidráulicos.

Para o revestimento do tanque de fermentação e construção da campânula móvel, optou-se por substituir a alvenaria e a lona de PVC, materiais normalmente

utilizados, pela tecnologia de geomembrana em polietileno. Segundo Coelho e Lavoie (2017), as geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) são frequentemente utilizadas em obras civis como barreira do fluxo para água, resíduos sólidos e líquidos. Ainda segundo o autor, o polietileno tem elevado empacotamento de suas cadeias poliméricas e, por isso, também possui alta resistência química na impermeabilização de gases, líquidos e vapores, sendo passível de ser utilizados em biodigestores tanto para o revestimento do tanque de fermentação, como para a formação do gasômetro (Coelho & Lavoie, 2017).

Ainda segundo Coelho e Lavoie (2017), testou-se o tempo de durabilidade para as geomembranas de PEAD de 0,8 mm e 2,0 mm, utilizando câmaras de envelhecimento, ensaios de tração e ciclos alternados de radiação UV. Conclusivamente, os autores mostram que para um período de teste equivalente a 15 anos, as geomembranas demonstraram manter sua capacidade física e química, estando aptas para a aplicação.

Considerando apenas os materiais que formaram a construção dos sistemas hidráulicos de entrada e saída da biomassa, a construção do tanque de fermentação e da campânula móvel, além do sistema de retirada do biogás, e desconsiderando o sistema de medição do biogás (que não é trivial a operação do sistema e atua como um mecanismo de acompanhamento e controle), tem-se a lista de materiais utilizados pela propriedade e seus custos expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Lista de materiais com seus custos relativos

Materiais	Valor	Percentual
180 m ² de geomembrana PEAD 0,8mm	R\$ 5.870,00	51,44%
1 unidade registro esfera para cano 50 mm	R\$ 50,00	0,44%
18 m tubo de esgoto 100mm	R\$ 207,54	1,82%
1 unidade de P.U branco	R\$ 23,00	0,20%
3 m ³ brita	R\$ 261,00	2,29%
6 m tubo soldável 50 mm	R\$ 72,00	0,63%
1 unidade de cap soldável 50 mm	R\$ 5,82	0,05%
1 unidade redução excêntrica esgoto 100x75mm	R\$ 7,87	0,07%
1 unidade adaptador sol anel ved cil/ret 25mm	R\$ 11,41	0,10%
1 unidade ponteiros brec esgoto 100	R\$ 21,15	0,19%
1 unidade caixa d'água polietileno 500 lt c/ tampa	R\$ 163,90	1,44%
2 unidades caixa d'água polietileno 1000 lt c/ tampa	R\$ 600,00	5,26%
2 unidades adap sol anel ved cil/ret 50mm	R\$ 51,34	0,45%
1 unidade luva esgoto 150mm	R\$ 14,35	0,13%
1 unidade redução excêntrica esgoto 150x100mm	R\$ 13,83	0,12%
4 unidades joelho 90 esgoto 100mm	R\$ 14,76	0,13%
1 unidade gerador a gás 6 kVA	R\$ 3.769,10	33,03%
1 unidade registro esfera para cano 100 mm	R\$ 239,00	2,09%
1 unidade adesivo PVC frasco 175g	R\$ 12,30	0,11%
1 unidade joelho 90 esgoto 100mm	R\$ 3,32	0,03%

Fonte: Dados da pesquisa.

Importante ressaltar que os materiais compuseram o maior custo frente às saídas com serviços. Adicionalmente, a geomembrana de PEAD de 0,8 mm foi o item com maior peso na composição dos custos totais. Em relação aos custos inerentes aos serviços para o sistema, destaca-se, novamente, a mão de obra técnica para colocação da geomembrana.

Ressalta-se, ainda, que a colocação da geomembrana é um processo crítico. Os danos na geomembrana se dividem em 73% dos casos durante a instalação da cobertura, 24% durante a instalação da geomembrana e somente 3% durante a pós construção do sistema, devendo, então, haver preparo técnico para a utilização desse material (Marçal, 2012)

Adicionalmente, registraram-se gastos referentes à mão de obra para escavação das canaletas de ancoragem e os serviços de maquinário para abertura do tanque de fermentação, representados pela Tabela 2.

Tabela 2. Lista de serviços com seus custos relativos

Serviços	Valor	Percentual
Mão de obra técnica especializada para aplicação da geomembrana + deslocamento técnico	R\$ 900,00	45,87%
Mão de obra para auxílio na instalação da geomembrana e montagem do sistema hidráulico	R\$ 780,00	39,76%
Retroescavadeira para abertura do tanque de fermentação, caixas de entrada e saída e sistema de ancoragem	R\$ 282,00	14,37%

Fonte: Dados da pesquisa.

Todos os componentes de saídas de caixa do projeto não consideraram o sistema de medição do biogás, dado que, nesse estudo de caso, houveram problemas referentes à estocagem do biogás devido aos vazamentos no sistema de retirada pela vedação incorreta, o que impossibilitou o aproveitamento do biogás gerado na propriedade em tempo hábil para a consideração no estudo de caso desse trabalho, não justificando, dessa forma, a aquisição desses equipamentos para o projeto. Na Tabela 3 encontram-se, de forma consolidada, os custos totais incorridos em todo o processo.

Tabela 3. Composição dos custos incorridos totais

Classificação	Valor	Percentual
Materiais	R\$ 11.411,69	85,33%
Serviços	R\$ 1.962,00	14,67%
Total	R\$ 13.373,69	100,00%

Fonte: Dados da pesquisa.

Possibilidades de entrada de caixa

A consideração do biogás como possibilidade de retorno financeiro vem principalmente pela produção de energia in loco e pela viabilidade de venda do excedente da

produção à rede elétrica, ou mesmo sua conversão direta em equipamentos, além da substituição de fertilizantes químicos pelos biofertilizantes (Salomon & Lora, 2009).

Sob a óptica da produção do biogás, a utilização de distintos resíduos orgânicos resultará em distintos níveis de produção e, dessa forma, diferentes entradas de caixa, que também variarão de acordo com os requisitos de tratamento da biomassa. Tais variações podem ser interpretadas, sinteticamente, a partir dos parâmetros percentuais de sólidos voláteis e sólidos fixos na composição da matéria, uma vez que para cada tipo de biomassa seja esperada um percentual distinto de cada um desses componentes, como também de diluição (Cortez et al., 2014).

Segundo Junqueira (2014), um quilo (kg) de esterco de bovino de leite tem a produção de biogás entre 0,040 e 0,049 m³ de biogás. Seguindo as referências, e para o dimensionamento do biodigestor projetado, cuja carga diária de biomassa esperada equivale a 250 kg, têm-se, por meio de uma relação de proporção, a produção de biogás entre 10 m³ e 12,5 m³ por dia, posterior ao tempo de retenção hidráulica estimado.

Seguindo as referências, e para o dimensionamento do biodigestor projetado, cuja carga diária de biomassa esperada equivale à 250 kg, têm-se, por meio de uma relação de proporção, a produção de biogás entre 10 m³ e 12,5 m³ por dia, posterior ao tempo de retenção hidráulica estimado, para as relações de biomassa/biogás para esterco de gado bovino leiteiro evidenciado por Salomon e Lora (2009).

Para a análise do projeto de estudo de caso, dada a estimativa de produção diária de 10 m³ a 12,25 m³, segundo Deganutti et al. (2002), é possível, com essa quantidade de biogás, gerar de 14,28 Kwh a 17,49 Kwh por dia. É necessário ponderar que a estimativa de geração de energia depende de fatores além da quantidade de biogás, sendo elas a parcela de metano no biogás gerado e a eficiência dos geradores termoeletrônicos a biogás.

Além da regulamentação nº 482/2012 da ANEEL que caracteriza a micro e minigeração distribuída e o fornecimento do excedente à rede elétrica, tendo como contrapartida o crédito equivalente na energia utilizada proveniente da concessionária, a aprovação do sistema ligado à rede beneficia o setor produtivo da agropecuária, agregando-o maior aproveitamento financeiro, sustentável e consciência socioambiental (ANEEL, 2016).

O sistema de aproveitamento do biogás para geração de energia pode ser feito, também, de maneira autônoma, ou seja, desconectado da rede. Nessa configuração, os geradores termoeletrônicos podem fornecer eletricidade instantânea para utilização dos equipamentos, sendo ligados apenas quando houver necessidade.

Em qualquer sistema adotado, desconectado ou não da rede, as entradas de caixa calculadas para o projeto não se alteram, uma vez que mesmo não havendo a creditação direta quando o sistema é autônomo, existe a substituição do uso da energia da rede.

Considerando a média dos valores da tarifa de energia elétrica de 2013 a 2017 para o Sudeste brasileiro, tem-se o custo do Kwh em R\$ 0,37. Para a média brasileira rural, no

mesmo período, tem-se um valor de R\$ 0,23. Para tanto, o valor considerado no estudo será a média do último ano verificado na propriedade, de R\$ 0,39, a fim de normalizar as variações das tarifas, devido às bandeiras tarifárias e à sazonalidade e, também, para dar maior consistência à projeção (EPE, 2018).

Do ponto de vista do aproveitamento do biofertilizante, seu volume de produção está intimamente relacionado ao volume da carga de entrada diária do biodigestor, uma vez que, passado o tempo de retenção hidráulica, o biodigestor terá sua operação no nível máximo do tanque de fermentação, fazendo com que cada volume de inserção em biomassa tenha um correspondente na caixa de saída, sendo esse material o composto já biodigerido, caracterizado pelas propriedades inerentes aos biofertilizantes. Espera-se, com isso, o correspondente diário em biofertilizante de 0,5 m³ após o tempo de retenção hidráulica.

Além disso, a produção de biogás interfere positivamente na qualidade do biofertilizante, subproduto do sistema, uma vez que a remoção de carbono, devido à produção de metano e gás carbônico, reduz a proporção de carbono para nitrogênio do biofertilizante, o que traz melhoras no seu uso como insumo agrícola (Cortez et al., 2014).

Com o aproveitamento dentro da propriedade¹, o biofertilizante passou a ser utilizado como substituto de fertilizantes químicos, sobretudo da ureia, que é o principal adubo utilizado na propriedade. Devido a isso, o retorno esperado pela inserção do biofertilizante é a parcela de substituição frente à aquisição da ureia.

Bisso, Barros e Santos (2003) demonstraram que o biofertilizante bovino possui em sua composição química 8,4g de nitrogênio para cada kg de matéria orgânica, e tendo a massa específica do esterco equivalente à massa específica da água, em uma proporção de diluição de um para um, a produção diária de 0,5 m³ de biofertilizante resultaria em um equivalente 2,1 kg de nitrogênio.

Tendo a ureia aproximadamente 46% de nitrogênio em sua composição, de acordo com Guimarães Júnior, Pereira, Tomich e Gonçalves (2016), a possibilidade de substituição diária pelo biofertilizante produzido in loco é de 4,56 kg, quando se analisa o percentual de nitrogênio nos materiais analisados.

A média do preço de comercialização de ureia para o cliente final nos primeiros dois bimestres de 2019 foi de R\$ 2,03 por kg (IEA, 2019). Dessa forma, o retorno estimado para entrada de caixa diário pela substituição da ureia é de R\$ 9,26.

¹ Importante destacar que se investigou, preliminarmente, a possibilidade de geração de recursos a partir de creditação de carbono. Porém essa análise foi refutada, uma vez que as características técnicas do projeto condicionariam esses mecanismos para retornos em créditos de carbono. Entretanto, os processos de comissionamento, regularização e gestão documental demandam um dispêndio financeiro totalmente desproporcional aos projetos de geração de pequeno porte, fazendo com que os custos ultrapassem múltiplas vezes o percentual de 25% do valor inicial do projeto, limite máximo de formação do custo do investimento, como colocado por Cortez Silva, Lucas Júnior, Jordan e Castro (2014).

As equações 16 e 17, a seguir, equalizam as projeções de retorno diário esperado.

$$R_{biogás} = Q_{biogás} \times K \times \text{Custo Kwh} \quad (16)$$

sendo $R_{biogás}$ a entrada de caixa diária esperada com a substituição da energia elétrica; $Q_{biogás}$ a quantidade projetada em m^3 de produção diária de biogás; K equivalendo a taxa de conversão de m^3 de biogás em Kwh; e Custo Kwh representando a tarifa base do Kwh considerada em cada cenário.

$$R_{biofertilizante} = Q_{biofertilizante} \times K \times \text{Custo ureia} \quad (17)$$

Sendo $R_{biofertilizante}$ a entrada de caixa diária esperada com a substituição do uso da ureia; $Q_{biofertilizante}$ a quantidade projetada em m^3 de produção diária de biofertilizante; K representando a taxa de conversão de biofertilizante para ureia, baseada na parcela de nitrogênio; e Custo ureia equivalendo ao preço fixado da ureia substituída.

Pensando na composição do fluxo de caixa durante o tempo para o cálculo da TIR e do VPL, tanto para a entrada de caixa com retorno do biogás quanto para a entrada de caixa pelo retorno do biofertilizante os únicos componentes que corrigiram as projeções foram o custo da ureia e a tarifa de energia elétrica, sendo os demais constantes.

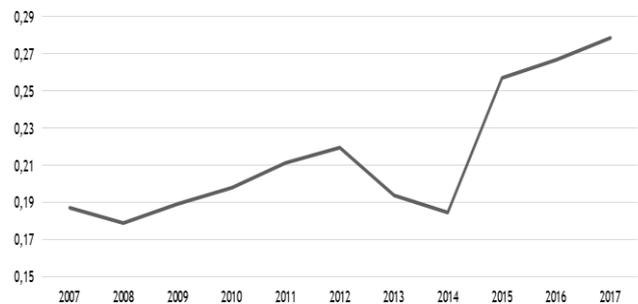
Para estimar a taxa de variação da tarifa de energia elétrica da propriedade, usou-se a média da variação anual de uma série de onze anos para a classe de consumo rural, entre 2007 e 2017², uma vez que não havia dados históricos da variação da tarifa da propriedade especificamente. Assim, a taxa de correção das entradas no projeto pela substituição da energia elétrica foi indexada por essa média histórica do período citado, que equivale a 4,74% ao ano (Figura 3).

Para a projeção do preço da ureia foi usada a variação dos últimos 12 meses, a fim de estabelecer a taxa de atualização mensal para correção do preço (IEA, 2019)³. A variação corresponde a uma variação média percentual de -0,31% (Figura 4).

Figura 3. Tarifa média (valor nominal) em R\$/Kwh para classe de consumo rural entre 2007 e 2017

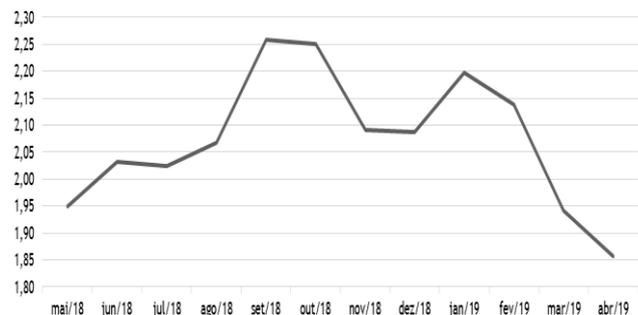
² Para o cálculo da variação anual média da energia elétrica para classe de consumo rural durante o período de 2007 e 2017, utilizou-se o Anuário Estatístico de Energia Elétrica da Empresa de Pesquisa Energética de 2012, ano em que se começou a divulgação das tarifas segregadas por classe de consumo, e de 2018, que continha os dados para comparação histórica (EPE, 2012; EPE, 2018). O racional utilizado para a taxa calculada foi desenvolver uma média aritmética das variações anuais, obtendo, assim, um valor de tendência média para variação anual com base no período analisado. Ademais, a utilização da variação na tarifação minimiza o problema da correção monetária caso fossem considerados unicamente a média dos valores nominais.

³ O racional para variação da ureia foi o mesmo empregado no cálculo da taxa de variação da energia elétrica, explicado pela nota 1. Adicionalmente, os dados do preço da ureia são referentes as médias dos valores de aquisição para os agropecuaristas (IEA, 2019).



Fonte: EPE (2012); EPE (2018).

Figura 4. Preço médio mensal nominal do Kg da ureia no Estado de São Paulo.



Fonte: IEA (2019).

Análise de viabilidade energética

O método de avaliação comparativa entre entradas e saídas de energia de um ecossistema produtivo recomenda o uso de algumas abordagens. A análise energética, uma das possibilidades, mostra-se relevante por apresentar índices de input e output energéticos no agrossistema, sendo capaz de agir como instrumento de monitoramento do processo produtivo, sobretudo no uso de combustíveis fósseis (Bueno, 2002).

Dentro dessa perspectiva, o presente trabalho propôs uma análise energética comparativa entre o total gasto em diesel para a plantação e cultivo do sistema de consorciamento entre milho e forrageira escolhido para o local, com a geração de biogás proveniente do tratamento anaeróbico dos resíduos para o estudo de caso proposto.

Metodologicamente, contabilizou-se o total de litros de diesel utilizado para plantação e cultivo do milho com capim do gênero *Brachiaria* e comparou com o potencial de geração de biogás a partir do aproveitamento da biomassa gerada e da taxa de conversão de biomassa em biogás verificado no biodigestor da propriedade.

Os dados foram então padronizados para o equivalente em hectare. Logo, para correta comparação dos dados, foram usados a quantidade de diesel gasto para plantio e cultivo de um hectare frente à produção de biogás gerado a partir do resíduo da produção leiteira referente ao mesmo espaço. Para isso, foi estimada a produção total de biogás e dividida pela área produtiva da propriedade. Para

conversão de biogás em diesel, foi utilizada a tabela de comparação de Nogueira (1986), expressa na Tabela 4, adiante.

Tabela 4. Equivalência de m³ de biogás para outros combustíveis

Combustível	Conversão para m ³ de biogás
Gasolina (L)	0,61
Querosene (L)	0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
Etanol (L)	0,8
Carvão Mineral (kg)	0,74
Lenha (kg)	3,5

Fonte: Dados da pesquisa; Nogueira (1986).

Para a volumetria de diesel gasta na plantação e cultivo, utilizou-se os dados do plantio de uma área de 3,4 hectares que foi preparada em novembro de 2018.

Os processos de plantio, de modo sequencial, foram: preparação do solo por meio de gradeamento; correção de pH com calcário na dosagem de 2.000 Kg/ha e fertilização com cama de galinha na dosagem de 10.000 Kg/ha; gradeamento intermediário; nivelamento; plantio de capim *Brachiaria* e milho, com adubação de cobertura simultaneamente com sulfato de amônia na dosagem 450 Kg/ha.

Segundo Almeida, Silva e Silva (2009), o maquinário com 85 cv, com uso de implemento semeadora, mesma especificação do trator utilizado na propriedade do estudo de caso, demonstrou um consumo médio horário de 9,66 litros com tratamento de 4ª marcha e 2.200 rotações por minuto, equivalente ao tratamento feito no plantio estudado, cabendo assim uma comparação com a média verificada no estudo de caso, que foi de 11,5 litros por hora.

As médias observadas em revisão bibliográfica estiveram relativamente próximas quando se considera a verificada no estudo de caso para a análise de todos os processos de plantio. Dessa maneira, levando em conta a produtividade média verificada para o plantio do sistema ILP verificado, 1,4 hectare por hora para a área já mencionada, e a somatória de todos os processos expostos, chegou-se ao consumo total de diesel de aproximadamente 438 litros. Logo, dividindo o consumo total pela área total, tem-se um consumo de 128,8 L/Ha para o plantio e cultivo do sistema ILP para a área analisada.

Apresentação e discussão dos resultados

Os resultados do projeto de biodigestão anaeróbica sugerem um capital inicial para investimento relativamente alto, sobretudo quando se tem o enfoque para pequenos e médios produtores. O custo inicial de R\$ 13.373,69, entretanto, é a única saída de caixa identificada para o fluxo de caixa do projeto, uma vez que não é esperado custos adicionais com manutenção, posto que os materiais que formam o mecanismo seguem a vida útil do projeto, que é de 10 anos, período da garantia da geomembrana

pelo fabricante.

Adicionalmente, não houve gastos adicionais com mão de obra, uma vez que o processo de higienização por raspagem do esterco do curral já era feito no retiro leiteiro onde o biodigestor foi instalado, não havendo a necessidade de alterações de processos, dado que o sistema hidráulico é diretamente conectado à saída do curral.

Os valores considerados para entrada do fluxo de caixa, como já mencionado no presente trabalho, são referentes ao período diário e compõem o retorno esperado com a substituição da energia elétrica e a substituição de adubo fóssil, considerando especificamente a ureia, por ser um fertilizante nitrogenado, tal qual o biofertilizante.

Essas entradas são de R\$ 5,57 a R\$ 6,82, utilizando a média das últimas doze tarifas verificadas na propriedade do estudo de caso e os dois cenários de produção do biogás, e de R\$ 9,26, considerando o preço médio da ureia para os dois primeiros bimestres de 2019. A TMA foi fixada em 6,5% ao ano, sendo referente à taxa Selic vigente no início de 2019 (BACEN, 2019).

Foram traçados dois cenários para os resultados, onde, para o mais otimista, considerou-se a entrada por substituição de energia equivalendo a R\$ 6,82 ao dia, seguindo o limite superior do intervalo de conversão de esterco de bovino leiteiro para biogás, de 0,049 m³/kg; e o menos otimista, de R\$ 5,57, considerando o limite inferior do intervalo de conversão a 0,04 m³/kg, conforme proposto por Junqueira (2014).

Além disso, as entradas do fluxo de caixa foram indexadas pela taxa média de aumento da tarifa de energia elétrica dos últimos 11 anos para o consumidor rural, 4,74% ao ano, e pela variação média do preço da ureia durante os últimos 12 meses, equivalendo a -0,31% ao mês para a substituição da ureia (EPE, 2012; EPE, 2018; IEA, 2019).

Adicionalmente, ressalta-se que tais entradas só foram projetadas ao fim do tempo de retenção hidráulica do projeto, estipulado em 30 dias. Logo, no mês inicial não há entrada de caixa. O tempo de vida útil do projeto, utilizado para determinar o fluxo de caixa do sistema, foi de 10 anos, período em que os materiais que compõem o mecanismo, sobretudo a geomembrana de PEAD, estão sob a garantia do fabricante, tornando válidas as projeções.

Para o cenário mais otimista, o fluxo de caixa do projeto se desenhou como demonstrado pela Figura 5, que considerou a entrada pela substituição de energia elétrica em R\$ 6,82, e a substituição da ureia em R\$ 9,26 por kg, ambos ao dia.

Para o cenário menos otimista (Figura 6), a consideração da entrada pela substituição de energia elétrica foi realizada baseado em uma entrada de R\$ 5,57 e a substituição da ureia em R\$ 9,26 kg.

Ambos os resultados dos indicadores de investimento para os diferentes cenários sugerem uma projeção bastante satisfatória. O VPL se manteve positivo e representou 2,14 vezes o investimento inicial para o cenário dois (menos otimista), e 2,45 vezes para o cenário um (mais otimista). A TIR foi significativamente superior a TMA adotada para o fluxo de caixa. No cenário um, equivaliu a 6,8 vezes a TMA, e no cenário dois a 6,2 vezes.

Do cenário mais otimista para o cenário menos

otimista, houve uma variação de R\$ 4.130,82 para o VPL e de 3,93% para a TIR, ou seja, a eficiência operacional no sistema de biodigestão, variável que diferencia os dois cenários, influencia consideravelmente na taxa de retorno do projeto.

Todavia, a probabilidade de viabilidade técnica para o projeto analisado não se mostrou perfeita, uma vez que houve problemas na construção do tanque de fermentação, dado a instabilidade do terreno e, posteriormente, com o gasômetro, devido a uma falha na vedação térmica utilizada para geomembrana de PEAD.

Figura 5. Fluxo de caixa, TIR e VPL projetados para o cenário mais otimista.

Ano	Custos incorridos	Entradas por meio das projeções de subst. da energia elétrica	Entradas por meio das projeções de subst. da ureia	Fluxos totais de caixa	Fluxo de caixa trazido a VP pela TMA
0	- 13.373,7			- 13.373,7	- 13.373,7
1		2.392,9	3.092,4	5.485,5	5.150,7
2		2.730,8	3.358,9	6.089,86	5.369,2
3		2.860,3	3.348,5	6.208,9	5.140,0
4		2.995,9	3.338,2	6.334,1	4.923,6
5		3.137,9	3.327,8	6.465,7	4.719,2
6		3.286,6	3.317,5	6.604,2	4.526,1
7		3.442,4	3.307,2	6.749,7	4.343,4
8		3.605,6	3.297,0	6.902,6	4.170,8
9		3.776,5	3.286,8	7.063,3	4.007,4
10		3.955,5	3.276,6	7.232,1	3.852,7
Valor presente líquido					32.829,4
Taxa Interna de Retorno ao ano					44,215%

Fonte: Dados da pesquisa.

Porém, mesmo que se verificasse a impossibilidade do aproveitamento do biogás, fator pouco provável dado a natureza dos problemas desse estudo de caso, apenas o aproveitamento do biofertilizante geraria um retorno positivo, já que ele condiz com 55,62% do total das entradas para o cenário dois, e 50,58% das para o cenário um.

Em geral, pode-se notar que os resultados convergem com os aplicados nos estudos de Gueri et al. (2015), Matos et al. (2017) e Demeu et al. (2021), que analisaram o investimento em biodigestor anaeróbico aplicados para pecuária leiteira no Brasil em período similar ao deste estudo, também em cenário controlado de estudo de caso. Para Gueri et al. (2015), o processo de biodigestão anaeróbica se mostra mais eficiente para tratamento de resíduos da pecuária. No caso do trabalho de Matos et al. (2017), pôde-se concluir que o biodigestor anaeróbico

canadense se mostrou mais eficiente que as alternativas em termos de eficiência e custos, enquanto no estudo de Demeu et al. (2021), foram traçados diferentes cenários, todos apontando para VPL positivo e TIR acima da taxa mínima de atratividade.

Figura 6. Fluxo de caixa, TIR e VPL projetados para o cenário menos otimista

Anos	Custos incorridos	Entradas por meio das projeções de subst. da energia elétrica	Entradas por meio das projeções de subst. da ureia	Fluxos totais de caixa	Fluxo de caixa trazido a VP pela TMA
0	-13.373,7			-13.373,7	-13.373,7
1		1.954,4	3.092,5	5.046,9	4.738,8
2		2.230,3	3.359,0	5.589,3	4.927,9
3		2.336,1	3.348,6	5.684,6	4.706,0
4		2.446,8	3.338,2	5.785,0	4.496,8
5		2.562,8	3.327,8	5.890,6	4.299,4
6		2.684,2	3.317,5	6.001,8	4.113,2
7		2.811,5	3.307,2	6.118,7	3.937,4
8		2.944,7	3.297,0	6.241,7	3.771,4
9		3.084,3	3.286,8	6.371,1	3.614,7
10		3.230,5	3.276,6	6.507,1	3.466,5
Valor presente líquido					28.698,6
Taxa Interna de Retorno ao ano					40,285%

Fonte: Dados da pesquisa.

No que diz respeito à comparação energética, a quantidade gasta de diesel por hectare para a plantação e cultivo do sistema ILP foi de 128,8 litros. Para esse valor, foi considerado os processos de preparação do solo por meio de gradeamento, de correção de pH, de fertilização, de gradeamento intermediário, de nivelamento, plantio de capim *Brachiaria* e milho e de adubação de cobertura.

De maneira genérica, dividiu-se a geração de biogás total por hectare, tendo, assim, a mesma unidade de análise, podendo, então, estabelecer um percentual de comparação do biocombustível estimado no processo produtivo com o combustível usado para o plantio e cultivo do sistema ILP.

A conversão do biocombustível para o diesel foi embasada em Nogueira (1986). Assim como feito para as análises das entradas do fluxo de caixa, foram considerados dois cenários, simulando uma operação do biodigestor com uma taxa de conversão de 0,04 m³ para cada kg de esterco, e de 0,049 m³ para cada kg de esterco (Junqueira, 2014). Por conveniência, adotou-se o período de um ano para a sumarização dos resultados, descontado do tempo de retenção hidráulico, representando, assim, o primeiro ano

de operação. Tais conversões estão expressas na tabela 5.

Tabela 5. Tabela de conversão da produção de biogás em diesel por hectare

Cenário	Cenário 1	Cenário 2
Volume de entrada de biomassa por dia (kg)	250	250
Constante de conversão de esterco bovino leiteiro para biogás (m ³ /kg)	0,049	0,04
Projeção de produção diária de biogás (m ³)	12,25	10
Período descontado do tempo de retenção hidráulica (dias)	335	335
Produção total de biogás estimada para a propriedade no período analisado (m ³ /período)	4.103,75	3.350,00
Área ocupada com o rebanho leiteiro (ha)	8	8
Constante de conversão de diesel para biogás (L/m ³)	0,55	0,55
Quantidade de diesel equivalente a produção de biogás por hectare para o período analisado (L/ha/período)	282,13	230,31

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados para ambos cenários mostram que a projeção de produção de biogás para o período colocado no estudo de caso é energeticamente maior do que o total de diesel gasto para plantação e cultivo do sistema ILP, que é de 128,8 L/ha. A projeção varia em 22,5% quando se compara o cenário um com o cenário dois. Tais resultados convergem com os apontados por Sekaran et al. (2021), de que o sistema ILP utilizando forragem para incremento de nitrogênio tendem a gerar maior eficiência energética em relação a cada sistema (agrícola e pecuário) isoladamente. Também vão de encontro às constatações de Moraes et al. (2014), de que sistemas de forragem e rotação controlados que permitam maior sinergia nas interações bioquímicas podem promover meios para uma intensificação da sustentabilidade.

Considerações finais

As projeções do VPL e TIR, para ambos os cenários propostos no estudo, viabilizam o investimento inicial e denotam, além do ganho ambiental, já difundido na literatura, como em Dhanalakshmi e Ramanujam (2012), Wu et al., Calza et al. (2015), Guerri et al. (2015), Matos et al. (2017) e Demeu et al. (2021), uma contrapartida financeira, sendo mais um estímulo para o desenvolvimento desse tipo de geração de energia.

Além de todos os bônus que são característicos de uma produção sustentável, renovável e in loco, a autonomia energética para processos focais, como por exemplo o resfriamento do leite, na propriedade rural, agregam na administração do risco do agropecuarista.

Quando se analisa os resultados da comparação energética entre a produção biogás e o total gasto em diesel no plantio e cultivo do sistema ILP, vê-se, a priori, um saldo positivo, assim como apontam Moraes et al. (2015), Wu et al. (2015) e Sekaran et al. (2021). Todavia, esse saldo positivo não pode ser confundido com um balanço energético positivo, uma vez que os dados não são

competentes para tal afirmação, sobretudo por não considerarem outros inputs e outputs energéticos que não seja o consumo de combustível e a produção do biogás.

É possível, por outro lado, concluir que a geração do biocombustível aumenta a eficiência energética do sistema produtivo, que já é interessante dado a escolha pelo sistema ILP. Além da possibilidade de conversão de energia pelo biogás, ponto focal mensurado nesse trabalho, o aproveitamento do biofertilizante como substituto à ureia também contribui para o melhor aproveitamento energético.

Ademais, para além das análises de viabilidade econômica e energética desenvolvidas, a evidenciação das sinergias entre o aproveitamento de resíduos da pecuária, a produção de energia por meio do biogás e a substituição de fertilizantes por biofertilizantes, inseridos em sistemas energeticamente eficientes, ocorrem não só no que tange à sustentabilidade ambiental, mas também na questão financeira, o que é essencial para a disseminação desse tipo de tecnologia.

Portanto, ressalta-se que ao avaliar-se investimentos com as características aqui apresentadas, contribui-se para o avanço científico em processos, técnicas e produtos que integrem essas sinergias, os quais são essenciais para o aumento da competitividade do agronegócio brasileiro, tornando-a, também, mais sustentável em toda amplitude que o conceito engloba.

Ademais, entende-se que o estudo contribui para a reflexão na busca de alternativas que busquem, ao mesmo tempo, mitigar riscos, diversificar a produção, reduzir custos e expandir receitas no meio rural, além de buscar uma produção mais sustentável, que possam trazer maior rentabilidade a pequenos e médios produtores, tanto de caráter patronal como familiar, contribuindo-se como um elemento agregador do negócio e de relativamente fácil implementação, podendo servir como subsídios para análise de intervenções governamentais no direcionamento da política de crédito rural para capital produtivo de propriedades desse porte. Ademais, permite uma caracterização de produção energeticamente eficiente e sustentável economicamente e ambientalmente, em consonância com os apelos dos consumidores, parceiros comerciais e das metas previstas no RenovaBio.

Por fim, é importante ressaltar as limitações do estudo, no que se refere às projeções de retorno do fluxo de caixa do projeto e a comparação energética resultante desse trabalho, as quais são estimativas, por se tratar de uma expectativa de produção de biogás e de biofertilizante. Ainda que esses dados tenham sido embasados em referências bibliográficas, os indicadores financeiros devem ser interpretados à luz do gradiente de risco técnico para cada projeto específico, dadas as condições do sistema para um melhor aproveitamento da biomassa e, dessa forma, um melhor aproveitamento produtivo do biodigestor.

Adicionalmente, os custos incorridos no estudo de caso condizem com as características da propriedade em que o trabalho foi desenvolvido e são passíveis de variação, sobretudo aqueles que se relacionam com a estrutura para construção do biodigestor. Nesse sentido, ressalta-se que a

própria decisão acerca do modelo de biodigestor escolhido deve ser feita com uma avaliação prévia das condições do local, das variáveis do sistema, tal como o volume de carga e a característica da biomassa, e das possibilidades do aproveitamento do biogás e do biofertilizante para propriedade na qual será inserido. Assim, estudos futuros podem tanto tratar diferentes condições produtivas e conjunturais que possam afetar os indicadores técnicos e econômicos a serem tratados no modelo em questão.

Referências

Agência Nacional De Energia Elétrica - ANEEL. (2016). *Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica*. Cadernos temáticos ANEEL. (2a ed.). Brasília, DF.

Almeida, R. A. S., Silva, C. A. T., & Silva, S. L. (2010). Desempenho energético de um conjunto trator-semeadora em função do escalonamento de marchas e rotações do motor. *Revista Agrarian*, 3(7), 63-70.

Asante, B. O., & Villano, R. A. (2019). Components of farm-level productivity in integrated crop-livestock farming systems in Ghana: the role of mix efficiency. *International Journal of Food and Agricultural Economics*, 7(1), 63-76.

Assaf Neto, A. (2012). *Matemática Financeira e suas aplicações*. (12a ed.). São Paulo, SP: Atlas.

Banco Central Do Brasil - BCB. (2019). *Copom mantém taxa Selic em 6,50% a.a.* Brasília. Recuperado em 04 abril, 2019, de <https://www.bcb.gov.br/>.

Barros, G. S. C., & Adami, A. C. O. (2012). *Valorização recorde dos preços garante faturamento do agronegócio em 2011*. CEPEA/ESALQ/USP, Piracicaba.

Barros, G. S. C., Adami, A. C. O., & Zandoná, N. F. (2014). *Faturamento e volume exportado do agronegócio brasileiro são recordes em 2013*. CEPEA/ESALQ/USP, Piracicaba.

Bisso, F. P., Barros, I. B. I., & Santos, R. S. (2003). Biofertilizantes foliar em diferentes concentrações e frequências de aplicação de calêndula. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Agroecologia*, Porto Alegre, RS.

Bueno, O. C. (2002). *Análise energética e eficiência cultural do milho em assentamento rural, Itaperá/SP*. (Tese de Doutorado em Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, Brasil.

Calza, L. F., Lima, C. B., Nogueira, C. E. C., Siqueira, J. A. C., & Santos, R. F. (2015). Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. *Engenharia Agrícola*, 35(6), 990-997. Doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p990-997/2015.

Coelho, M. F. L., & Lavoie, F. L. (2017). Comportamento da geomembrana de PEAD exposta ao envelhecimento acelerado. In: *Anais do 14º Congresso brasileiro de polímeros*, 2017, Águas de Lindóia, SP.

Cortez, L. A. B., Silva, A., Lucas Júnior, J., Jordan, R. A., & Castro, L. R. (2014). *Biomassa para energia*. (3a ed.). Campinas, SP: Editora Unicamp.

Deganutti, R., Palhaci, M. C. J. P., Rossi, M., Tavares, R., & Santos, C. (2002). *Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada*. Departamento de Artes e Representação Gráfica, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Unesp, Bauru, SP.

Demeu, F. A., Lopes, M. A., Reis, E. M. B., Lima, A. L. R., Carvalho, F. M., Palhares, J. C. P., & Otenio, M. H. (2021). Economic viability of a canadian biodigester for power generation in dairy farming. *Semina: Ciências Agrárias*, 42(1), 375-394. Doi: 10.5433/1679-0359.2021v42n1p375.

Dhanalakshmi, S. V., & Ramanujam, R. A. (2012). Biogas generation in a vegetable waste anaerobic digester: An analytical approach. *Research Journal of Recent Sciences*, 1(3), 41-47.

Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. (2018). *Sistema Integração Lavoura Pecuária*. Recuperado em 05 novembro, 2018, de <http://www.embrapa.br>.

Empresa De Pesquisa Energética - Epe. (2017). *Anuário estatístico de energia elétrica*. Consumo médio residencial por região e Unidade de Federação (Kwh).

_____. *Anuário estatístico de energia elétrica*. (2012). Tarifas Médias por Região (R\$/MWh).

_____. *Anuário estatístico de energia elétrica*. (2018). Tarifas Médias por Região (R\$/MWh).

Food And Agriculture Organization - FAO. *Aumentam as emissões de gases com efeito estufa provenientes da agricultura*. Roma. Recuperado em 22 março, 2018, de <http://www.fao.org/news/story/pt/item/224454/icode>.

Fonseca, F. S. T., Araújo, A. R. A., & Hendges, T. L. (2009). Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade Suinícola na Cidade de Balsas - MA: um estudo de caso. In: *Anais do 47º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*, Porto Alegre, RS.

Gueri, M. V. D., Schirmer, W. N., Buratto, & W. G., Ribeiro, C. B. (2015). Sustentabilidade rural: o uso do biogás como alternativa energética para os produtores de leite. *Revista Gestão Sustentável e Ambiental*, 4(1) 288-301. Doi: 10.19177/rgsa.v4e02015288-301.

Guimarães Júnior, R. G., Pereira, L. G. R., Tomich, T. R., & Gonçalves, L. C. (2016). Informações gerais. *Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia*, n. 80.

- Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística - IBGE. (2018). *Pesquisa trimestral do leite*. Séries Históricas. Rio de Janeiro. Recuperado em 31 julho, 2018, de <https://www.ibge.gov.br>.
- _____. (2018). *Puxado pela agricultura, PIB cresce 1% em 2017 e chega a 6,6 trilhões*. Rio de Janeiro. Recuperado em 31 julho, 2018, de <https://www.ibge.gov.br>.
- _____. (2018). *PPM: Rebanho bovino alcança a marca recorde de 215,2 milhões de cabeças, mas produção de leite cai 0,4%*. Rio de Janeiro. Recuperado em 18 novembro, 2018, de <https://www.ibge.gov.br>.
- Instituto De Economia Agrícola - IEA. (2018). *Preços médios mensais pagos pela agricultura*. São Paulo, 2018. Recuperado em 30 junho, 2018, de <http://ciagri.iea.sp.gov.br>.
- Instituto De Pesquisa Ambiental Da Amazônia - IPAM. (2015). *Quais são as principais fontes de gases de efeito estufa decorrentes das atividades humanas*. Belém. Recuperado em 15 abril, 2019, de <https://ipam.org.br>.
- Junqueira, S. L. C. D. (2014). *Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na Fazenda Aterrado*. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Koryś K. A., Latawiec A. E., Grotkiewicz K., & Kuboń, M. (2019). The review of biomass potential for agricultural biogas production in Poland. *Sustainability*, 11(22): 6515. Doi: doi.org/10.3390/su11226515.
- Kunz, A., & Oliveira, P. A. V. (2006). Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. *Revista de Política Agrícola*, 15(3), 28-35.
- Macedo, M. C. M. (2009). Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38(1), 133-146. Doi: [10.1590/S1516-35982009001300015](https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300015).
- Marçal, R. (2012). *Avaliação da permeabilidade em geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD)*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP.
- Martha Júnior, G. B., Alves, E., & Contini, E. (2011). Dimensão econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(10), 1117-1126. Doi: [10.1590/S0100-204X2011001000002](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000002).
- Matos, C. F., Paes, J. L., Pinheiro, E. F. M., & Campos, D. V. B. (2017). Biogas production from dairy cattle manure, under organic and conventional production systems. *Eng. Agríc.*, 37(6), 1081-1090. Doi: [10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n6p1081-1090/2017](https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n6p1081-1090/2017).
- Ministério Da Indústria, Comércio Exterior E Serviços - MIDC. (2017). *Comex Vis*. Brasília. Recuperado em 21 março, 2018, de <http://www.mdic.gov.br>.
- Miranda, A. P., Lucas Junior, J., Thomaz, M. C., Pereira, G. T., & Fukayama, E. H. (2012). Anaerobic biodigestion of pigs feces in the initial, growing and finishing stages fed with diets formulated with corn or sorghum. *Eng. Agríc.*, 32(1), 47-59. Doi: [10.1590/S0100-69162012000100006](https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100006).
- Moraes, A., Carvalho, P. C. F., Anghinoni, I., Lustosa, S. B. C., Costa, S. E. V. G. A. C., & Kunrath, T. R. (2014). Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. *European Journal of Agronomy*. 57(1), 4-9. Doi: [10.1016/j.eja.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004).
- Nogueira, L. A. (1986). *Biodigestores: A Alternativa Energética*. São Paulo: Nobel.
- Oliveira, P. A. V. (2005). Projeto de biodigestor e estimativa da produção de biogás em sistemas de produção. *Comunicado Técnico*, 416, 1-6.
- Pooja, G., Goldy, S., Shivali, S., Lakhveer, S., & Virendra, K. V. (2020). Biogas production from waste: technical overview, progress, and challenges. In: Lakhveer S., Abu, Y., & Durga M. M. (Ed.), *Bioreactors* (pp.89-104). Elsevier. Doi: [10.1016/B978-0-12-821264-6.00007-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00007-3).
- Ribeiro, D. S. (2011) Determinação das Dimensões de um Biodigestor em Função da Proporção Gás/Fase Líquida. *Revista Holos*, 27(1), 49-56.
- Sá, J. M., Urquiaga, S., Jantalia, C. P., Soares, L. H. B., Alves, B. J. R., Boddey, R. M., Marchão, R. L., & Vilela, L. (2013). Balanço energético da produção de grãos, carne e biocombustíveis em sistemas especializados e mistos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48(10), 1323-1331. Doi: [10.1590/S0100-204X2013001000003](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001000003).
- Salomon, K. R., & Lora, E. E. S. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33(1), 1101-1107. Doi: [10.1016/j.biombioe.2009.03.001](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001).
- Schroeder, J. T., Schroeder, I., Costa, R. P., & Shinoda, C. (2005). O custo de capital como taxa mínima de atratividade na avaliação de projetos de investimentos. *Revista Gestão Industrial*, 1(2), 33-42. Doi: [10.3895/S1808-04482005000200003](https://doi.org/10.3895/S1808-04482005000200003).
- Sekaran, U., Lai, L., Ussiri, D. A. N., Kumar, S., & Clay, S. (2021). Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security - A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5: 100190. Doi: [10.1016/j.jafr.2021.100190](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100190).
- Wu, X. U., Wu, F., Tong, X., Wu, J., Sun, L., & Peng, X. (2015). Emery and greenhouse gas assessment of a sustainable, integrated agricultural model (SIAM) for plant, animal and biogas production: Analysis of the ecological

recycle of wastes. *Resources, Conservation and Recycling*,
96(1) 40-50. Doi: 10.1016/j.resconrec.2015.01.010.