

A viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás

RESUMO

Lucas da Paixão Alcântara
lucaspaixaalcantara@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-3288-7016>
Instituto Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.

Joachim Werner Zang
dr.zang2000@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8118-5526>
Instituto Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.

Warde Antonieta da Fonseca-Zang
warde@quimica-industrial.com
<https://orcid.org/0000-0003-2464-0777>
Instituto Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.

A adoção do biogás não é apenas financeiramente viável, mas também favorável ao meio ambiente como uma tecnologia que ajuda a reduzir as emissões de carbono. A população rural dos países em desenvolvimento precisa urgentemente de biogás para cozimento, iluminação e refrigeração, pois existe uma demanda por biogás nessas comunidades, que advém de uma deficiência energética. Através de uma revisão bibliográfica sistemática, utilizando a base de dados Periódicos CAPES, e por meio da comparação entre os diferentes modelos de digestor existentes, analisando parâmetros financeiros, socioeconômicos e as causas de insucesso da implantação dessas tecnologias, o digestor modelo Tubular se destaca pelos baixos custos e pela facilidade de construção e operação. A elaboração de um projeto com as diretrizes necessárias para construção e operação de um digestor Tubular, aliado ao incentivo de políticas públicas governamentais, são fatores que vão impulsionar a adoção e ampliação de tecnologias renováveis no Brasil. Para a produção de biogás em larga escala destaca-se o modelo CSTR, abreviado do inglês Continuous Stirred Tank Reactor, um reator de tanque de fluxo contínuo com agitação, devido aos resultados positivos dos parâmetros determinísticos como o Valor Presente Líquido de R\$ 1.888.166,24 e Payback de aproximadamente 3,2 anos. A análise estatística da probabilidade de sucesso da implantação deste tipo de tecnologia reforça ainda mais a possibilidade de ampliação da geração de energia através de fontes alternativas não fósseis. Portanto, a utilização de biodigestores para a produção energética através da queima do biogás é uma grande oportunidade para a diversificação da matriz energética do país.

PALAVRAS-CHAVE: biogás, biodigestor, energia, viabilidade.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por energia e o aumento da geração de resíduos trouxeram a necessidade da implantação do conceito de sustentabilidade, tanto nos processos de produção energética quanto no gerenciamento de resíduos. Atualmente cerca de 80% da energia gerada no mundo é oriunda de combustíveis fósseis (IEA, 2016), conseqüentemente grandes quantidades de gases efeito estufa ainda são lançados na atmosfera e aos poucos os suprimentos primários não renováveis de energia, como petróleo e gás natural, se tornam escassos. Segundo Martí-Herrero et al. (2014) o biogás gerado através de resíduos terá um papel vital no futuro para compor a matriz energética mundial como alternativa aos combustíveis fósseis, Moura (2012) explica que isso se deve ao fato do biogás ser uma fonte renovável versátil, ou seja, pode ser usada para geração de energia, calor, ou como combustível de veículos substituindo o gás natural.

O biogás é uma mistura de gases rica em metano produzido por microrganismos a partir da matéria orgânica através da digestão anaeróbia que, segundo Chernicharo (2007), é um processo de mineralização da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio livre. O biogás é constituído principalmente por metano (CH_4 - 50 a 75%), dióxido de carbono (CO_2 - 25 a 45%) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), geralmente saturado em vapor d'água (H_2O) e com presença de traços de nitrogênio (N_2) e outros compostos (RISE-AT, 1998 apud PROBIO-GÁS, 2015).

Percebe-se uma tendência das pesquisas envolvendo biogás, geralmente são feitas através da coleta de dados experimentais gerados através da construção e operação de digestores de pequena escala, normalmente com volumes menores do que 20 m^3 (WAMWEA, 2017), pois digestores de pequena escala possuem menor exigência tecnológica, menor investimento para serem construídos e operados, e maior facilidade de construção, operação e manutenção. Tecnologias de larga escala são menos divulgadas por serem tratadas como “segredos industriais”, isso faz com que digestores de pequena escala sejam facilmente testados e estudados, produzindo grande quantidade de aprendizado e conhecimento.

Alguns países se destacam pelo estudo, desenvolvimento e aperfeiçoamento de biodigestores, como Bolívia, Brasil, China, Etiópia, Índia e diversos países da União Europeia (MARTÍ-HERRERO et al., 2014; MITTAL et al., 2018; DEGANUTTI et al., 2002; SCAR-LAT et al., 2018; KELEBE et al., 2017). Esses países têm em comum o incentivo à produção de biogás em escala rural e industrial, seja como incentivo fiscal, como criação de políticas públicas para promover o aumento do consumo da energia de fontes renováveis e de combustíveis “limpos”, ou como a delimitação de roteiros e medidas para auxiliar o desenvolvimento do panorama das energias renováveis.

Devido ao acesso limitado a serviços modernos de energia, populações rurais dependem em grande parte de combustíveis de baixa qualidade (GOSENS et al., 2013). Segundo Ali et al. (2013) a população rural dos países em desenvolvimento precisa urgentemente de biogás para cozimento, iluminação e aquecimento. A adoção do biogás não é apenas financeiramente viável, mas também favorável ao meio ambiente, como uma tecnologia que ajuda a reduzir as emissões de gases efeito estufa (ABBAS et al., 2017). Portanto, existe uma demanda por biogás nessas

comunidades, que advém de uma deficiência energética de origem rural. Além disso, os pesquisadores sinalizam a necessidade e importância da difusão de fontes alternativas de energia.

Baseando-se nessa crescente demanda por biogás, aliada a necessidade de difusão das fontes alternativas de energia, esse trabalho tem por objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre os biodigestores de baixo custo para produção de biogás em áreas rurais, a fim de determinar qual a melhor tipo de digestor para produção de biogás em escala rural no Brasil, bem como elaborar uma cartilha com as diretrizes necessárias para construção, operação e manutenção de um projeto de biodigestor de pequena escala para famílias rurais no Brasil e delimitar as barreiras para o sucesso de projetos de biodigestores rurais.

Devido à importância estratégica dos biodigestores de larga escala na sua consolidação quanto matriz energética alternativa, em substituição as fontes convencionais como derivados de petróleo, hidro e termoelétricas, esse trabalho traz uma análise da viabilidade dos modelos de digestores para produção de energia através da queima do biogás, bem como um modelo para estimar a variação dos parâmetros dessas tecnologias em função da ampliação de suas escalas.

METODOLOGIA

2.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica é realizada a partir de uma busca sistemática por artigos publicados a partir de 2013 no banco de dados do portal de periódicos da CAPES/MEC, que abrange as seguintes bases de conhecimento: Scopus, Springer, Science Direct e Directory of Open Access Journals (DOAJ). O processo consiste em um conjunto de buscas usando palavras chaves diretamente relacionadas com o tema proposto, seguido da seleção de textos cujo conteúdo realmente pertencem ao universo de informações sobre o tema. Os artigos fora do escopo foram manualmente selecionados e retirados.

Os artigos de Guendouz et al., (2010) e Mattos e Farias Júnior (2011), foram utilizados para complementar a base de dados, devido a sua importância regional ou para suprir eventual falta de dados. Os artigos considerados relevantes para o presente estudo foram utilizados para levantar as informações sobre os diferentes tipos de digestores e, em seguida, organizados de acordo com sua escala de projeto.

2.2 Comparação de Dados

Utilizando as referências encontradas no item 2.1, levantou-se os parâmetros iniciais para cada modelo de digestor. Os parâmetros iniciais foram estabelecidos utilizando critérios de recorrência, conveniência, necessidade e importância, baseando-se no levantamento feito por QU et al. (2013). Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros iniciais adotados bem como o entendimento acerca de cada um deles.

Tabela 1 – Parâmetros iniciais adotados

Parâmetro Inicial	Descrição
Investimento Inicial	Desembolso em dinheiro feito na data de início do investimento que cobre todos materiais e a instalação de um determinado modelo de digestor;
Produtividade Média ²	Quantidade em metros cúbicos de biogás produzida ao final de 24 horas de operação de um determinado modelo de digestor;
Demanda de Biomassa Seca	Quantidade em metros cúbicos de biomassa seca por dia, necessária para manter constante a produtividade média de biogás de um determinado modelo de digestor;
Demanda de Água	Quantidade em metros cúbicos de água por dia, necessária para manter constante a produtividade média de biogás de um determinado modelo de digestor;
Vida Útil ¹	Duração estimada da longevidade de determinado modelo de digestor;
Volume	Volume total de determinado modelo de digestor;
Tipo de Biomassa	Tipo de biomassa inserida em determinado modelo de digestor diariamente, para manter constante a produtividade média;
Complexidade de Construção	Grau de dificuldade para se construir determinado modelo de digestor;
Complexidade de Operação	Grau de dificuldade para se operar e dar manutenção a determinado modelo de digestor.

¹Para efeitos de cálculo, considera-se que ao término da vida útil o modelo de digestor é considerado inutilizado, ou seja, extingue-se a capacidade de produção biogás. Além disso, os equipamentos e materiais que os constituem, não tem nenhum valor monetário residual;

²A quantidade que atende o requerimento diário de uma família varia de 0,35 até 0,6 m³ (WAHYUNI et al., 2018; WAMEA, 2017).

Em seguida os parâmetros iniciais são comparados entre os diferentes tipos de digestores. Dados muito discrepantes da realidade ou com baixo grau de confiabilidade foram eliminados a fim de impedir a propagação de erros intrínsecos (MINGOTI et al., 2014).

2.3 Conversão Monetária

Devido ao fato de que os artigos utilizados como referência foram produzidos em diferentes países, portanto utilizando moedas locais variadas em suas publicações, faz-se necessário converter todos os valores encontrados para uma única moeda, para que os valores encontrados possam ser devidamente comparados. No presente estudo, as diferentes moedas são convertidas para Real, utilizando uma taxa de câmbio média (BACEN, 2018) referente ao ano em que o trabalho foi publicado.

2.4 Atualização Inflacionária de Valores

Os valores encontrados não podem ser equiparados antes de promovida a correção inflacionária (EPPS, 1963), conforme a equação (1.0), utilizando a inflação

mês a mês, desde a data da publicação do trabalho em periódicos até a presente data.

$$VC_{n+1} = VSC_n \times \left[1 + \left(\frac{\text{Inflação}_n}{100}\right)\right] \text{ Eq. (1.0);}$$

Em que:

VC_{n+1} : é o valor corrigido no mês “n + 1”;

VSC_n : é o valor sem correção no mês “n”;

Inflação_n : é a inflação referente ao mês “n” em porcentagem baseada no Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), produzido pelo Sistema Nacional de Índices e Preços ao Consumidor (SNIPC) com base em estabelecimentos comerciais e de prestações de serviços, em diferentes regiões metropolitanas do Brasil;

n: mês referente ao valor sem correção.

Este procedimento deve ser repetido quantos períodos forem a defasagem entre a data atual e a data de publicação do trabalho científico de onde é retirado a referência monetária, mês a mês.

2.5 Análise da Viabilidade Econômica

Com base nos dados levantados (Tabela 1), e a após aplicação da metodologia presente nos itens 2.3 e 2.4, realizou-se a análise da viabilidade econômica para os diferentes modelos de digestores, utilizando-se de parâmetros determinísticos conforme apresentado em sequência.

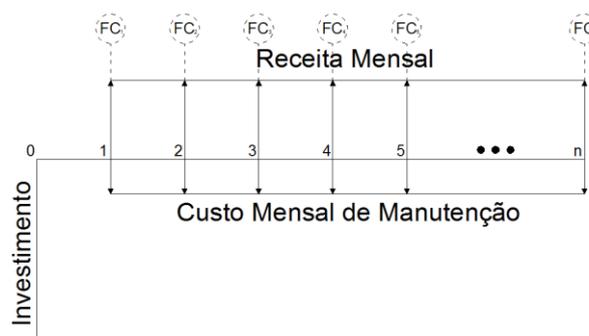
2.5.1 Valor Presente Líquido

O valor presente líquido (VPL) é a fórmula econômico-financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial, e pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado (SILVA e FONTES, 2005), de acordo com a equação (2.0).

$$VPL = -Invest + \frac{FC_1}{(1+i)} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \text{ Eq. (2.0);}$$

A Figura 1 mostra o esquema do fluxo de caixa padrão adotado para determinar o valor presente líquido (VPL).

Figura 1 – Esquema de fluxo de cálculo baseado na equação (2.0)



Em que:

VPL: Valor presente líquido do fluxo de caixa referente a um modelo de digestor;

Invest: Investimento inicial necessário para a construção de um modelo de digestor;

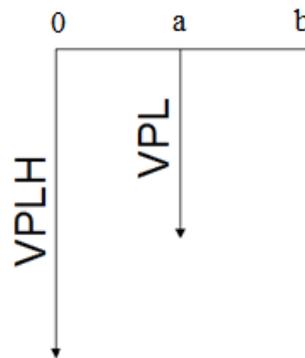
FC_n : Fluxo de caixa em um determinado mês "n";

i: Taxa de rendimento de um investimento.

Eventualmente, quando a vida útil dos digestores comparados forem diferentes, será necessário equiparar os fluxos de caixa, calculando o VPL para horizontes equivalente de projeto, ou seja, fazer com que os fluxos de caixas tenham o mesmo número de períodos, sempre relativo ao maior período dentre eles, de acordo com a equação (3.0) (SILVA e FONTES, 2005).

$$VPLH = VPL + \frac{VPL}{(1+i)^{b-a}} \text{ Eq. (3.0);}$$

Figura 2 – Cálculo da Valor Presente Líquido para horizontes iguais de projetos



Em que:

VPLH: Valor presente líquido para horizontes iguais de projeto do fluxo de caixa referente a um modelo de digestor;

VPL: Valor presente líquido do fluxo de caixa referente a um modelo de digestor;

a: Menor vida útil de um modelo de digestor;

b: Maior vida útil de um modelo de digestor;

i: Taxa de rendimento de um investimento.

2.5.2 Custo de Manutenção

O custo de manutenção e operação anual para cada modelo de digestor foi estimado com base nas referências obtidas através da revisão bibliográfica, sendo que, para modelos de pequena escala foi definido em 10% (dez por cento) do valor do investimento inicial (YORK et al., 2016). Todavia, esse valor não reflete com fidelidade os custos de manutenção e operação para diferentes escalas de biodigestores.

Logicamente, quanto maior for a escala, maiores e mais numerosos são os equipamentos. Grandes projetos de biodigestores demandam maiores

investimentos iniciais, o que faz com que os investidores queiram ter maior controle sobre as variáveis, anexando diversas tecnologias para este fim, o que encarece o custo da manutenção. Além disso, nas grandes plantas de biogás, deve-se evitar ao máximo o efeito corrosivo do H₂S produzido, implantando filtros de limalha de ferro, ou outra tecnologia que faça a extração do enxofre de modo eficiente QIAN et al. (2016). Por isso, deve ser considerado um custo de manutenção e operação diferenciado nesses casos, incluindo também a mão de obra necessária para execução desses serviços.

Martins e De Oliveira (2011) consideram que o custo de manutenção e operação anual para um digester de 496 m³ é de aproximadamente 25% (vinte e cinco por cento) do valor do investimento inicial, valor compatível com esse tipo de escala e definido neste trabalho para os digestores de larga escala.

2.5.3 Receita Mensal

Para os digestores de pequena escala a receita mensal foi considerada como sendo a quantia em dinheiro que se deixa de gastar com a compra de botijões de gás, substituindo-o pelo biogás produzido.

Com relação aos digestores de larga escala, a composição da receita mensal foi feita sobre o ganho com energia elétrica excedente produzida, o ganho com a venda de biofertilizante e o ganho com a venda de créditos de carbono. Além disso, como será visto adiante, pode-se considerar o pagamento de juros nas contas como uma receita negativa.

2.5.4 Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa mensal de um investimento representa o retorno financeiro mês a mês de determinado projeto, no caso para cada modelo de digester. Para determiná-lo devem-se considerar as entradas (ganhos financeiros) e as saídas (custos) conforme a equação (4.0).

$$FC_n = Receita_{Mensal} - Custo_{Mensal} \text{ Eq. (4.0);}$$

Em que:

FC_n : Fluxo de Caixa em um determinado mês "n";

$Receita_{Mensal}$: Somatório das entradas mensais em determinado fluxo de caixa;

$Custo_{Mensal}$: Despesas mensais com de determinado modelo de biodigester em reais.

Para os digestores de pequena escala, temos as equações (5.0) e (6.0).

$$Receita_{Mensal} = D \text{ Eq. (5.0);}$$

$$Custo_{Mensal} = MO \text{ Eq. (6.0);}$$

Em que:

D : Quantia em dinheiro que se deixa de gastar com a compra de botijões de gás em reais.

MO: Valor mensal gasto com a manutenção e operação de determinado modelo de digestor em reais;

Em contrapartida, para os digestores de larga escala, temos as equações (7.0) e (8.0).

$$Receita_{Mensal} = BF + E + CC \text{ Eq. (7.0);}$$

Em que:

BF: Valor mensal obtido com a venda de biofertilizante em reais;

E: Valor mensal obtido com a produção de energia excedente em reais;

CC: Valor mensal obtido com a comercialização de créditos de carbono em reais;

$$Custo_{Mensal} = MO + J \text{ Eq. (8.0);}$$

Em que:

MO: Valor mensal gasto com a manutenção e operação de determinado modelo de digestor em reais;

J: Valor mensal gasto com o pagamento das parcelas de um empréstimo em reais.

2.5.5 Botijões de Gás

Considera-se que 0,55 m³/dia de biometano equivale ao consumo de 1 botijão de gás liquefeito de petróleo (GLP) de 13 kg por mês e que o preço do botijão deve ser obtido através de cotação com fornecedores locais.

Para os cálculos, foi considerado o menor preço obtido para o botijão de GLP 13kg sem a taxa de entrega, ou seja, R\$ 70,00.

2.5.6 Biofertilizantes

Diferentemente dos pequenos produtores rurais familiares, que em sua maioria acabam não transformando o produto secundário dos biodigestores, no caso o biofertilizante, em renda extra, os investidores de outras escalas financeiras optam pela venda deste subproduto o que alivia ainda mais o fluxo de caixa. Quanto maior a escala do biodigestor, maior a produção de biofertilizante, por isso a atração dos investidores com esse tipo de negócio já que, ao contrário dos pequenos produtores rurais, acabam gerando grandes quantidades desse produto. Portanto é de grande valia a consideração do lucro com a venda dos biofertilizantes na análise de viabilidade econômica.

Cervi (2009) analisou amostras de biofertilizantes produzidos por um biodigestor Tubular, as quais apresentaram concentrações de macronutrientes iguais a: Nitrogênio (0,91 g.L⁻¹), Fósforo (0,33 g.L⁻¹), Potássio (0,30 g.L⁻¹). Assim, estima-se o benefício com a produção de biofertilizante em função dos preços médios dos nutrientes praticados pelo mercado de janeiro de 2018 até março de 2019 (Tabela 2).

Tabela 2 – Benefício gerado com a aplicação de biofertilizante

Insumo	Concentração (%)	Preço do Fertilizante (R\$.t ⁻¹) ¹	Total (R\$.t ⁻¹)
Ureia (45% N)	59,09	2.045,18	1.208,49
Superfosfato Simples (20% P ₂ O ₅)	21,43	1.345,78	288,40
Cloreto de Potássio (60% K ₂ O)	19,48	2.058,53	401,00
Total			1.897,90

¹DADOS DO INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, 2019.

Fonte: CERVI (2009).

2.5.7 Geração de Energia Elétrica

Reatores em larga escala, na grande maioria dos artigos pesquisados, trabalham em parceria com a geração de energia, devido à grande quantidade de biogás produzido e pelo fato de que esse tipo de empreendimento envolve grandes quantias de investimento, portanto, do ponto de vista do investidor, todas as possibilidades de ganho financeiro devem ser exploradas até o seu esgotamento. Para isso, são implantados os motogeradores a biogás e as plantas dos digestores são adaptadas para atender as especificações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Figura 3 contém um exemplo de motogerador a biogás disponível na internet que vem sendo utilizado em vários países, em um total de 560 sistemas de geração de energia, fornecendo cerca de 2,8 milhões de megawatts-hora de eletricidade por ano, o suficiente para atender a demanda de 800.000 domicílios europeus.

Figura 3 – Foto do motogerador a biogás modelo Jenbacher



Fonte: General Electric (2019).

Segundo Muniz et al. (2017) a exploração do potencial energético em biodigestores de média e larga escala impacta diretamente na viabilidade econômica de implantação dos mesmos, diminuindo o payback desse tipo de investimento, ao passo que as receitas mensais com a venda da energia elétrica para as concessionárias são adicionadas aos cálculos. Ainda segundo este autor, é necessário levar em conta que o gerador de energia não opera a 100%. Segundo Melo et al. (2015) a eficiência desse processo se aproxima de 60% da quantidade de metano produzido. Além disso, 1 m³ de biogás produz em média 5,81 kWh de energia elétrica.

A Tabela 3 demonstra os preços médios das tarifas de energia elétrica trabalhadas em 2019 por região do país.

Tabela 3 – Tarifas médias de fornecimento de energia por região praticadas em 2019

Classe de Consumo	Centro Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Industrial	R\$ 416,76 ¹	R\$ 416,44	R\$ 520,11	R\$ 474,28	R\$ 464,69

¹Valores em R\$ por MWh de consumo

Fonte: ANEEL (2019).

Deve-se considerar também o consumo específico de biogás pelo grupo gerador, aproximadamente 22 m³ por hora (CERVI et al., 2010), relação entre o volume de biogás consumido pelo grupo gerador e a energia elétrica por ele produzida, valor fornecido pelo fabricante. Dessa maneira, a estimativa do consumo anual de biogás pelo conjunto motor-gerador é feita pela equação (9.0):

$$C_{AB} = C_{EB} \times T \text{ Eq. (9.0);}$$

Em que:

C_{AB} : Consumo anual de biogás em m³ por ano;

C_{EB} : Consumo específico de biogás pelo conjunto motor-gerador em m³ por hora;

T : Disponibilidade anual da planta em horas por ano.

O biogás produzido é utilizado diretamente no sistema de conversão de energia elétrica, que é utilizado 10,5 horas por dia, em média. Estima-se a produção em um período de 26 dias por mês ou 312 horas por ano, equivalente a 3.276 horas de operação por ano.

2.5.8 Créditos de Carbono

Segundo o protocolo de Kyoto de dezembro de 1997, os gases de efeito estufa (GEE), foram classificados conforme seu potencial de gases do efeito estufa (PGEE) e, de acordo com a nomenclatura, o Metano (CH₄) possui PGEE = 21 e o Dióxido de Carbono (CO₂) possui PGEE = 1 (MIRANDA et al., 2018). Sendo assim durante a conversão do CH₄ para CO₂ no motogerador ocorre uma redução de 20 vezes no potencial de gases do efeito estufa do metano, o que resulta em 20 créditos carbono (CC) (MIRANDA et al., 2018). Oliveira (2019) afirma que as negociações atuais de preço de crédito de carbono têm um valor médio de US\$10.00 por tonelada e podem ser calculados utilizando a equação (10.0):

$$CC = \frac{PGEE \times V_{gás} \times Dens_{gás}}{1000} \text{ Eq. (10.0);}$$

Em que:

CC : Créditos de Carbono;

$PGEE$: Potencial de gases do efeito estufa;

$V_{gás}$: Volume anual de gás metano em m³;

$Dens_{gás}$: Densidade do gás metano (0,656 kg/m³).

Algumas linhas de pensamentos defendem a ideia de que os créditos de carbono acabam favorecendo mais ao mercado do que ao ambiente, e outras defendem a ideia de que, os mesmos, são certificados que autorizam aos países desenvolvidos o direito de poluir. No entanto, cada país tem uma cota máxima de créditos de carbono que pode comprar para cumprir as metas do Protocolo de Kyoto, portanto, o assim chamado "direito de poluir" é limitado. Do ponto de vista do investidor, além de influenciar positivamente no fluxo de caixa do investimento, o comércio de créditos de carbono serve como uma ferramenta de marketing pelas empresas que acaba melhorando sua imagem perante a sociedade. Portanto, apesar do benefício proporcionado ao meio ambiente ser discutível, a venda dos créditos de carbono, ainda sim é um ponto positivo na produção do biogás e que merece ser explorado do ponto de vista econômico.

2.5.9 Empréstimo

Com relação a possibilidade de empréstimo serão considerados dois cenários, sendo o primeiro a situação onde cem por cento do valor investido inicialmente no projeto de digestor é obtido através de financiamento. Já no segundo cenário o investidor dispõe de toda quantia necessária para investir inicialmente e não opta pelo empréstimo.

Assim, na consideração em que todo o valor do investimento inicial é obtido através de empréstimo, calcula-se o pagamento de juros mensais utilizando o método da tabela Price com regime de juros compostos em que as parcelas mensais são sempre iguais até o pagamento total da dívida, conforme a equação (11.0):

$$Parcela_{Mensal} = PV * \frac{j}{1-(1+j)^{-n}} \text{ Eq. (11.0);}$$

Em que:

$Parcela_{Mensal}$: Valor da parcela paga mensalmente em função do empréstimo em reais;

PV : Valor presente do empréstimo em reais;

j : Taxa de juros de em porcentagem ao mês;

n : Número de períodos em meses.

2.5.10 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR), pode ser definida como a taxa de desconto que faz com que o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto seja igual a zero. Ou seja, a Taxa Interna de Retorno é uma métrica usada para avaliar qual o percentual de retorno de um projeto para determinado investidor.

Essa taxa é comparada à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) para que se decida se o projeto deve ou não ser aceito. Se a TIR for maior que a TMA, significa que o investimento é viável. Em geral, os investidores darão preferência aos projetos que possuem a maior diferença entre a taxa requerida e a taxa interna de retorno.

Segundo Damaceno et al. (2017) a TMA depende diretamente da vida útil dos projetos e deve levar em conta o custo de capital investido, risco e o lucro esperado pelos investidores (KUMARAN et al., 2016). Para o cálculo da TIR utiliza-se a equação (12.0) descrita por Casaroto e Kopotike (2008):

$$0 = \sum_{n=0}^t \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} \text{ Eq. (12.0);}$$

Em que:

FC_n : Fluxo de Caixa em um determinado mês “n”;

TIR: Taxa Interna de Retorno de determinado investimento.

2.5.11 Payback

O payback, tempo em anos o qual o somatório das receitas ultrapassa o valor do investimento inicial, é calculado através da equação (13.0) (BLANK e TARQUIN, 2008).

$$\text{Payback} = \frac{\text{Invest}}{(\text{Total Mensal} \times 12)} \text{ Eq. (13.0);}$$

Em que:

Invest: Investimento inicial para construção de um modelo de digestor;

Total Mensal: Quantia recebida por mês com a implantação de um determinado modelo de digestor.

2.6 Investimento Equivalente

Para a análise da viabilidade econômica dos diferentes modelos de biodigestor é necessário determinar uma taxa de rendimento, variável (*i*) presente nas equações anteriores, para cada projeto. Essa taxa de rendimento, por sua vez, deve equivaler a uma taxa real utilizada no mercado de investimentos futuros que se assemelhe as características dos projetos de biodigestor.

As taxas de rendimento devem possuir a mesma anuidade do fluxo de caixa, portanto precisam ser mensais como observado no item 2.5.4. Para a conversão das taxas utilizou-se a equação (14.0).

$$\text{Rendimento}_{a.m.} = \left(\sqrt[12]{1 + \text{Rendimento}_{a.a.}} \right) - 1 \text{ Eq. (14.0);}$$

Em que:

$\text{Rendimento}_{a.m.}$: Rendimento convertido em porcentagem ao mês;

$\text{Rendimento}_{a.a.}$: Rendimento esperado conforme o investimento equivalente em porcentagem ao ano.

No presente estudo, definiu-se que, para os digestores de pequena escala, o rendimento equivalente é um investimento de renda fixa, com certificado de depósito bancário (CDB), de resgate financeiro após 10 (dez) anos. Isso equivale a uma taxa (*i*) de 11,28% ao ano (a.a), ou 0,8946% ao mês (TORO, 2018).

O volume do biodigestor construído influencia diretamente no custo do investimento inicial, a exemplo de Cervi et al. (2010), que procede com a análise

de viabilidade econômica da utilização de biogás produzido em um digestor Tubular de volume igual a 496 m³, onde o custo de sua implantação chega a R\$ 51.537,17. Primeiramente, o volume estudado por Cervi et al. (2010) é considerado por QIAN et al. (2016) como sendo de larga escala. Sabendo disso, fica claro que as nuances envolvendo os digestores de grande volume serão mais complexas e devem se diferenciar em muito dos digestores de pequena escala.

Portanto, com relação aos digestores de larga escala, o rendimento equivalente foi determinado de forma análoga, porém, considerando investimentos mais robustos, ou seja, que demandassem maiores aportes e ainda considerando a existência ou não do pagamento da taxa de juros, com base nas políticas públicas relativas a implementação de fontes renováveis.

2.6.1 Políticas Públicas

A crise mundial do petróleo da década de 70 incentivou a valorização de outras fontes energia e, nesse contexto, o Brasil mostrava-se extremamente dependente (KARLSSON et al., 2014), já que 80% do óleo bruto consumido no país era de fonte externa. Segundo Karlsson et al. (2014) as consequências foram imediatas em países importadores, culminando na procura por outras fontes de energia. Descobriu-se a presença de petróleo na Bacia de Campos (Rio de Janeiro) e em 1976 iniciou-se sua exploração. Posteriormente foi implantado o Proálcool e, conseqüentemente, estimulou-se a produção de álcool e deu espaço para outros biocombustíveis, dentre eles o biogás.

Em 1997 surgiu o Projeto de Difusão do Biogás da Empresa Brasileira de Tecnologia e Extensão Rural (EMATER), que não atingiu seus objetivos sob a alegação de falta de conhecimento técnico sobre a construção e operação de biodigestores, alto custo de implantação e manutenção, falta de equipamentos e baixa durabilidade dos equipamentos adaptados para conversão de biogás em energia, ausência de condensadores para água e de filtros para os gases corrosivos gerados no processo, fora a disponibilidade e baixo custo da energia elétrica e do gás liquefeito de petróleo (GLP) (ANDRADE et al., 2002). Segundo Karlsson et al. (2014) o sistema político à época também não favoreceu a implantação dos biodigestores, já que o modelo de governo definia os investimentos de acordo com os acontecimentos da crise, o que culminou na desativação de todos os programas que buscavam fontes alternativas de energia vigentes na década de 80.

O interesse pelo biogás voltou a ganhar força nos anos 90 sob a possibilidade de geração de uma energia que pudesse dar suporte à matriz energética, quando eventual aumento no preço do petróleo acontecesse (BARBELI, 1998). Além disso, existia uma preocupação com as questões ambientais e foi nessa época que o país, dentre muitos outros, assinou o Protocolo de Kyoto, que continha uma série de medidas para a diminuição de gases efeito estufa em escala global. Em 2002 foi implantado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROIFA), conforme a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, para aumentar a geração de energia elétrica a partir de fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), o que rendeu ao país a Certificação de Redução de Emissão de Carbono (KARLSSON et al., 2014).

Depois da pane na distribuição de energia vivenciada em 2009, devido a um problema ocorrido na hidrelétrica de Itaipu, a Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL) instituiu a Geração Distribuída de Energia, incorporando a energia de outras fontes não hidroelétricas nas redes de distribuição de energia. Com isso, o biogás gerado nas propriedades rurais poderia ser convertido em energia elétrica por meio de geradores e ser inserido nas redes de distribuição (ZILOTTI, 2012).

Recentemente foi instituído o Plano Safra da Agricultura Familiar (Pronaf) 2017/2020, que é um conjunto de ações para o fortalecimento da agricultura familiar, dentre elas o oferecimento de segurança jurídica da terra, com titulação e regularização fundiária, seguro da produção, ações para o Semiárido e Assistência Técnica e Extensão Rural (CORCIOLI e de SIQUEIRA, 2016). Esse plano ainda conta com a disponibilização de linhas de crédito, conforme a Tabela 4, para auxiliar atividades que agreguem renda à produção e aos serviços desenvolvidos pelos beneficiários do Pronaf, como a implantação de biodigestores para produção de biogás.

Dentre as linhas de crédito disponibilizadas pelo Pronaf, as elencadas na Tabela 4, são aquelas passíveis de serem utilizadas para investimentos em biodigestores para produção de biogás. Percebe-se que existem diferentes vultos financeiros para cada linha de crédito, bem como diferentes taxas de juros aos aderidos. Isso acontece devido aos diversos perfis dos investidores, que vão desde empreendimentos individuais feitos por famílias de baixa renda até grandes cooperativas com enorme poder de crédito.

Tabela 4 – Linhas de crédito para produtores rurais

Linha de Crédito Pronaf	Finalidade do Investimento	Condições	Juros
Agroindústria	Atividades que agreguem renda à produção e aos serviços desenvolvidos pelos beneficiários.	Individual até R\$ 165 mil; Empreendimentos familiares rurais até R\$ 330 mil; Cooperativas acima de R\$ 1 milhão até R\$ 35 milhões com limite de R\$ 45 mil, por associado ativo.	5,5% a.a.
Produtivo Orientado de Investimento	Crédito rural com Ater ¹ para inovação tecnológica, sistemas agroflorestais, convivência com o bioma, sistema de base agroecológica ou orgânica.	De R\$ 18 mil até R \$40 mil, com Ater ¹ remunerada de R\$ 3,3 mil ou R\$ 4,5 mil (região Norte) por família, divididos em 3 parcelas, durante 3 anos.	4,5% a.a.
Eco	Investimento para aproveitamento hidroenergético, tecnologia de energia renovável, tecnologias ambientais, projetos de adequação ambiental, adequação ou regularização das unidades familiares à legislação ambiental, implantação de viveiros de mudas.	Até R\$ 165 mil.	2,5% a.a.

Microcrédito Produtivo Rural Grupo "B"	Com a metodologia do PNMPO ² .	Investimento de até R\$ 5 mil e bônus de adimplência de 25% para os primeiros R\$ 15 mil.	0,5% a.a.
Microcrédito Produtivo Rural Grupo "B"	Com a metodologia do PNMPO2 em municípios localizados no Semiárido na área de abrangência da Sudene – envolvendo projetos de convivência com o bioma.	Investimento de até R\$ 5 mil e bônus de adimplência de 40% para os primeiros R\$ 15 mil.	0,5% a.a.
Microcrédito Produtivo Rural Grupo "B"	Microcrédito rural sem a metodologia do PNMPO ² .	Investimento de até R\$ 2,5 mil e bônus de adimplência de 25% para os primeiros R\$ 7,5 mil.	0,5% a.a.

¹Ater – Assistência Técnica e Extensão Rural, serviço de informação e orientação técnica rural;

²PNMPO – Programa Nacional de Microcrédito Produtivo Orientado, conforme a Lei 11.110, de 25 de abril de 2005.

Fonte: Secretaria Especial de Agricultura Familiar e do Desenvolvimento Agrário (2017).

A existência de diferentes linhas de crédito demonstra que as oportunidades também são diversificadas e que dependem diretamente do vulto financeiro dos seus investidores, o que confirma a disparidade entre as escalas de digestores. Portanto, de forma análoga a metodologia utilizada para determinar um rendimento equivalente para os digestores de pequena escala, pode-se correlacionar o tipo de investimento presente nas linhas de crédito do Pronaf, com aqueles que sejam compatíveis, desde que respeitadas as nuances dos digestores de larga escala.

2.6.2 Digestores de Larga Escala

Cada linha de crédito do Pronaf possui um teto de investimento que, para efeito de cálculo, será considerado como valor disponível para uso de cada tipo de investidor. Ainda, deve-se considerar também as eventuais bonificações tratadas na Tabela 4, bem como a taxa de juros do empréstimo, para o cenário que considera que 100% do valor investido é obtido através do financiamento em uma das diversas linhas de crédito.

O rendimento de cada tipo de investimento deve equivaler a um investimento real, do mesmo modo que foi considerado para os digestores de pequena escala, porém compatível com o vulto econômico dos digestores de larga escala, ou seja, igual a um rendimento de um investimento de renda fixa, certificado de depósito bancário (CDB), de mesmo vulto e período de retorno financeiro, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Rendimento esperado para cada tipo de investimento

Linha de Crédito Pronaf	Tipo	Limite de Investimento	Juros	Rendimento de Investimento Equivalente ¹	Rendimento Esperado ³
-------------------------	------	------------------------	-------	---	----------------------------------

Agroindústria	Cooperativo	R\$ 35.000.000,00	5,50%	11,70%	6,20% ²
Eco	Individual	R\$ 165.000,00	2,50%	9,60%	7,10%
Produtivo Orientado de Investimento	Individual	R\$ 40.000,00	4,50%	9,22%	4,72%
Microcrédito Produtivo Rural Grupo "B"	Individual	R\$ 5.000,00	0,50%	9,05%	8,55%
Microcrédito Produtivo Rural Grupo "B"	Individual	R\$ 2.500,00	0,50%	8,98%	8,48%

¹Fonte: <https://www.xpi.com.br/investimentos>. Acesso: 05 de maio de 2019;

²Valores de rendimento ao ano (a.a.);

³Também chamado de taxa mínima de atratividade (TMA).

2.7 Análise Gráfica

Os dados obtidos para os diferentes modelos de biodigestores, podem ser utilizados para estimar a variação dos parâmetros em função do crescimento da escala dos biodigestores com auxílio da equação de regressão quadrática (equação 15.0), de forma análoga a Cancelier et al. (2015), comparando os parâmetros em pares, onde os valores obtidos são convertidos em coordenadas (X,Y) de um plano cartesiano a fim de determinar os coeficientes a, b e c de uma equação polinomial do segundo grau:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \epsilon \text{ Eq. (15.0);}$$

Em que:

y_i : Valores observados das variáveis dependentes;

x_i : Valores das variáveis independentes;

β_0, β_1 e β_2 : Coeficientes a serem estimados para determinar uma função que represente aproximadamente um conjunto de pontos;

ϵ : Erros experimentais relacionados aos valores observados.

Para obtenção dos coeficientes " β_0, β_1 e β_2 ", tais que a equação (16.0) seja mínima, resolvida pela solução de mínimos quadrados da equação (17.0):

$$SQ = \sum_i [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2)]^2 \text{ Eq. (16.0);}$$

Ou seja:

$$\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1 \text{ e } \hat{\beta}_2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{dSQ}{d\beta_0} \\ \frac{dSQ}{d\beta_1} \\ \frac{dSQ}{d\beta_2} \end{array} \right. \text{ Eq. (17.0);}$$

Em que:

y_i : Valores observados das variáveis dependentes;

x_i : Valores das variáveis independentes;

β_0, β_1 e β_2 : Coeficientes a serem estimados para determinar uma função que represente aproximadamente um conjunto de pontos.

O coeficiente de determinação, também chamado de “ R^2 ”, é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão quadrática, em relação aos valores observados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. Cálculo da Soma Total dos Quadrados (SQ_{tot}), ou seja, a soma dos quadrados das diferenças entre a média e cada valor observado, conforme a equação (18.0):

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \text{ Eq. (18.0);}$$

Em que:

n : Número de parâmetros obtidos;

y_i : Valor real observado;

\bar{y} : Média dos valores observados.

Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQ_{res}), que calcula a parte que não é explicada pelo modelo, conforme a equação (19.0):

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \text{ Eq. (19.0);}$$

Em que:

y_i : Valor real observado;

\hat{y}_i : Valor estimado (previsão) de y_i .

Soma dos Quadrados Explicada (SQ_{exp}), indica a diferença entre a média das observações e o valor estimado para cada observação, e soma os respectivos quadrados (equação 20.0). Quanto menor for a diferença, maior poder explicativo detém o modelo.

$$SQ_{exp} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \text{ Eq. (20.0);}$$

Portanto:

$$SQ_{tot} = SQ_{exp} + SQ_{res} \text{ Eq. (21.0);}$$

E, normalizando a equação (20.0):

$$R^2 = \frac{SQ_{exp}}{SQ_{tot}} = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \text{ Eq. (22.0);}$$

2.8 Tomada de Decisão

A partir dos parâmetros obtidos nos itens 2.1 e 2.2 procede-se a tomada de decisão, primeiramente definindo quais modelos de digestores são considerados viáveis economicamente, para depois decidir qual será utilizado nas aplicações

deste trabalho. A Tabela 6 mostra os testes para aferir a viabilidade econômica dependendo da escala do projeto.

Tabela 6 – Critérios para aferir a viabilidade econômica dos modelos de digestores

Escala do Biodigestor	Critérios
Pequena	Produtividade média > 0,35 m ³
	Valor presente líquido (VPL) > 0
Larga	Valor presente líquido (VPL) > 0
	Taxa interna de retorno (TIR) > Taxa mínima de atratividade (TMA)

Dentre os modelos de digestores considerados viáveis economicamente, seleciona-se aquele considerado o mais vantajoso, ou seja, aquele que possivelmente tem maiores chances de sucesso, maior rentabilidade ou melhor aplicabilidade. Em termos técnicos será aquele que possuir maior VPL, maior TIR, menor investimento inicial, menor payback e/ou melhor correspondência com o perfil socioeconômico do investidor alvo. Para cada escala de projeto será definido um modelo de digestor mais vantajoso e a análise será feita separadamente para cada um deles.

2.8.1 Análise de Monte Carlo

Até então, as considerações feitas para o presente estudo baseiam-se em valores médios obtidos através da literatura. Esses valores não são constantes ao longo dos meses e podem ter grandes amplitudes de variação, tanto entre modelos de digestores diferentes quanto entre modelos iguais. Isso acontece, principalmente, devido a dependência de variáveis como a temperatura do ambiente e a composição química da biomassa, que afetam a produtividade dos digestores. Além disso, os preços de mercado variam muito a longo prazo, o que causa variações no o custo de manutenção, no preço de venda dos fertilizantes e principalmente na comercialização de energia excedente. Eventualmente há a necessidade de manutenções não programadas em função de problemas no digestor, principalmente nos filtros e devido a sensibilidade do substrato. Por último, os dados utilizados por outros autores estão sujeitos a imprecisões intrínsecas, como as de medições e aproximações, bem como a estimativas que não refletem a realidade dos fatos.

A aplicação do método de Monte Carlo para o modelo de digestor de larga escala mais vantajoso, auxilia na previsibilidade do investimento e determina a sua probabilidade de sucesso baseando-se em diversos cenários. Esses cenários, bem como suas probabilidades de acontecerem de fato, podem variar entre pessimistas, médias e otimistas, de forma análoga a Cancelier et al. (2015), que calcula os efeitos estatísticos das variáveis relacionadas a qualidade da biomassa.

O primeiro autor a ilustrar a aplicabilidade da Simulação de Monte Carlo à teoria financeira foi David Hertz em seu artigo Risk Analysis in Capital Investment, publicado em 1964. O método de simulação de Monte Carlo consiste em gerar

números aleatórios para cada variável que afeta o fluxo de caixa a partir de suas respectivas distribuições de probabilidades.

Estima-se, para cada variável que influencia o diagrama de fluxos de caixa do investimento, seu intervalo de variação possível. Daí é estabelecida uma distribuição de probabilidades correspondente que, em seguida, são transformadas em uma distribuição de probabilidades acumuladas, de acordo com a Tabela 7.

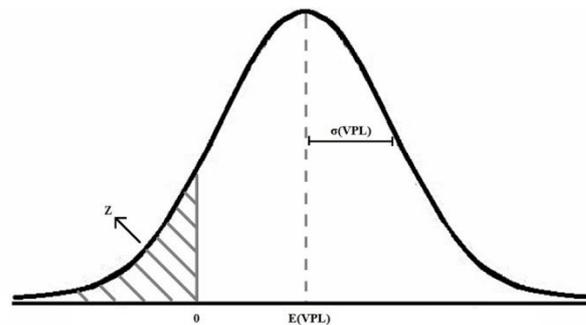
Tabela 7 – Probabilidade e distribuição acumulada relacionada a cada variável

Variável	Probabilidade	Dist. Acumulada
X1	P1	P1
X2	P2	P1+P2
X3	P3	P1+P2+P3
...
Xn	Pn	P1+P2+P3...+Pn

Deve-se selecionar, ao acaso, valores para cada variável, de acordo com as suas probabilidades de ocorrência, e então, calcular o valor presente líquido (VPL) ou taxa interna de retorno (TIR) ou qualquer outra medida de atratividade para o projeto, para cada combinação de valores obtida. Se houver dependência entre variáveis, esse fato deve ser considerado de forma a existir correspondência entre os valores selecionados. Efetua-se esta operação repetidas vezes, até obter uma distribuição de probabilidades do retorno do investimento.

Para o cálculo da probabilidade de o investimento ser inviável trabalha-se com a distribuição normal padronizada “z”, de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Distribuição normal padronizada



Sendo Z a probabilidade de o investimento ser inviável (CANCELIER et al., 2015):

$$Z = \frac{VPL - E(VPL)}{\sigma(VPL)} \text{ Eq. (23.0);}$$

$$P(VPL < 0) = P(Z < Z_{encontrado}) \text{ Eq. (24.0);}$$

Em que:

$E(VPL)$: Média dos valores de VPL encontrados;

$\sigma(VPL)$: Desvio padrão dos valores de VPL encontrados;

$P(VPL < 0)$: Probabilidade de o investimento ser inviável.

2.8.2 Análise de Sensibilidade

Propõe-se a análise de sensibilidade para o modelo de digestor de larga escala considerado mais vantajoso. O método consiste em variar um ou mais fatores que influenciam o fluxo de caixa de um projeto, mantendo os demais em seu nível de referência e então calcular o efeito na variável de decisão. Quando uma pequena variação em um parâmetro altera drasticamente a rentabilidade de um projeto, diz-se que ele é muito sensível a este parâmetro. Desta forma podemos determinar quais fatores são mais sensíveis (maior efeito) e, portanto, merecem maior atenção (TÔRRES, 2006).

Deve-se escolher um método determinístico, como VLP ou TIR, como medida de comparação, que por sua vez, será afetada se determinado parâmetro variar ao longo de um intervalo definido de valores. O procedimento utilizado para concretização da análise de sensibilidade foi descrito por Blank e Tarquin (2008) de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 – Procedimentos para realização da análise de sensibilidade

Etapa	Procedimentos
1ª	Determinar qual parâmetro de interesse poderia variar a partir do valor estimado mais provável (Ex.: vida útil, taxas, custos);
2ª	Selecionar o intervalo provável que incremente a variação correspondente a cada um dos parâmetros;
3ª	Escolher a medida do valor (Ex.: VPL, TIR, Payback, TMA);
4ª	Calcular os resultados para cada parâmetro, utilizando a medida do valor como base de cálculo;
5ª	Apresentar um gráfico do parâmetro em relação à medida do valor a fim de melhor interpretar a sensibilidade.

RESULTADOS

3.1 Tipos de Digestores

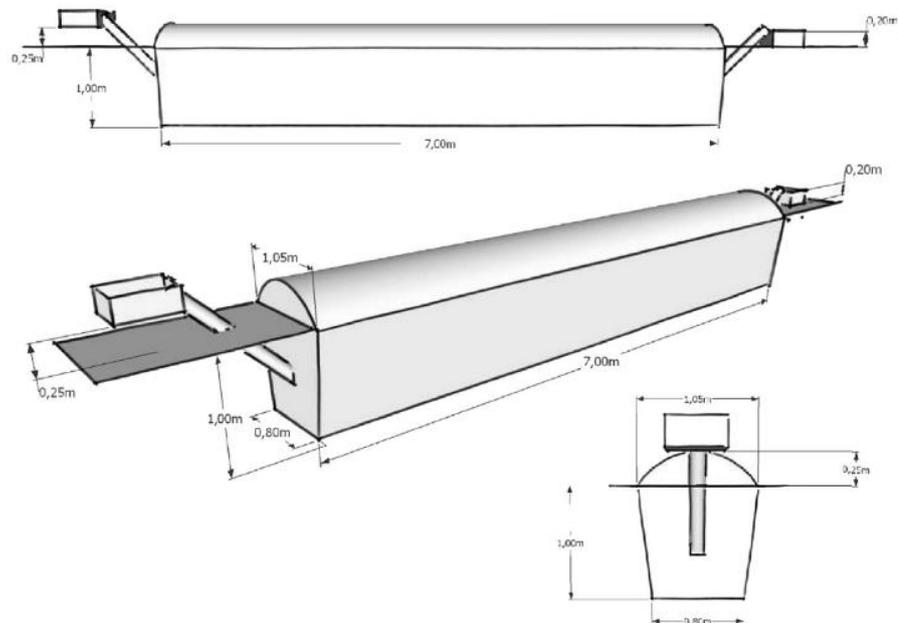
A literatura traz alguns modelos de digestor passíveis de serem utilizados, tanto para pequena quanto para larga escala, encontrados através da revisão bibliográfica sistemática. A seguir, são apresentados os modelos de digestores, bem como suas descrições entre outros aspectos relevantes.

3.1.1 Tubular

O digestor Tubular (Figura 5), também conhecido como bolsa flexível, foi construído por Botero e Preston (1987) como uma alternativa mais econômica para produção de biogás. Alguns países da América Latina, como México,

Nicarágua, Colômbia, Costa Rica, Peru e Bolívia, são locais onde esse tipo de tecnologia está sendo implementada (MARTÍ-HERRERO et al., 2014). Em comparação com outros digestores, em termos de materiais e mão de obra, este pode chegar a custar metade do que se gasta para implementar outros modelos. Segundo Herrero (2007) o transporte do material necessário para digestores tubulares é mais fácil e mais barato e podem ser carregados usando apenas um animal de carga, além disso, são uma tecnologia com grande potencial para transferência de conhecimento de agricultor para agricultor. Na maioria das vezes o corpo do digestor é construído com geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD). Nesse modelo aplica-se uma inclinação de aproximadamente 3% para que o potencial gravitacional do líquido digerido seja utilizado para manter o fluxo dentro do digestor.

Figura 5 – Biodigestor Modelo Tubular

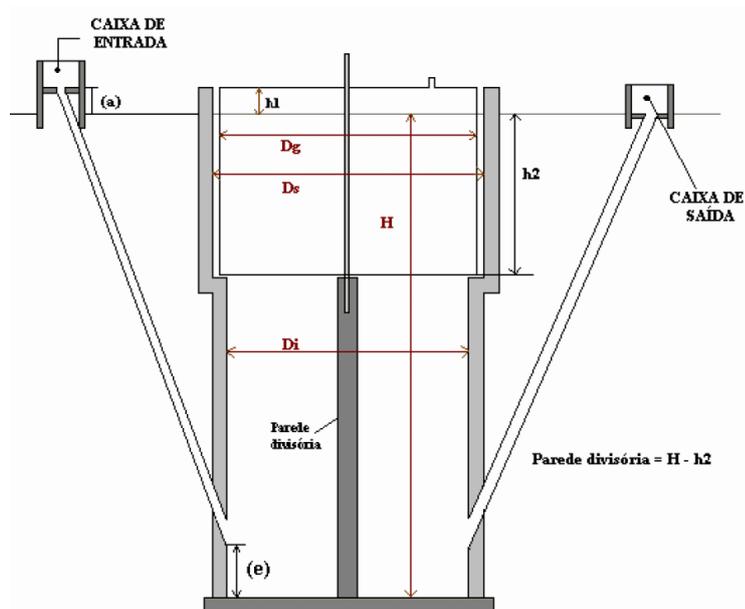


Fonte: MARTÍ-HERRERO et al., (2014).

3.1.2 Indiano

O digestor modelo indiano (Figura 6) oferece aos criadores, que possuem grande quantidade de bovinos, a oportunidade de capitalizar e melhorar a subsistência dos membros mais pobres da sociedade. Segundo York et al. (2016) o governo indiano tem um histórico de quase 30 anos investindo e dando suporte para instalação deste tipo de digestor e estima-se que até 2022 o número de digestores ativos na Índia pode ultrapassar a casa dos 6,5 milhões. Trata-se de um digestor construído em blocos de concreto, empilhados em formato circular sobre uma base de concreto magro. Os tubos que ligam a cavidade central às caixas de entrada e saída podem ser feitos de concreto ou aço galvanizado. A cúpula fabricada em ferro se movimenta dependendo da quantidade de gás no interior do digestor. Dentro da câmara principal uma parede divisória é feita em bloco de concreto ou cerâmica, para gerar um fluxo ascendente de matéria orgânica no lado de entrada e descendente no lado de saída (YORK et al., 2016).

Figura 6 – Biodigestor Modelo Indiano

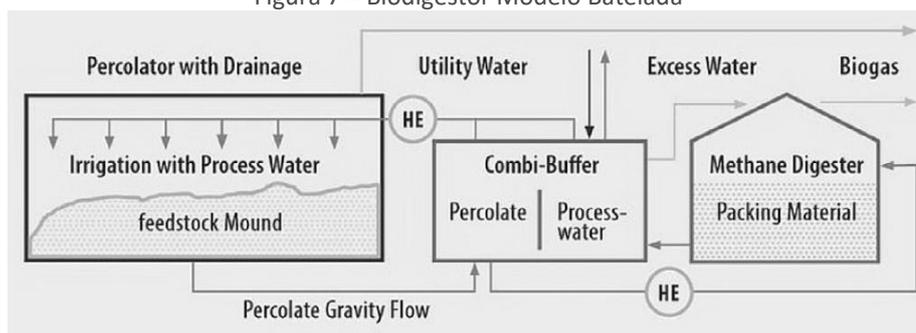


Fonte: Adaptado de DEGANUTTI et al., (2002).

3.1.3 Batelada ou Digestor a Seco

O digestor modelo batelada (Figura 7) é um novo tipo de sistema, que consiste em uma série de containers aonde matéria orgânica sólida pode ser acumulada para produção de biogás, muito utilizado para redução do volume da parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos presentes em lixões e aterros sanitários (QIAN et al., 2016), também denominado biodigestor a seco. Segundo Benbelkacem et al. (2010) dentro dos containers um líquido percolado, resultado da umidade relativa dos materiais orgânicos, escorre por gravidade até um novo recipiente fechado, onde o líquido é bombeado de volta ao container principal e aspergido sobre a mesma matéria orgânica, a fim de criar um fluxo contínuo para produção de biogás. Tanto o tanque com percolado, quando o container, produzem biogás ao longo do tempo. Depois de uma semana o conteúdo do primeiro container é transferido para um segundo e novo carregamento de material orgânico é depositado no primeiro misturado com um terço do volume do material digerido. O número de containers utilizados tem relação direta com a quantidade de matéria orgânica disponível para produção.

Figura 7 – Biodigestor Modelo Batelada



Fonte: QIAN et al., (2016).

3.1.4 Sertanejo

O modelo de biodigestor Sertanejo (Figura 8), é uma adaptação do biodigestor modelo Indiano feita com uma releitura de materiais e métodos construtivos apresentado em formato de manual de construção e operação por Mattos e Faria Júnior (2011). Esse digestor se difere do indiano por não ter uma cúpula feita de ferro, em substituição utiliza-se uma caixa d'água de 3 mil litros adaptada para receber os tubos e conexões. Essa simples modificação resulta em um menor investimento inicial para execução do digestor. Outro fator que merece ser destacado sobre esse tipo de digestor é que o seu manual traz de forma simples e bem estruturada, com etapas construtivas, know-how e resumo de materiais, como se proceder sua construção.

Figura 8 – Biodigestor Modelo Sertanejo

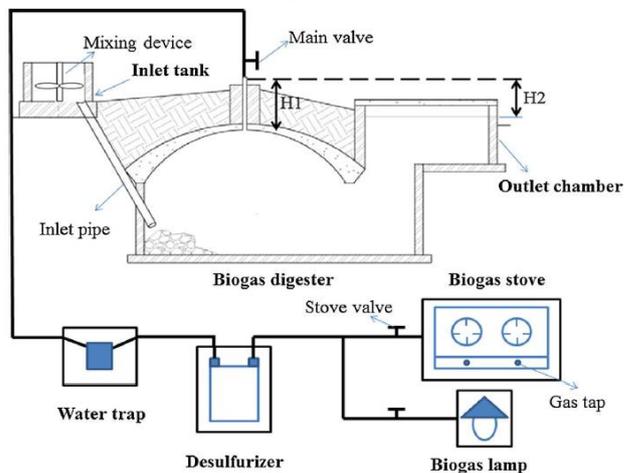


Fonte: MATTOS e FARIA JÚNIOR (2011).

3.1.5 Chinês

O modelo de digestor Chinês (Figura 9) é bastante difundido nas províncias chinesas e em diversos países da África (WAMWEA, 2017). O que difere esse tipo de digestor dos demais é a sua cúpula, que é feita de concreto e fixada juntamente com as paredes do digestor, portanto não movimenta durante a produção de gás. O argumento para esse tipo de construção baseia-se na diminuição da variabilidade da temperatura externa do ambiente, uma vez que o digestor dotado de cúpula de concreto pode ficar completamente enterrado sob o nível natural do terreno, o que pode ser muito vantajoso principalmente em países com temperatura média anual muito baixa (SCARLAT et al., 2018).

Figura 9 – Biodigestor Modelo Chinês



Fonte: WAMWEA (2017).

3.1.6 CSTR

O modelo de digestor CSTR (Figura 10) (Continuous-flow Stirred Tank Reactor), também conhecido como RPA (Reator Perfeitamente Agitado), é amplamente utilizado no meio industrial e é uma tecnologia para digestão anaeróbica de alta performance. Esse modelo tem a vantagem de conseguir trabalhar com as mais variadas biomassas sólidas, pastosas e líquidas e possuir manutenção simples e racionalizada, para minimizar paradas na produção e do biodigestor (SEBIGAS, 2019). O biodigestor CSTR é baseado num fluxo semi-contínuo de entrada de biomassa fresca misturada de forma contínua e otimizada nos digestores, que trabalham em temperatura controlada, gerando uma alta produção de biogás. O biogás pode ser usado para produzir energia elétrica e/ou purificado, gerando biometano. O digestado de saída pode ser espalhado nos campos como fertilizante, ou separado em fração sólida e líquida, além de enriquecido e comercializado como composto organomineral.

Existem algumas empresas no mercado dedicadas a execução de projetos de implantação e fornecimento de serviços para modelos de digestor CSTR, fornecendo o suporte a decisão de investimento, o desenvolvimento da solução proposta, a implementação e o suporte à operação. A expertise dessas empresas atrai a atenção dos grandes investidores, que acabam preferindo alternativas de investimento como essas, devido a existência de um know-how por parte das empresas, bem como uma consultoria contínua, trazendo uma maior confiabilidade.

Segundo do Amaral et al. (2016) o desenvolvimento de biodigestores do tipo CSTR combina inúmeras vantagens em relação aos processos convencionais, principalmente no que diz respeito a suportar elevadas cargas orgânicas volumétricas (COV).

Figura 10 – Biodigestor Modelo CSTR



3.2 Dados Coletados

3.2.1 Digestores de Pequena Escala

Os parâmetros encontrados para cada modelo de digestor de pequena escala estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros encontrados para cada tipo de digestor de pequena escala.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Indiano	Batelada	Sertanejo	Chinês
Investimento Inicial	-	263,11 U\$	68.000,00 INR	2.810,5 EUR	1.742,50 R\$	571,5 U\$
Produtividade Média	m ³ /dia	0,75	0,58	0,07	0,55	1,19
Demanda de Biomassa Seca	kg/dia	20	14,16	35	13,3	20
Demanda de Água	L/dia	60	22,62	0	21,7	20
Vida Útil	ano	10	10	15	20	20
Volume	m ³	11,3	4	21	6,66	6
Tipo de Biomassa	-	Estrume Fresco	Estrume Fresco	RSU ²	Estrume Fresco	Estrume Fresco

²RSU: Resíduos Sólidos Urbanos.

Sabendo disso, percebe-se que o digestor modelo Batelada não atende a necessidade de produção diária de biogás definida no item 2.8, o que justifica a exclusão desse modelo para o referido uso. Isso acontece porque a produtividade de biogás por parte da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é pequena quando comparada com a biomassa convencional de digestores anaeróbios (estrume de animais), o que muitas vezes inviabiliza o investimento neste tipo de tecnologia. Portanto, é mais recomendável a utilização do digestor em Batelada para grandes quantidades de matéria orgânica, como as de aterros sanitários ou lixões (QIAN, 2016).

A Tabela 10 mostra o novo valor de investimento inicial convertido para Real (R\$) e atualizado mês a mês pela inflação.

Tabela 10 – Conversão monetária e correção inflacionária para os digestores de pequena escala

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Indiano	Sertanejo	Chinês
Tipo de Moeda ¹	-	U\$	INR	R\$	U\$
Investimento Inicial	\$	263,11	68.000,00	1.742,50	571,50
Ano de Publicação	ano	2014	2016	2011	2017

Taxa de Câmbio	R\$/\\$	2,3605	0,0519	1,0000	3,1853
Investimento Inicial Corrigido	R\\$	621,06	3.532,17	1.742,50	1.820,41
Correção Inflacionária	R\\$	830,78	4.012,11	2.782,70	1.945,43

¹Moeda citada na referência encontrada: Dólar Americano (U\\$), Rúpia Indiana (INR) ou Real (R\\$).

3.2.2 Digestores de Larga Escala

Os parâmetros encontrados para cada modelo de digestor de larga escala estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros encontrados para cada tipo de digestor em escala industrial

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Investimento Inicial	R\\$	87.166,07	3.489.906,98	2.142.709,92
Produtividade Média	m ³ /dia	197,05	3750,00	700,00
Demanda de Biomassa Seca	kg/dia	100,21	150000	3900,00
Demanda de Água	L/dia	300,64	0	22500,00
Vida Útil	anos	10	10	10
Volume	m ³	496	4000	1000
Produção de Eletricidade	kWh/mês	1334,63	54750,00	21870,00
Tipo de Biomassa	-	Estrume Fresco	RSU	Diversas

¹Valores convertidos para real (R\\$) e atualizados pela inflação mês a mês, desde a data de publicação da referência até outubro de 2018.

3.3 Análise da Viabilidade Econômica

3.3.1 Digestores de Pequena Escala

Na Tabela 12 encontram-se os valores obtidos necessários para análise de viabilidade econômica, aplicando as equações do item 2.5 para os modelos de digestores de pequena escala, e excluindo o modelo Batelada devido a justificativa apresentada no item 3.2.1.

Tabela 12 – Cálculo da viabilidade econômica para cada tipo de digestor

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Indiano	Sertanejo	Chinês
Investimento Inicial	R\$	830,78	4.012,11	2.782,70	1.945,43
Custo Anual de Manutenção	R\$	83,08	401,21	278,27	194,54
Custo Mensal de Manutenção	R\$	6,92	33,43	23,19	16,21
Receita Mensal	R\$	95,45	73,82	70,00	151,45
Total Mensal	R\$	88,53	40,38	46,81	135,24
Períodos	mês	120	120	240	240
Valor Presente Líquido	R\$	5.666,68	-1.048,27	1.832,71	11.389,10
VPL Horizontes Iguais	R\$	7.612,84	-1.408,28	1.832,71	11.389,10
Payback	anos	0,8	8,3	5,0	1,2

Os valores de VPL e VPL Horizontes Iguais da Tabela 12 mostram que os modelos Tubular, Sertanejo e Chinês são considerados investimentos economicamente viáveis, já que para todos eles o valor do VPL e do VPL Horizontes Iguais é maior do que zero. Pelo mesmo motivo o digestor modelo indiano é inviável economicamente. O maior VPL é do modelo Chinês, o menor Payback é do modelo Tubular e o menor investimento inicial é o do modelo Tubular.

3.3.2 Digestores de Larga Escala

No primeiro cenário cem por cento do investimento inicial é adquirido através de empréstimo, portanto considerando o pagamento de juros sobre o valor financiado. A Tabela 13 mostra o resultado obtido utilizando-se as equações (7.0) e (8.0) para cada modelo de digestor de larga escala.

Tabela 13 – Cálculo do fluxo de caixa para cada tipo de digestor de larga escala para o cenário 1

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Custo Anual de Manutenção	R\$	21.791,52	872.476,75	535.677,48
Custo Mensal de Manutenção	R\$	1.815,96	72.706,40	44.639,79

Parcela Mensal ¹	R\$	820,60	37.643,43	23.112,06
Biofertilizante	R\$	2.282,36	85.405,50	88.821,72
Energia	R\$	556,22	22.817,61	9.114,54
Créditos de Carbono	R\$	703,36	13.357,76	2.493,45
Receita Mensal	R\$	3.541,94	121.580,87	100.429,71
Fluxo de Caixa Total Mensal	R\$	905,38	11.231,04	32.677,86

¹Parcela mensal paga em função do empréstimo realizado.

A Tabela 14 mostra os dados obtidos com o cálculo da viabilidade econômica para cada modelo de digestor de larga escala para o cenário considerando o empréstimo em uma das linhas de crédito do Pronaf.

Tabela 14 – Cálculo da viabilidade econômica para cada modelo de digestor de larga escala para o cenário 1

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Investimento Inicial	R\$	87.166,07	3.489.906,98	2.142.709,92
Fluxo de Caixa Mensal	R\$	905,38	11.231,04	32.677,86
Períodos	meses	120	120	120
Linha de Crédito ¹	-	Eco	Agroindústria	Agroindústria
Rendimento (ao ano) ²	% a.a.	7,10%	6,20%	6,20%
Rendimento (ao mês)	% a.m.	0,5732%	0,5025%	0,5025%
Valor Presente Líquido	R\$	-8.768,33	-2.479.681,75	796.641,62
TIR	% a.m.	0,39%	-1,39%	1,15%
Payback	anos	8,0	25,9	5,5

¹Linha de crédito compatível com o vulto financeiro do investimento inicial conforme tabela 5;

²Rendimento médio anual esperado para cada linha de crédito.

A Tabela 15 compara a TIR calculada para cada tipo de digestor com a TMA relativa a cada linha de crédito em que o vulto financeiro do projeto se enquadra, para o cenário 1.

Tabela 15 – Comparação entre TIR e TMA para o cenário 1

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
------------------	---------	---------	----------	------

TIR (ao mês)	% a.m.	0,39%	-1,39%	1,15%
TIR (ao ano)	% a.a.	4,73%	-15,51%	14,74%
Linha de Crédito	-	Eco	Agroindústria	Agroindústria
TMA	% a.a.	7,10%	6,20%	6,20%
TIR (ao ano) > TMA	-	Não	Não	Sim

Os valores de VPL (Tabela 14) e a comparação entre TIR e TMA (Tabela 15) mostram que apenas o modelo CSTR é considerado como um investimento economicamente viável, já que apenas para ele o valor do VPL é maior do que zero e o valor da TIR é maior do que a TMA. Pelo mesmo motivo os digestores Tubular e Batelada são inviáveis economicamente. O maior VPL é do modelo CSTR, a maior TIR é do modelo CSTR, o menor Payback é do modelo CSTR e o menor investimento inicial é o do modelo Tubular.

No segundo cenário considera-se que o investidor dispõe de todo o dinheiro necessário para o investimento inicial, portanto desconsiderando o pagamento de juros. A Tabela 16 mostra o resultado obtido utilizando-se as equações (7.0) e (8.0) para cada modelo de digestor de larga escala.

Tabela 16 – Cálculo do fluxo de caixa para cada tipo de digestor de larga escala para o cenário 2

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Custo Anual de Manutenção	R\$	21.791,52	872.476,75	535.677,48
Custo Mensal de Manutenção	R\$	1.815,96	72.706,40	44.639,79
Biofertilizante	R\$	2.282,36	85.405,50	88.821,72
Energia	R\$	556,22	22.817,61	9.114,54
Créditos de Carbono	R\$	703,36	13.357,76	2.493,45
Receita Mensal	R\$	3.541,94	121.580,87	100.429,71
Fluxo de Caixa Total Mensal	R\$	1.725,98	48.874,47	55.789,92

O novo fluxo de caixa aliviado leva às modificações observadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Cálculo da viabilidade econômica para cada modelo de digestor de larga escala para o cenário 2

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
------------------	---------	---------	----------	------

Investimento Inicial	R\$	87.166,07	3.489.906,98	2.142.709,92
Fluxo de Caixa Mensal	R\$	1.725,98	48.874,47	55.789,92
Períodos	mêses	120	120	120
Linha de Crédito ¹	-	Eco	Agroindústria	Agroindústria
Rendimento (ao ano) ²	% a.a.	9,60%	11,70%	11,70%
Rendimento (ao mês)	% a.m.	0,767%	0,926%	0,926%
Valor Presente Líquido	R\$	47.917,91	41.321,46	1.888.166,24
TIR	% a.m.	1,77%	0,97%	2,54%
Payback	anos	4,2	6,0	3,2

¹Linha de crédito compatível com o vulto financeiro do investimento inicial conforme tabela 5;

²Rendimento médio anual esperado para cada linha de crédito desconsiderando o pagamento de juros.

A Tabela 18 compara a TIR calculada para cada tipo de digestor com a TMA relativa a cada linha de crédito em que o vulto financeiro do projeto se enquadra, para o cenário 2.

Tabela 18 – Comparação entre TIR e TMA para o cenário 2

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
TIR (ao mês)	% a.m.	1,77%	0,97%	2,54%
TIR (ao ano)	% a.a.	23,43%	12,28%	35,09%
TMA	% a.a.	9,60%	11,70%	11,70%
TIR (ao ano) > TMA	-	Sim	Sim	Sim

Os valores de VPL (Tabela 17) e a comparação entre TIR e TMA (Tabela 18) mostram que os modelos Tubular, Batelada e CSTR são considerados como um investimento economicamente viável, já que para todos o valor do VPL é maior do que zero e o valor da TIR é maior do que a TMA. O maior VPL é do modelo CSTR, a maior TIR é do modelo CSTR, o menor Payback é do modelo CSTR e o menor investimento inicial é o do modelo Tubular.

3.4 Tomada de Decisão

3.4.1 Digestores de Pequena Escala

Se levarmos em conta apenas o aspecto econômico, a escolha seria o modelo Chinês, porém, o perfil socioeconômico do investidor alvo tem enorme peso na escolha do digestor de pequena escala mais vantajoso. As famílias que vivem em áreas rurais muitas vezes possuem uma baixa renda familiar e baixo nível de escolaridade (QU et al., 2013), portanto nem sempre essas famílias podem arcar com os elevados custos de investimento inicial. Ademais, quanto maior a dificuldade de construção, operação e manutenção de um determinado tipo de digestor, maior a chance de insucesso da implantação do investimento.

Tabela 19 – Parâmetros operacionais dos diferentes tipos de digestor

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Indiano	Sertanejo	Chinês
Complexidade de Construção	Pequena	Média	Pequena	Média	Média
Complexidade de Operação	Pequena	Pequena	Média	Alta	Alta

O modelo Sertanejo pode ser retirado da análise, sob a justificativa de ser o menor VPL dos 3 modelos economicamente viáveis (Tubular, Sertanejo e Chinês) e possuir o maior investimento inicial. Com isso a escolha restringe-se a duas alternativas: modelo Tubular e modelo Chinês. Uma escolha conservadora, ou seja, buscando o menor risco, leva em conta a maior probabilidade de sucesso, que é quando existe menor complexidade de construção e operação do modelo.

Portanto, baseando-se em uma escolha conservadora, buscando o menor índice de insucesso, aliado a viabilidade econômica e o perfil socioeconômico do investidor alvo, conclui-se que o modelo mais vantajoso é o Tubular.

3.4.2 Digestores de Larga Escala

No cenário considerando o pagamento mensal de juros destaca-se a rentabilidade do investimento no modelo de CSTR, que apresenta maior VPL (R\$ 796.641,62), menor payback (5,5 anos) e maior TIR (14,74%), que neste caso é o investimento mais vantajoso dentre os três digestores de larga escala apresentados, já que os outros dois não são considerados viáveis economicamente.

Já no cenário desconsiderando o pagamento mensal de juros todos os modelos são considerados viáveis economicamente, porém a rentabilidade do investimento no modelo de CSTR, que apresenta maior VPL (R\$ 1.888.166,24), menor payback (3,2 anos) e maior TIR (35,09%), que de modo geral é o investimento mais vantajoso dentre os três apresentados. Percebe-se que o vulto financeiro do investimento inicial para os biodigestores tipo Batelada e CSTR em muito se diferem do investimento inicial para o Modelo Tubular, embora todos sejam considerados digestores de larga escala. Portanto, do ponto de vista do investidor, há de se privilegiar o investimento no modelo que for compatível com sua disponibilidade monetária, da mesma forma que foi considerada a linha de crédito na Tabela 5, ou seja, para uma cooperativa de investidores que possuem

até 35 milhões de reais é mais vantajoso investir na construção e operação de um digestor modelo CSTR, já para um investidor individual que dispõe de até 165 mil reais só será possível investir na construção e operação de um digestor modelo Tubular. Levando em consideração que o investidor dispõe de quantias ilimitadas de dinheiro, o investimento mais vantajoso é o modelo CSTR.

3.5 Análise Gráfica

A Tabela 20 mostra os dados obtidos para digestores com diversas escalas construtivas e que têm maior relevância quanto à análise gráfica. Os parâmetros considerando o pagamento de juros na hipótese de aquisição de 100% de financiamento para construção da planta de biogás foram eliminados desta análise, já que esta hipótese não foi considerada na obtenção dos parâmetros relativos aos digestores de pequena escala, o que causaria uma discrepância entre os valores comparativos.

Tabela 20 – Dados utilizados na análise gráfica

Ocorrências	Volume (m ³) ¹	Investimento Inicial (R\$) ²	VPL (R\$) ²	TIR (%) ²
Tubular 1	11,30	830,78	5.666,68	0,11927
Tubular 2	496,00	87.166,07	47.917,91	0,01770
Tubular 3	1.130,00	171.331,80	327.408,90	0,03787
Indiano 1	4,00	4.012,11	-1.048,27	0,00329
Batelada 1	21,00	11.094,59	-18.553,88	-
Batelada 2	4.000,00	3.489.906,98	41.321,46	0,00970
Sertanejo 1	6,66	2.782,70	1.832,71	-
Chinês 1	6,00	1.945,43	11.389,10	-
CSTR 1	1.000,00	2.142.709,92	1.888.166,24	0,02538

¹Coordenadas no eixo das abscissas;

²Coordenadas no eixo das ordenadas.

Coordenadas (X,Y) com distâncias normais às curvas muito acima da média, também chamados de outliers (pontos fora da curva), foram excluídas para redução do erro experimental e para não influenciar negativamente a análise gráfica. Os itens em sequência mostram as linhas de tendência que foram obtidas comparando os dados por tipo de digestor e também uma comparação global, incluindo todos os valores obtidos na Tabela 20. Os gráficos referentes somente aos modelos Indiano e Sertanejo foram suprimidos pela falta de dados suficientes para se configurar uma linha de tendência, sendo necessário no mínimo dois pontos para tal. Os parâmetros investimento inicial, VPL e TIR, foram comparados com o volume a fim de estimar sua variação de acordo com o aumento de escala dos biodigestores.

3.5.1 Linhas de Tendência

As Figuras 11, 12 e 13 mostram as linhas de tendência variando os parâmetros investimento inicial, VPL e TIR em função do aumento da escala de todos digestores da Tabela 20 simultaneamente.

Figura 11 – Variação do investimento inicial em função do volume para todos modelos

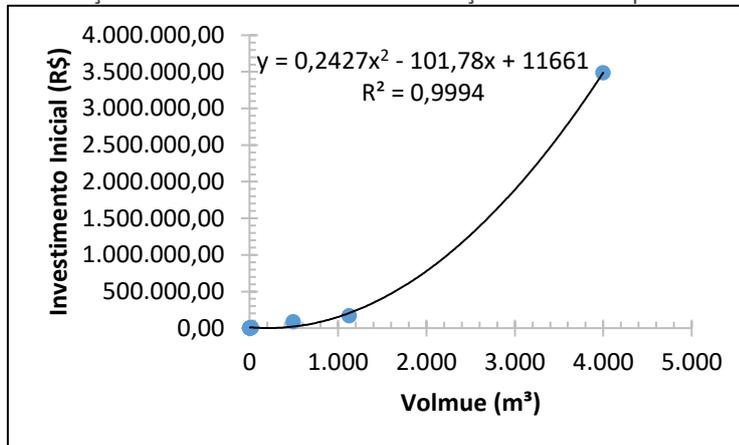


Figura 12 – Variação do valor presente líquido em função do volume para todos modelos

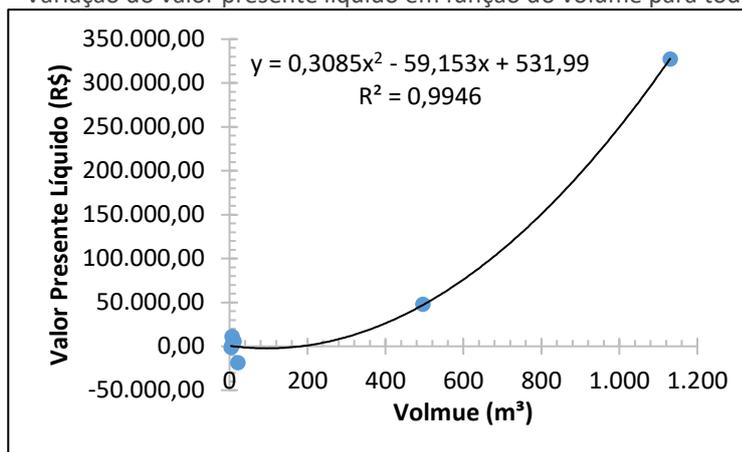
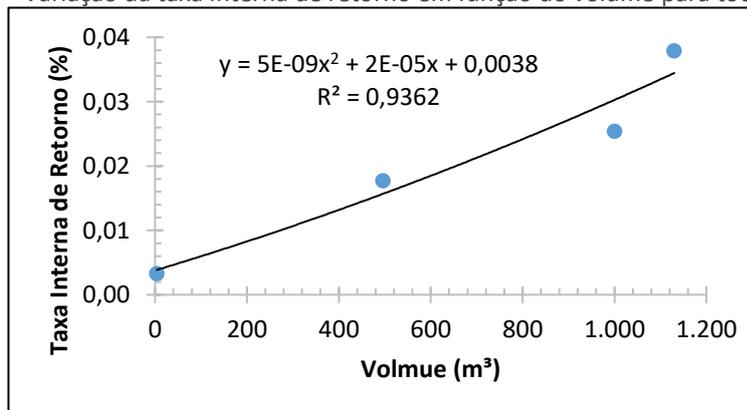


Figura 13 – Variação da taxa interna de retorno em função do volume para todos modelos



Observa-se que o investimento inicial cresce, de acordo com o esperado, conforme se aumenta o volume dos digestores. Já o VPL tem um valor inesperado de 0 até 200 m³, depois volta a aumentar de forma crescente. Para a TIR observa-se que ela aumenta conforme é ampliado o volume do digestor.

3.6 Método de Monte Carlo

As Tabelas 21 e 22 trazem os cenários e suas probabilidades de ocorrência baseados no desvio padrão das variáveis da Tabela 20.

Tabela 21 – Cenários probabilísticos da variação do investimento inicial, venda dos fertilizantes e venda de energia excedente

Investimento Inicial	P (Invest.)	Fertilizante	P (Fertiliz.)	Energia	P (Energ.)
1.714.167,94	10%	62.175,20	35%	8.203,09	5%
2.142.709,92	80%	88.821,72	50%	9.114,54	85%
2.678.387,40	10%	126.888,17	15%	10.127,27	10%

Tabela 22 – Probabilidade e distribuição acumulada relacionada a cada variável

Créditos de Carbono	P (CC.)	Manutenção	P (Manutenç.)	Tarifa Energia ¹	P (Tarif.)
1.496,07	40%	22.319,90	5%	0,02	30%
2.493,45	50%	44.639,79	60%	0,03	50%
4.155,75	10%	89.279,58	35%	0,04	20%

¹Variação média da tarifa de energia brasileira entre o período de 2013 até 2015. Disponível em: <<https://www.nexojornal.com.br/grafico/2017/10/06/A-trajet%C3%B3ria-das-tarifas-de-energia-nos-%C3%BAltimos-14-anos>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

A Tabela 23 traz o resultado da aplicação das Equações (23.0) e (24.0).

Tabela 23 – Resultados da aplicação do Método de Monte Carlo

E (VPL)	σ (VPL)	VPL (mín.)	VPL (máx.)	Prob. (VPL<0)	Prob. (VPL<Médio ¹)
581.514,74	2.172.924,14	-3.388.595,57	6.475.029,97	39%	76%

¹VPL baseado em parâmetros médios determinados para o modelo CSTR, e igual a R\$ 2.142.709,92;

Vale ressaltar que a chance de insucesso determinada na Tabela 23 é de 39%, valor relativamente baixo e dentro do esperado, porém a chance do VPL ser menor que o médio é considerada alta (76%). A distribuição de frequências e frequências acumuladas para a simulação de Monte Carlo resulta nos números da Tabela 24, bem como no histograma.

Tabela 24 – Distribuição de frequência obtida para o a simulação

VPL Mínimo	VPL Máximo	Frequência	Freq. Acumulada
-4.000.000	-2.000.000	502	502
-2.000.000	0	1193	1695
0	2.000.000	1670	3365
2.000.000	4.000.000	232	3597
4.000.000	6.000.000	390	3987

6.000.000

8.000.000

13

4000

Finalmente, deve-se acumular a distribuição de probabilidades do retorno, para se obter uma visão melhor do comportamento da curva, de acordo com as Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Distribuição das probabilidades do retorno do investimento em um digestor modelo CSTR utilizando a simulação de Monte Carlo, baseado nas frequências da Tabela 24

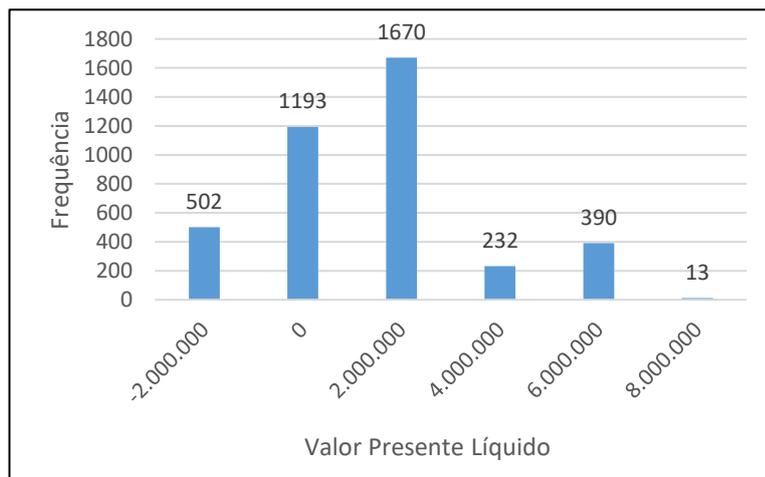
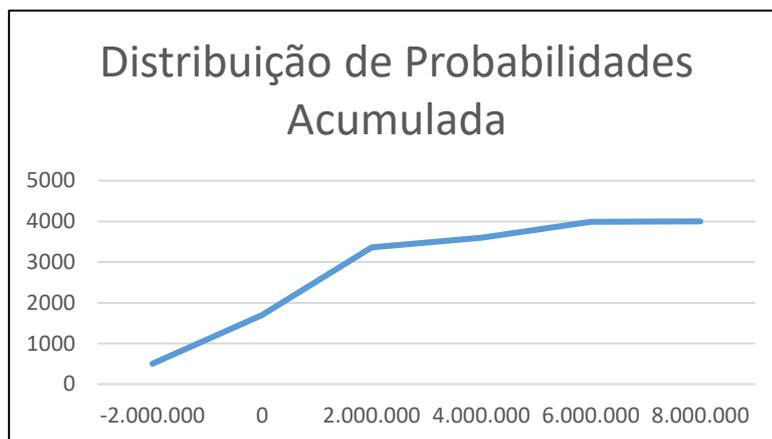


Figura 15 – Distribuição das probabilidades acumuladas do retorno do investimento em um digestor modelo CSTR utilizando a simulação de Monte Carlo, baseado nas frequências da Tabela 24



Observa-se que a distribuição de probabilidades em muito se aproxima de uma curva normal e que concentra a maioria dos cenários abaixo do valor de R\$ 4.000.000,00. Existe um pequeno afastamento da curva próximo ao valor de VPL médio, isso acontece pelo alto índice de probabilidade de ocorrência do investimento inicial médio.

Com base nos procedimentos descritos na Tabela 8 escolheram-se os parâmetros de interesse como sendo: investimento inicial, fluxo de caixa total mensal, períodos, custo mensal de manutenção, venda de biofertilizante, comercialização de energia e venda de créditos de carbono. Os parâmetros foram comparados com as medidas de VPL e TIR e seus comportamentos foram transformados em curvas gráficas.

3.7.1 Sensibilidade do VPL

Observa-se como varia o VPL para o investimento no digestor modelo CSTR de larga escala, em função dos parâmetros escolhidos.

Figura 16 – Sensibilidade do VPL em relação ao investimento inicial

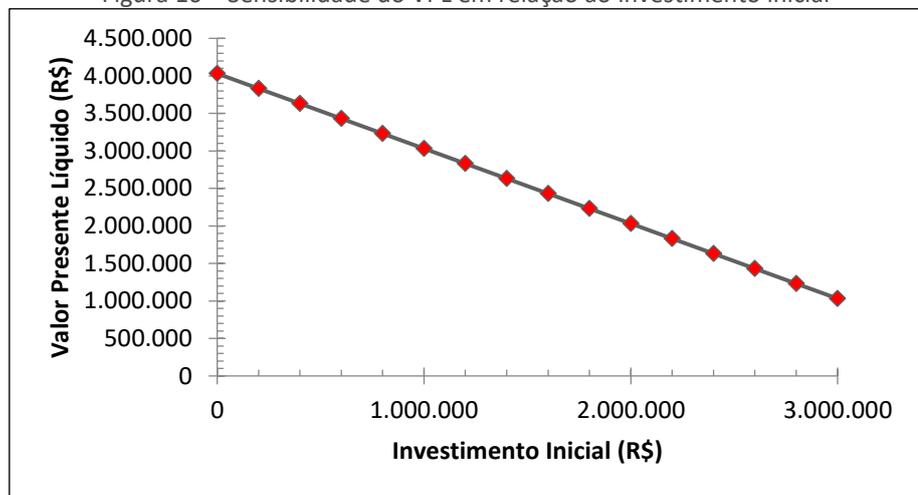


Figura 17 – Sensibilidade do VPL em relação ao fluxo de caixa total mensal

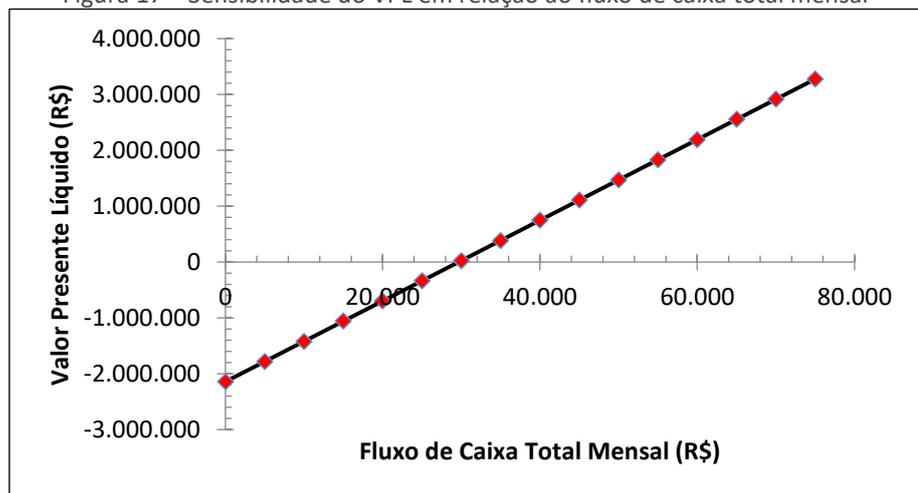


Figura 18 – Sensibilidade do VPL em relação ao número de períodos

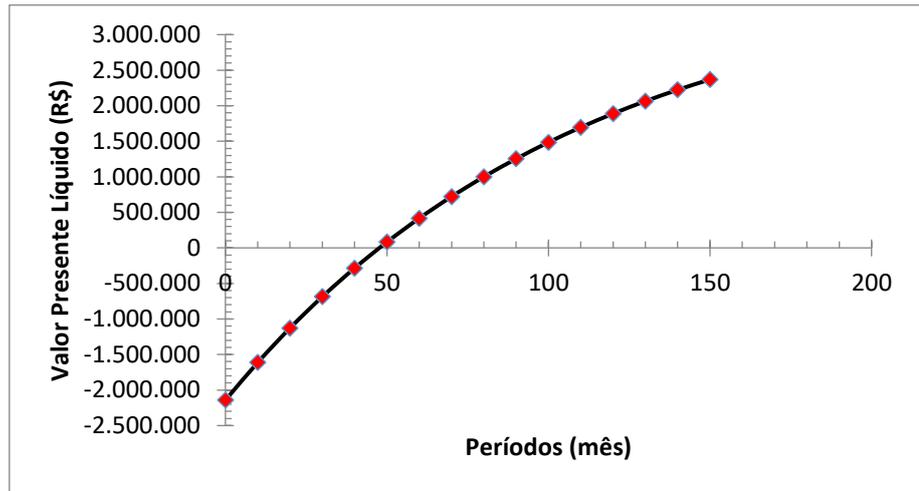


Figura 19 – Sensibilidade do VPL em relação ao custo mensal de manutenção

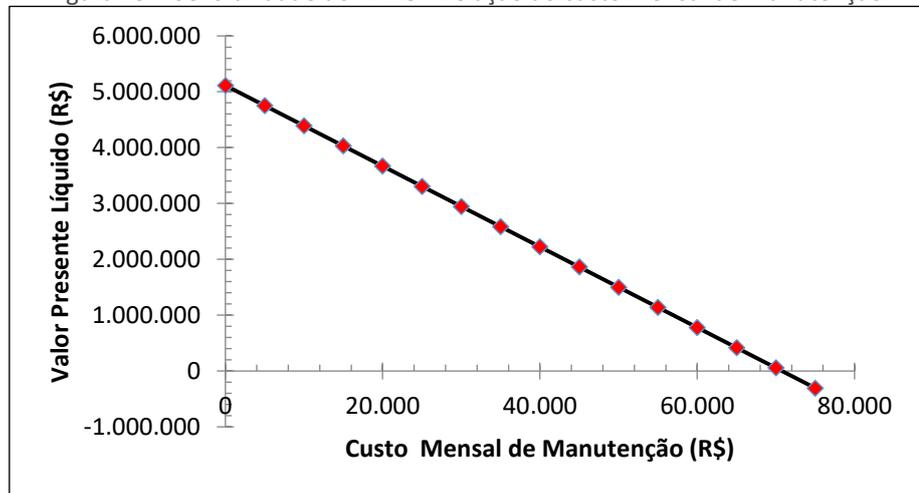


Figura 20 – Sensibilidade do VPL em relação a venda de biofertilizante

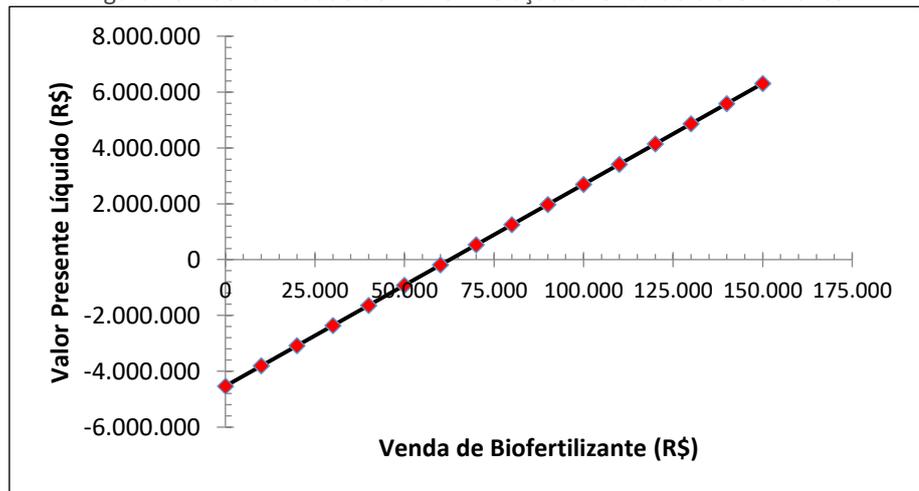


Figura 21 – Sensibilidade do VPL em relação a comercialização de energia

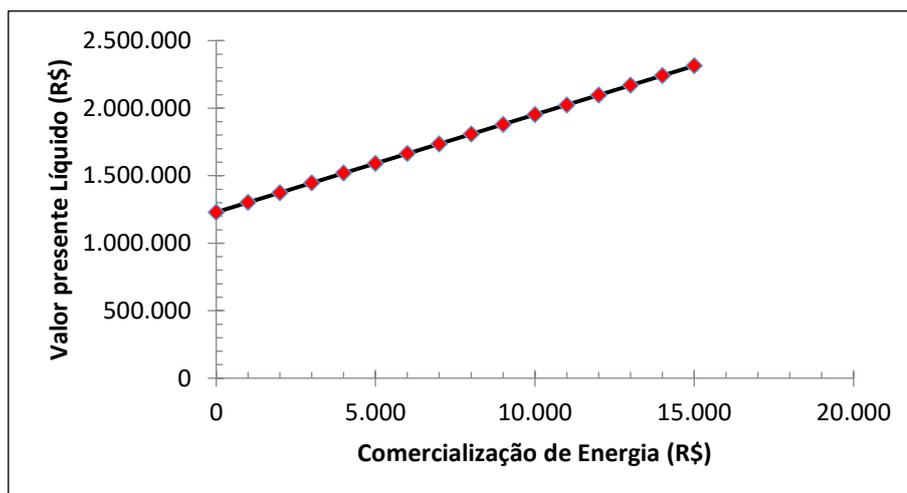
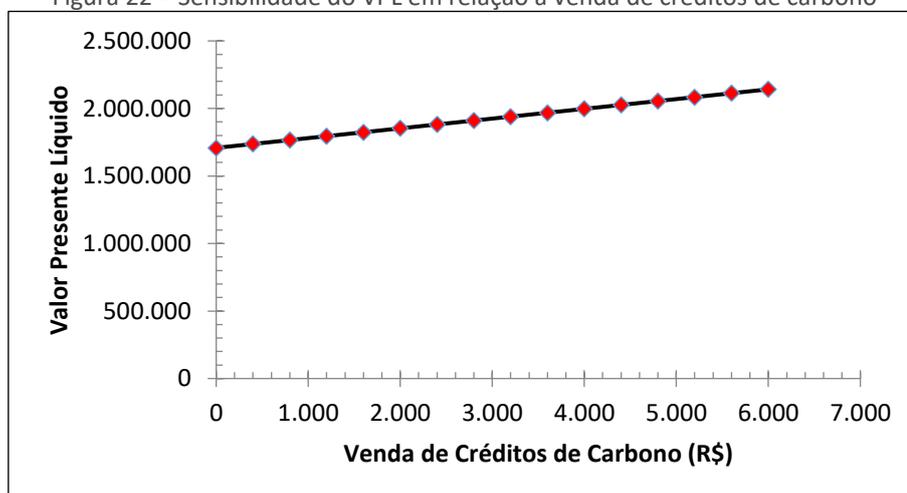


Figura 22 – Sensibilidade do VPL em relação a venda de créditos de carbono



Percebe-se que o VPL tem relação direta com o fluxo de caixa total mensal, com o número de períodos, com a venda de biofertilizantes, com a comercialização de energia e com a venda de créditos de carbono, ou seja, o aumento desses parâmetros também causa aumento no valor do VPL. Já para o investimento inicial e para o custo mensal de manutenção existe uma relação inversa com o VPL, ou seja, com a diminuição desses parâmetros acontece um aumento no valor do VPL. O parâmetro ao qual o VPL é mais sensível é a venda de biofertilizante, e o menos sensível é a venda de créditos de carbono. Significa que o parâmetro de maior impacto no VPL de digestores de larga escala é a venda de biofertilizantes.

3.7.2 Sensibilidade da TIR

De forma análoga ao item 3.8.1, observa-se como varia a TIR para o investimento no digestor modelo CSTR de larga escala, em função dos parâmetros escolhidos.

Figura 23 – Sensibilidade da TIR em relação ao investimento inicial

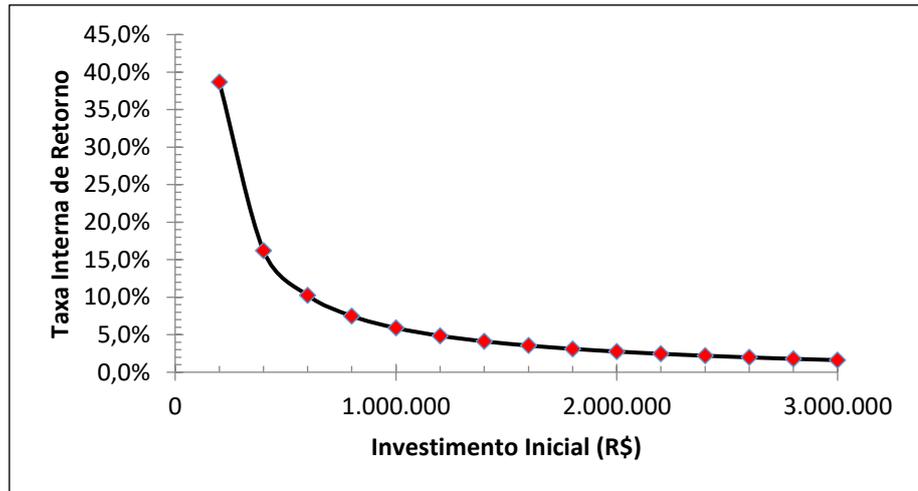


Figura 24 – Sensibilidade da TIR em relação ao fluxo de caixa total mensal

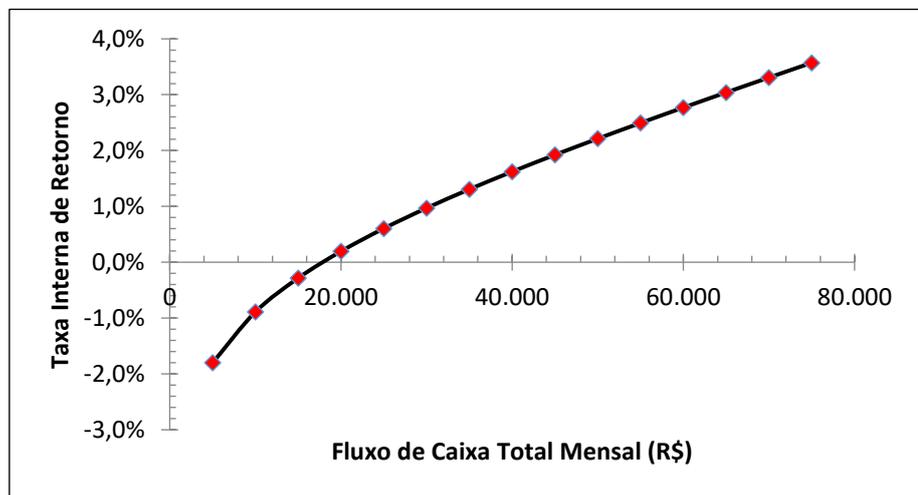


Figura 25 – Sensibilidade da TIR em relação ao número de períodos

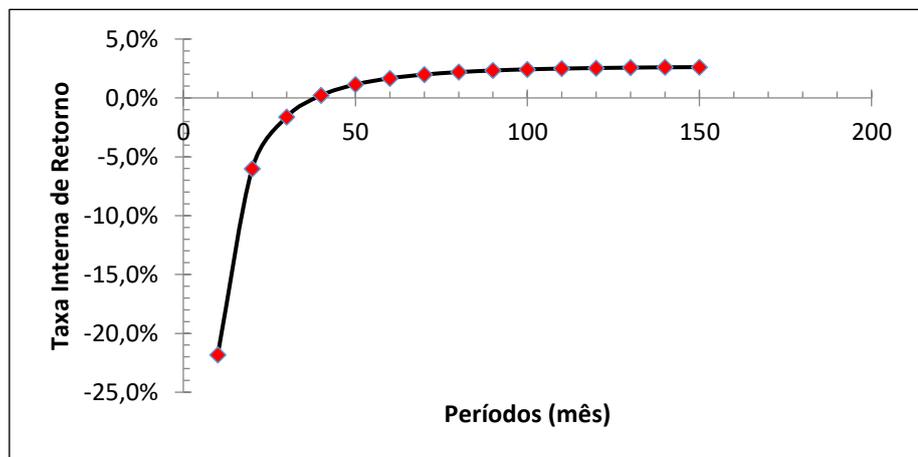


Figura 26 – Sensibilidade da TIR em relação ao custo mensal de manutenção

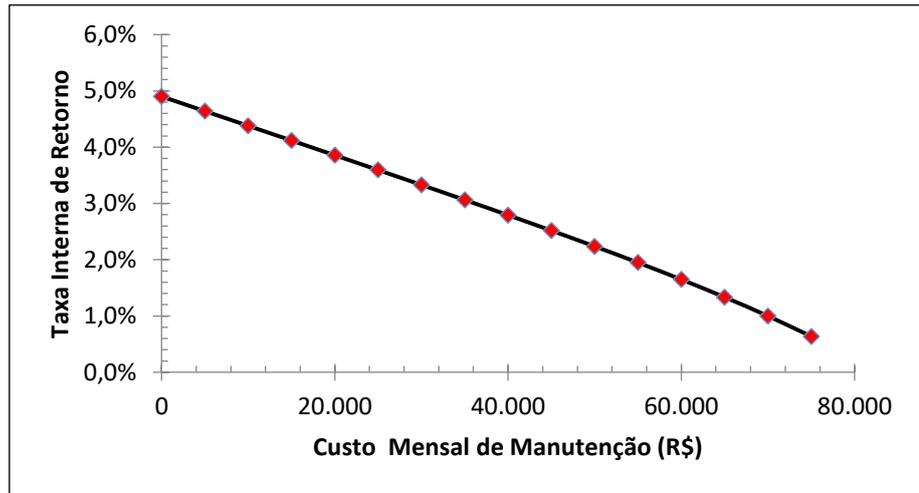


Figura 27 – Sensibilidade da TIR em relação a venda de biofertilizante

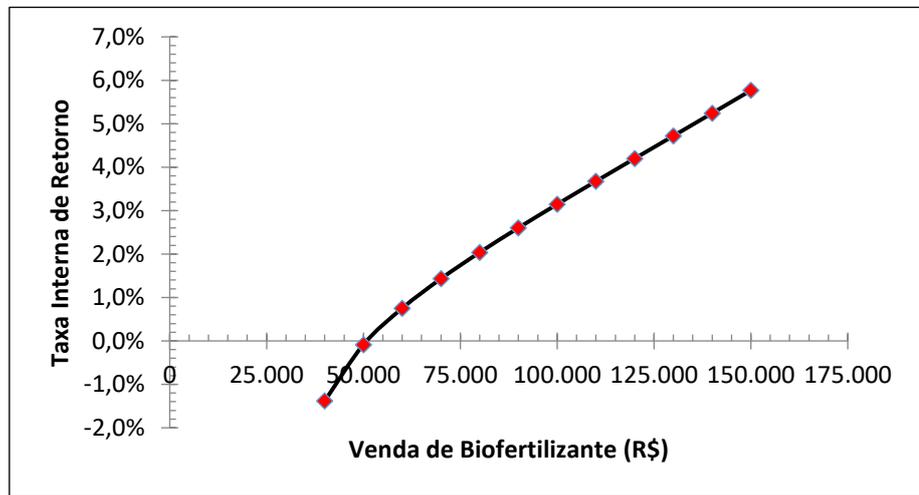


Figura 28 – Sensibilidade da TIR em relação a comercialização de energia

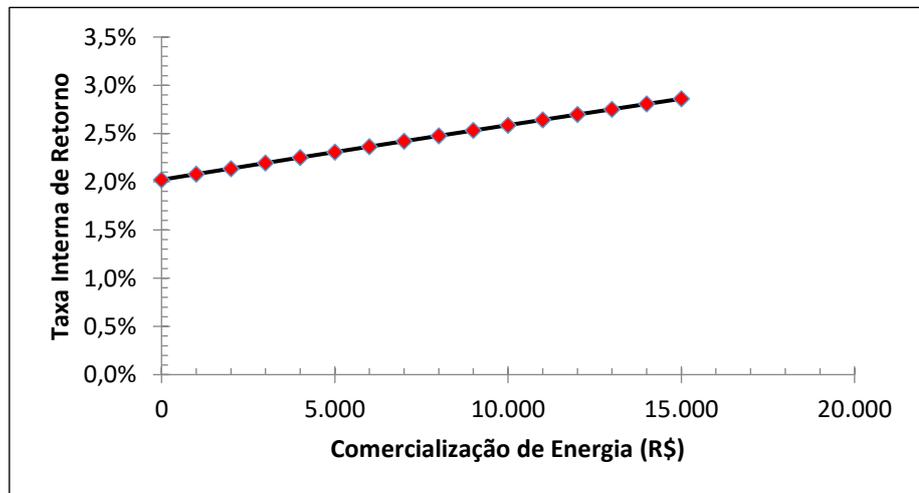
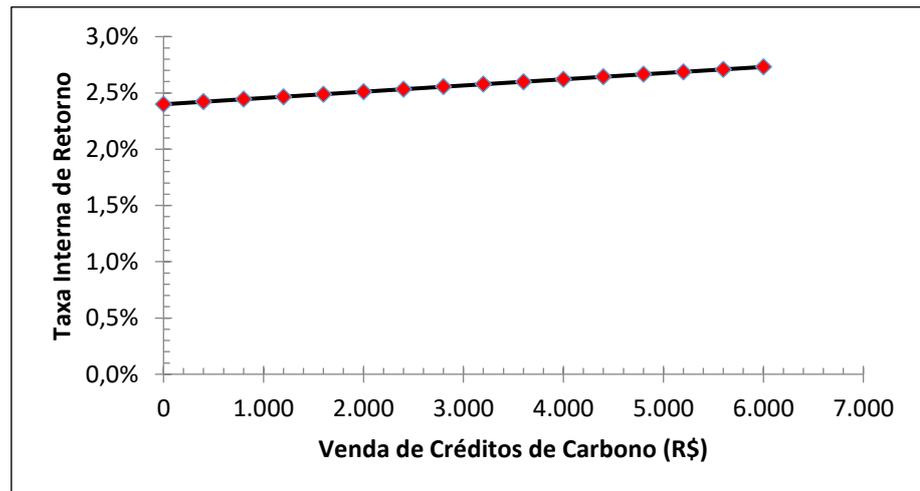


Figura 29 – Sensibilidade da TIR em relação a venda de créditos de carbono



Percebe-se que a TIR tem relação direta com o fluxo de caixa total mensal, com o número de períodos, com a venda de biofertilizantes, com a comercialização de energia e com a venda de créditos de carbono, ou seja, o aumento desses parâmetros também causa aumento no valor da TIR. Já para o investimento inicial e para o custo mensal de manutenção existe uma relação inversa com a TIR, ou seja, com a diminuição desses parâmetros acontece um aumento no valor da TIR. O parâmetro ao qual a TIR é mais sensível é o investimento inicial, e o menos sensível é a venda de créditos de carbono. Significa que o parâmetro de maior impacto no TIR de digestores de larga escala é o investimento inicial.

3.8 Barreiras Para o Sucesso de Digestores

O clima influencia diretamente no sucesso de digestores sem tecnologias de controle de temperatura (MARTÍ-HERRERO et al., 2014; GOSENS et al., 2013), o que não é um problema nas regiões tropicais, já que estas possuem uma temperatura média anual relativamente alta. Segundo Qu et al. (2013) as condições socioeconômicas, como pessoas mais jovens e renda familiar acima da média, e o clima da região têm influência no sucesso da implantação de digestores de pequena escala. Além disso, investimentos muito altos, falta de mecanismo de financiamento, preço competitivo de outros combustíveis, falta de informação e assessoria técnica são condições que causam o insucesso da aplicação de digestores em pequena e larga escala (MITTAL et al., 2018). Finalmente, a falta de políticas de incentivo governamentais também é uma das causas de insucesso da implantação de digestores (MARTÍ-HERRERO et al., 2014; GOSENS et al., 2013; QU et al., 2013; MITTAL et al., 2018).

Existe uma relação direta entre a presença de políticas de incentivo governamental com o sucesso da implantação de biodigestores, já que os países que mais se destacam nesse ramo são da União Europeia, por sua vez uma das pioneiras em promoção e investimento em fontes renováveis de energia.

CONCLUSÕES

Existem vários tipos de digestores voltados para a produção de biogás, variando desde modelos simples e de fácil construção até grandes plantas de escala industrial com elevado rigor tecnológico. Mesmo entre modelos de mesma escala existem diversas variações nos processos que os tornam únicos e inovadores, principalmente para os de grande escala, onde investe-se muito em pesquisa e desenvolvimento sempre em busca da ampliação da eficiência energética e, conseqüentemente, do lucro. Desta forma, o escopo deste trabalho compreende os modelos mais encontrados na literatura de forma genérica, sem entrar nas especificidades que diferenciam os modelos de digestores que se enquadram em um mesmo padrão tipológico, ou seja, determinando o modelo ao qual o pertence o biodigestor através de suas características globais.

Pode-se concluir que os critérios de escolha para implantação de um modelo de digestor para produção de biogás são, em parte, subjetivos. Alguns fatores não determinísticos são importantíssimos e influenciam diretamente nessa escolha, como a cultura, principalmente para os modelos Indiano e Chinês, amplamente adotados na em seus países de origem. Todavia, diversos parâmetros objetivos foram observados ao longo do estudo, parâmetros esses que possuem grau de relevância igual ou superior aos subjetivos, dependendo do caso em questão. Dentre os parâmetros objetivos destacam-se o perfil socioeconômico dos investidores, o tipo de matéria orgânica a ser utilizada, a escala do digestor, o valor presente líquido do investimento e o fluxo de caixa positivo causado pela comercialização de energia e/ou biofertilizantes.

O método para elencar um possível melhor modelo de digestor só faz sentido quando relacionado com sua real finalidade, não existindo, portanto, um melhor modelo dentre os tipos de digestores apresentados neste trabalho, mas sim um modelo mais adequado para a situação com base nos parâmetros de comparação. Por isso a análise foi fracionada em modelos de pequena e larga escala, devido a disparidade entre os investidores alvo, bem como as particularidades, que em muito diferem, cada um.

O modelo Tubular tem vantagens para implantações de média e pequena escala, devido ao baixo custo de implantação e a facilidade de construção e operação. Esse biodigestor é uma alternativa para disseminação do biogás entre as famílias rurais, representando a diminuição de custos para famílias que já possuem acesso a gás de cozinha e energia elétrica ou levando uma solução para aqueles que não tem acesso a fontes de energia renováveis. Em ambos os casos, percebe-se a importância da intervenção de políticas governamentais para fomentar essa disseminação pelas comunidades, primeiramente, apesar de ser considerado uma tecnologia de baixo custo de implantação, a grande maioria do público alvo deste projeto não dispõe de quantias suficientes para investir ou optar por outros investimentos considerados de menor risco como a ampliação do rebanho. Além disso, a produção de biogás é uma tecnologia relativamente nova e pouco disseminada, portanto o grau de desconhecimento por parte do público em geral é alto, o que leva ao descrédito em relação a tecnologia e a dificuldade de atingir o sucesso esperado. Por último, existem exemplos onde a implementação de políticas governamentais foi considerada um sucesso, como na Alemanha, que hoje é referência nos estudos referente a implementação e modernização de plantas de biogás.

Os parâmetros determinísticos apontam que o investimento em um biodigestor em larga escala tende a ser mais vantajoso para o modelo CSTR,

principalmente na simulação sem a necessidade de realização de empréstimo. Apesar desse modelo possuir menores taxas de produtividade, tanto em relação ao biogás quanto a produção de energia, quando comparado com outros leva vantagem pelo custo inicial do investimento e os custos com manutenção serem relativamente menores, o que vai ao encontro os dados obtidos com a análise de sensibilidade das variáveis, onde percebe-se que o valor presente líquido e a taxa interna de retorno são bastante sensíveis a elas. De acordo com a teoria de Monte Carlo, um investimento nessas condições em um modelo CSTR de grande escala, teria aproximadamente 39,0% de chances de retorno, ou seja, de possuir valor presente líquido positivo. Esse número pode ser entendido como sendo um investimento de médio risco, porém, teoricamente, não é considerado como uma probabilidade baixa de sucesso. Ademais, esse valor pode ser reduzido tendo-se conhecimento mais aprofundado dos processos e aumentando o grau de controle e rigor das plantas, bem como com o investimento em novas tecnologias mais eficientes.

O biogás é uma fonte de energia muito versátil, pode ser utilizada para gerar calor, produzir energia e combustível, tanto em pequenas como em grandes quantidades, por isso a escolha do modelo, bem como o volume do digestor a ser adotado é de suma importância para uma implantação com maiores chances de sucesso. Observando a variação dos parâmetros em relação ao volume dos digestores, percebe-se que o aumento no volume influencia diretamente no investimento inicial, porém aumenta o grau de retorno financeiro do investimento. Os diferentes volumes existentes para plantas de biogás são uma oportunidade de ampliação da matriz energética sustentável, auxiliando na geração de energia distribuída e oportunidade para suprir a necessidade de famílias rurais ou melhorarem suas condições de vida. Essas características fazem do biogás uma fonte de energia especial para desenvolvimento sustentável.

Dentro das limitações do presente estudo é possível concluir que:

1. Existem vários modelos de digestores para produção de biogás, desde modelos simples até os altamente complexos.
2. Os critérios de escolha para implantação de modelos de digestores são em parte subjetivos, como por exemplo a cultura local.
3. Todavia, diversos parâmetros objetivos, de relevância igual ou superior aos não determinísticos, foram observados: perfil socioeconômico do investidor, tipo de matéria orgânica, escala do projeto, valor presente líquido e fluxo de caixa positivo.
4. O método para elencar o possível modelo de digestor vantajoso só faz sentido quando relacionado com sua real finalidade, o que levou ao fracionamento da análise realizada em digestores de pequena escala e digestores de larga escala.
5. O modelo Tubular leva vantagens em implantações de projetos de pequena e média escala, devido ao seu baixo custo de implantação e sua facilidade de construção e operação, podendo ser uma alternativa para disseminação do biogás entre famílias rurais.
6. O modelo CSTR tende a ser mais vantajoso para aplicações em projetos de larga escala e, embora tenha menor produtividade de biogás e eletricidade, possui menor investimento inicial e custo de manutenção.

7. O biogás é uma fonte versátil, tanto em pequenas quanto em grandes quantidades.

8. A escolha do modelo de digester correto é de suma importância para diminuir as chances de insucesso de sua implantação.

The economic viability of biodigester models for the production of biogas

ABSTRACT

The implementation of biogas technology is not only financially viable, but also environmentally friendly as a technology that helps to reduce carbon emissions. The rural population in developing countries is in urgent need of biogas for cooking, lighting and refrigeration, as there is a demand for biogas in these communities, resulting from energy shortage. Through a systematic literature review, using the CAPES Periodic database, and by comparing the different existing digester models, analyzing financial, socioeconomic parameters and the causes of failure to implement these technologies, the Tubular digester stands out for its low costs and ease of construction and operation. The elaboration of a project with the necessary guidelines for the construction and operation of a Tubular digester, coupled with the encouragement of governmental public policies, are factors that will drive the adoption and expansion of renewable technologies in Brazil. For large-scale biogas production, the CSTR model, abbreviated from the continuous stirred tank reactor, has to be highlighted, due to the positive results of deterministic parameters such as the Net Present Value of R \$ 1,888,166.24 and Payback of approximately 3.2 years. Statistical analysis of the probability of successful implementation of this type of technology further reinforces the possibility of expanding power generation through non-fossil alternative sources. Therefore, the use of biodigestors for energy production through the burning of biogas is a great opportunity for the diversification of the country's energy matrix.

KEYWORDS: biogas, biodigester, energy, viability.

REFERÊNCIAS

BIMBO, Del, A., “**Visual Information Retrieval**”, Morgan Kaufmann (1999).

BRAND, J.; MASON, J. “**A comparative assessment of three approaches to pixel-level human skin detection**”, International Conference on Pattern Recognition, Volume 1: pp 1056-1059, 2000.

ABBAS, T.; ALI, G.; ADIL, S. A.; BASHIR, M. K.; KAMRAN, M. A. **Economic analysis of biogas adoption technology by rural farmers: The case of Faisalabad district in Pakistan**. Renewable Energy, 2017, 107: 431-439.

DO AMARAL, A. C.; KUNZ, A.; TÁPPARO, D. C.; STEINMETZ, R. L. R. **Influência da carga orgânica volumétrica na recuperação de metano em um reator CSTR tratando dejetos suíno**. In Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola–CONBEA (Vol. 45). 2016.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia** Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/a-aneel>. Acesso: 26 mai. 2019.

ALI, S.; ZAHRA, N.; NASREEM, Z.; USMAN, S. **Impact of biogas technology in the development of rural population**. Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry, 2013, 14.2: 10.

ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N. **Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural. 2002.

BACEN. **Banco Central do Brasil - Cotações e Boletins**. 2018.

Barbeli, M. C. **Análise do uso e das possibilidades do gás metano fóssil e de biodigestão nas frotas de veículos em São Paulo e outras regiões, nos anos 90**. 1998

BENBELKACEM, H.; BAYARD, R.; ABDELHAY, A.; ZHANG, Y.; GOURDON, R. **Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in anaerobic bioreactor**. Bioresource technology, 101(14), 5206-5212. 2010.

BLANK, L. T., TARQUIN, A. J. **Basics of engineering economy**. Boston: McGraw-Hill Higher-Education. 2008.

BOTERO, RAÚL; PRESTON, THOMAS. **Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización.** Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia, 1987, 353-362.

CANCELIER, A., SOTO, U. P. D., COSTELLI, M. C., LOPES, T. J., SILVA, A. D. **Avaliação da produção de biogás de dejetos de suínos utilizando a metodologia de superfície de resposta.** Eng. sanit. ambient, 20(2), 209-217. 2015.

CERVI, R. G. **Avaliação Econômica do aproveitamento do biogás e biofertilizante produzido por Biodigestão Anaeróbia: Estudo de Caso em Unidade Biointegrada.** São Paulo, 2009.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. D. C. **Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica.** Engenharia Agrícola, 831-844. 2010.

CHENICHARO, C. D. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios.** Editora UFMG, Belo Horizonte. 2007.

CORCIOLI, G.; SIQUEIRA, C. R. **Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf).** Agricultura Familiar em Goiás, 253. 2016.

DAMACENO, F. M., HALMEMAN, M. C. R., GONÇALVES, M. S., DA SILVA MEDEIROS, F. V. **Aproveitamento agrônômico e energético de dejeções suinícolas: estudo de caso com análise econômico-financeira.** Revista Agro@mbiente On-line, 11(2), 174-180. 2017.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C.; TAVARES, M. R.; SANTOS, B. C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada.** Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

EPPS, M. I. **A atualização da contabilidade face á desvalorização monetária.** Revista de Administração de Empresas, 3(8), 29-47. 1963.

GENERAL ELECTRIC. **Jenbacher Gas Engine Services, Maintenance and Repair.** GE Power. Disponível em: <<https://www.ge.com/br/>>. Acesso em: 23 mai 2019.

GOSENS, J.; LU, T.; HE, G.; BLUEMLING, B; BECKERS, T. A. M. **Sustainability effects of household-scale biogas in rural China.** Energy Policy, 2013, 54: 273-287.

IBGE. Instituto **Brasileiro de Geografia e Estatística - Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Índices de Preços**. 2018.

HERRERO, J. MARTI. **Transfer of low-cost plastic biodigester technology at household level in Bolivia**. *Livestock Research for Rural Development*, 2007, 19.12.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Preços médios mensais pagos pela agricultura**. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea_Testes/pagos2.aspx?cod_sis=5>. Acesso em: 20 mai 2019.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. da UNIVATES. 2014.

KELEBE, H. E.; AYIMUT, K. M.; BERHE, G. H.; HINTSA, K. **Determinants for adoption decision of small scale biogas technology by rural households in Tigray, Ethiopia**. *Energy Economics*, 2017, 66: 272-278.

KUMARAN, P., HEPHIZIBAH, D., SIVASANKARI, R., SAIGUDDIN, N., SHAMISUDDIN, A. H. **A review on industrial scale anaerobic digestion systems deployment in Malaysia: Opportunities and challenges**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 929-940. 2016.

MARTINS, F. M., DE OLIVEIRA, P. A. **Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura**. Embrapa Suínos e Aves-Artigo em periódico indexado (ALICE). 2011.

MARTÍ-HERRERO, J.; CIMPANA, M.; CUEVAS, C.; PACO, G.; SERRANO, V.; ZYMLA, B.; HEISING, K.; SOLOGUREN, J.; GAMARRA, A. **Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia**. *Renewable Energy*, 2014, 71: 156-165.

MARTÍ-HERRERO, J.; ALVAREZ, R.; FLORES, T. **Evaluation of the low technology tubular digesters in the production of biogas from slaughterhouse wastewater treatment**. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 633-642.

MATTOS, LUIZ CLÁUDIO; FARIAS JÚNIOR, MÁRIO. **Manual do biodigestor sertanejo**. Recife: Projeto Dom Helder Camara, 2011.

MELO, R. A; SANTOS A. P. A.; UCHÔA M. B. C. **Análise da viabilidade técnica de geração de energia elétrica por biogás proveniente de resíduos orgânicos**. In: Congresso Técnico Científico de Engenharia e Agronomia, 72. Fortaleza, 2015.

MINGOTI, R.; HOLLER, W.; SPADOTTO, C.; LOPES, V.; BRASCO, M. **Metodologia de análise crítica de dados estatísticos históricos sobre produção agropecuária**. Embrapa Gestão Territorial-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E). 2014.

MIRANDA, A. C., SILVA FILHO, S. C., TAMBOURGI, E. B., CURVELO SANTANA, J. C., YANALLE, R. M., GUERHARDT, F. **Analysis of the costs and logistics of biodiesel production from used cooking oil in the metropolitan region of Campinas (Brazil)**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 88, 373–379. 2018.

MITTAL, SHIVIKA; AHLGREN, ERIK O.; SHUKLA, P. R. **Barriers to biogas dissemination in India: A review**. Energy Policy, 2018, 112: 361-370.

MOURA, J. P. **Estudo do dimensionamento da produção de biogás com utilização de resíduos residenciais, industriais e de matrizes suínas a partir de uma revisão de literatura**. Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2012.

MUNIZ, J. V. R.; DOS SANTOS, W. M. T. **Estudo sobre a viabilidade do uso de resíduos sólidos para geração de energia de biogás no campus dom delgado da UFMA**. Revista Brasileira de Iniciação Científica, 4(6). 2017.

OLIVEIRA, D. E. P. D. **Estudo de viabilidade da produção de energia elétrica a partir do biogás gerado pela biodigestão de resíduos sólidos orgânicos de uma central de abastecimento paulista**. 2019.

PROBIOGAS. **O estado da arte da tecnologia de metanização seca**. 2015. Disponível em: <<https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-metanizacao-rsu.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2017.

QIAN, M. Y.; LI, R. H.; LI, J.; WEDWITSCHKA, H.; NELLES, M.; STINNER, W.; ZHOU, H. J. **Industrial scale garage-type dry fermentation of municipal solid waste to biogas**. Bioresource technology, 2016, 217: 82-89.

QU, WEI; TU, QIN; BLUEMLING, BETTINA. **Which factors are effective for farmer's biogas use? – Evidence from a large-scale survey in China**. Energy Policy, 2013, 63: 26-33.

SEBIGAS. **Empresa especialista em biodigestão – Biodigestor CSTR – Reator de Fluxo e Agitação Contínuos**. Disponível em: <<http://sebigascotica.com.br/tecnologia/cstr-biodigestor>>. Acesso em: 05 set 19.

SILVA, M. D.; FONTES, A. A. **Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET)**. Revista Árvore, 29(6), 931-936. 2005.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.; FAHL, F.. **Biogas: developments and perspectives in Europe**. Renewable Energy, 2018.

TORO. **Toro Investimentos, agenciamento para investimentos e mercado de ações**. Acesso: nov. 2018, Disponível em: <<https://www.toroinvestimentos.com.br/bolsa/investir/>>. 2018.

TÔRRES, O. F. F. **Fundamentos da engenharia econômica e da análise econômica de projetos**. Thomson Learning. 2006.

WAHYUNI, S.; SUTJAHJO, S. H.; PURWANTO, Y. A.; FUAH, A. M.; KURNIAWAN, R. **Application of small digester biogas for energy supply in rural areas**. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018. p. 012035.

WAMWEA, Stephen Ngugi. **Success and failure of biogas technology systems in rural Kenya: an analysis of the factors influencing uptake and the success rate in Kiambu and Embu counties**. 2017. Master's Thesis. Norwegian University of Life Sciences.

WANG, X., CHEN, Y., SUI, P., GAO, W., QIN, F., WU, X., XIONG, J. **Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: an energy evaluation based on LCA**. Journal of cleaner production, 65, 234-245. 2014.

YORK, L.; HEFFEMAN C.; RYMER, C. **The role of subsidy in ensuring the sustainability of small-scale anaerobic digesters in Odisha, India**. Renewable energy, 96, 1111-1118. 2016.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná. 2012.

Recebido: 2020-09-17.

Aprovado: 2022-05-18.

DOI: 103895/recit.V13N52.13188

Como citar: ALCÂNTARA, L. P.; ZANG, J. W; FONSECA-ZANG, W. A.; A viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás R. Eletr. Cient. Inov. Tecnol, Medianeira, v. 13. n. 32, p. 1- 50, jul/set, 2019 Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/recit>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Lucas da Paixão Alcântara

R. 75, 46 - Centro Centro, Goiânia - GO, 74055-110

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0 Internacional.

