

Análise da Viabilidade Econômica da Geração de Energia a partir de Resíduos da Produção Suinícola

Economic Feasibility of Power Generation from Pig Farming Residues

Análisis de la Factibilidad Económica de la Generación de Energía a partir de Residuos de la Producción Porcina

Nicolas Lazzaretti Berhorst*
Andreas Friedrich Grauer**
Daniela Neuffer***
Arno Paulo Schmitz****

RESUMO

Os resíduos da suinocultura podem ser usados para a produção de energia por meio do uso de biogás. Contudo, no Brasil, terceiro maior produtor de suínos do mundo, este potencial é normalmente desperdiçado. No presente estudo pretende-se discutir a possibilidade econômica do investimento em plantas de produção de biogás e energia elétrica para produtores de suínos, uma vez que os produtores costumam alegar ser inviável tal investimento. O método utilizado é a análise de investimentos e conta com os indicadores TIR, VPL, Payback e LCOE. Dentre os resultados tem-se que: em cinco anos a TIR é de 42% e o VPL de R\$ 306.500 para o cenário de 47t/d; o LCOE médio é no valor de 0,19 R\$/kWh; a rentabilidade se mostra satisfatória em cinco anos a partir de 36 t/d, e em 10 anos a partir de 28 t/d. Análise de sensibilidade indica que redução em 5% na tarifa de energia elétrica inviabiliza o cenário de 36 t/d em cinco anos, e o de 28 t/d em 10 anos.

Palavras-chave: Biogás. Geração de energia. Estudo de viabilidade econômica. Pecuária de suínos. Objetivos do desenvolvimento sustentável.

* Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. Coordenador da área de Inteligência de Mercado do Centro Internacional de Energias Renováveis, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. E-mail: nicolas.berhorst@cibiogas.org

** Doutor em Tecnologia de Energia pela Universidade de Stuttgart, Alemanha. Professor no Mestrado Internacional Meio Ambiente Urbano e Industrial da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: andreas.grauer@similar.ind.br

*** Doutora em Técnicas de Proteção Ambiental pela Universität Stuttgart, US, Alemanha. Professora, pesquisadora e consultora da Technical University of Applied Sciences Rosenheim, Rosenheim, Alemanha. E-mail: daniela.neuffer@th-rosenheim.de

**** Doutor em Desenvolvimento Econômico pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. Professor e pesquisador da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: arno@ufpr.br

Artigo recebido em maio/2021 e aceito para publicação em agosto/2021.

ABSTRACT

Although pig farming manure can be used to produce biogas energy, in Brazil, the third largest swine producer in the world, this potential is usually disregarded. In the present study, the feasibility of using biogas from such materials in electricity plants is discussed as producers usually consider this an unfeasible investment. The analysis was carried out by applying the Investment Analysis Method with the Internal Rate of Return (IRR), the Net Present Value (NPV), Payback and Levelized Cost of Energy (LCOE) as indicators. The results point to an IRR of 42% in five years with an NPV of R\$ 306,500 in a 47 ton/day scenario. The average LCOE is of 0.19 R\$/kWh. Profitability is satisfactory at 36 ton/day over a five year period. At 28 ton/day, profitability is satisfactory over a period of 10 years. Sensitivity analysis indicates that a 5% electricity tariff reduction could render a 36 ton/day scenario unfeasible over five years. A scenario involving 28 ton/day would thus be unfeasible over 10 years.

Keywords: Biogas. Power generation. Economic feasibility study. Pig farming. Sustainable development goals.

RESUMEN

Los residuos de la cría de cerdos se pueden utilizar para la producción de energía mediante el uso de biogás. No obstante, en Brasil, el tercer productor de carne porcina más grande del mundo, este potencial generalmente se desperdicia. En el presente estudio pretendemos discutir la posibilidad económica de invertir en plantas de producción de biogás y electricidad para los productores porcinos, ya que los productores suelen afirmar que dicha inversión es inviable. El método utilizado es el análisis de inversiones y cuenta con los indicadores TIR, VAN, Payback y LCOE. Entre los resultados tenemos que: en cinco años la TIR es del 42% y el VAN de R\$ 306.500 para el escenario de 47t/d; el LCOE promedio es de 0,19 R\$/kWh; la rentabilidad es satisfactoria en cinco años a partir de 36 t/d, y en 10 años a partir de 28 t/d. El análisis de sensibilidad indica que una reducción del 5% en la tarifa eléctrica hace inviable el escenario de 36 t/d en cinco años y 28 t/d en 10 años.

Palabras clave: Biogás. Generación de energía. Estudio de factibilidad económica. Pecuaria de porcinos. Objetos del desarrollo sostenible.

INTRODUÇÃO

O resíduo do metabolismo dos suínos é um poluente para o solo, o ar e principalmente para os mananciais. O tratamento e destinação adequados deste resíduo representam um grande desafio para produtores rurais. Uma das opções disponíveis para o tratamento e destinação destes resíduos é a utilização de reatores de digestão anaeróbica (DA), com os quais é possível tanto o tratamento biológico dos resíduos quanto a exploração econômica do potencial energético do biogás e, adicionalmente, do fertilizante nutritivo que é um dos resultantes do processo (NEUFFER, 2004).

A DA se resume a uma ação coordenada e complexa de microrganismos que digerem e transformam a matéria orgânica em, essencialmente, metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Sua eficiência está subordinada às condições propiciadas pelo reator, tais como ausência de oxigênio, temperatura, homogeneidade do esterco, tempo de retenção e abastecimento do substrato. Qualquer mudança nestes fatores pode diminuir consideravelmente a eficiência do tratamento e até mesmo resultar em falhas (AL SAEDI *et al.*, 2008).

Segundo GEF Biogás Brasil (2019), somente no Estado brasileiro do Paraná a suinocultura tem um potencial de produção de biogás estimado em 255 milhões de m³ por ano. Isto equivale a 76 GWh por ano ou o suficiente para suprir o consumo anual de 557 milhões de habitantes em média. Deve-se destacar que 66% dos abates de suínos ocorrem nos estados da Região Sul do Brasil (dados de 2015), e em termos de rebanho esta região concentra aproximadamente 20 milhões de cabeças ou 49% de todo o rebanho nacional, conforme dados da SEBRAE/ABCS (2016).

Em relação às plantas de biogás instaladas, é preciso lembrar que muitos dos biodigestores construídos no Brasil não funcionam adequadamente, segundo critérios técnicos. Isto porque foram construídos de forma precária, com tecnologia defasada, a fim de reduzir custos e facilitar a sua construção. Como resultado, tem-se uma opinião negativa por parte dos produtores rurais sobre os investimentos em biodigestores, os quais são frequentemente diagnosticados como caros, ineficazes e deficitários (KUNZ; OLIVEIRA, 2006; JENDE *et al.*, 2016).

Desse modo, é importante avaliar o dimensionamento apropriado das plantas de biodigestores, bem como seus retornos financeiros e custos evitados de eletricidade. Adicionalmente, deve-se mensurar o uso e o tratamento do resíduo poluente. O dimensionamento da planta de processamento de resíduo-biogás-eletricidade depende do porte ou tamanho da produção de suínos.

Sendo assim, o objetivo geral deste estudo é avaliar o retorno financeiro de um biodigestor com características preestabelecidas, que atua no tratamento e aproveitamento energético de dejetos suínos por meio da combustão e geração distribuída de eletricidade. Para atender a este objetivo geral impõem-se os seguintes objetivos específicos:

- apresentar as características técnicas do biodigestor para plantas produtivas suficientes para médios produtores rurais suinícolas (que significam a maior parte dos pecuaristas paranaenses);
- apresentar quatro cenários mais prováveis de produção de dejetos de suínos;
- calcular indicadores produtivos e financeiros: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), tempo para retorno do investimento (*Payback*) e custo nivelado de eletricidade (LCOE);
- estimar a quantidade mínima de resíduos compatível com a lucratividade do investimento em 5 e 10 anos.

A relevância do estudo se respalda na dimensão econômica da atividade suinícola e do seu potencial de geração de eletricidade e desenvolvimento socioeconômico, especialmente na região do Sul do Brasil. Apesar de ser uma técnica antiga e eficiente, grande parte dos produtores de suínos brasileiros não faz uso da DA. Ao contrário de alguns países, a exemplo da Alemanha, onde existem mais de 9 mil biodigestores em funcionamento (FACHVERBAND BIOGAS, 2017).

Além desta Introdução, o presente texto contém outras quatro seções. A primeira delas trata dos benefícios do aproveitamento energético através do biogás e apresenta uma revisão de literatura. Por sua vez, a seção 2 descreve os métodos utilizados para caracterizar o biodigestor e a planta de geração de energia e estimar sua viabilidade econômica, a fim de satisfazer aos objetivos do trabalho. A terceira parte do estudo traz os resultados bem como uma discussão sobre eles, e, por fim, têm-se as conclusões acerca da pesquisa.

1 O BIOGÁS - ENERGIA RENOVÁVEL E ECONOMIA DE RECURSOS

Na atualidade existe uma procura intensa por novas formas de produção de energia, uma vez que as matrizes energéticas dos países estão sendo repensadas dado o encarecimento de alguns insumos (combustível fóssil, gás, carvão etc.) e também por demandas e restrições ambientais. Neste sentido, existe uma pressão crescente das sociedades, especialmente as desenvolvidas, por formas mais limpas e baratas de produção de energia (BREETZ; MILDENBERGER; STOKES, 2018).

Neste cenário de preferências sociais por fontes mais limpas de energia encontram-se soluções tecnológicas que transformam passivos ambientais em insumos para atividades socioeconômicas. Um exemplo disso é a transformação dos resíduos da atividade de criatórios animais (bovinos, suínos, aves etc.) em biogás e a partir deste produto existe a possibilidade de geração de energia elétrica (LIMA *et al.*; 2020; PARKER, 2021).

De acordo com Al Seadi *et al.* (2008), a produção e aproveitamento energético do biogás, oriundo de resíduos de animais na agroindústria, é uma forma de energia renovável que traz benefícios adicionais não encontrados em outras fontes. Dentre estes, destacam-se:

- conversão do passivo ambiental (esterco) em geração de receita adicional;
- redução da emissão atmosférica de CH₄ (gás metano), NH₄ (amônia) e compostos de nitrogênio e de enxofre;
- produção de biofertilizante de alta qualidade para o solo; e
- eliminação de odores e da proliferação de insetos.

Além do uso e descarte adequado do resíduo, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS-Brasil), o uso deste tipo de fertilizante organomineral melhora a estrutura do solo ao adicionar matéria orgânica, da qual pode ser deficiente, e proporciona maior produtividade para as lavouras (CRUZ *et al.*, 2017).

Por outro lado, o biogás gerado no processo é facilmente armazenável e pode gerar eletricidade e energia térmica 24 horas por dia, sem depender de condições climáticas. É, portanto, uma fonte de energia “despachável” (produz energia constantemente sem dependência de fatores externos).

Adicionalmente, a geração de energia pelo biogás é uma solução adequada para unidades pecuárias com expressivo consumo de eletricidade e, consecutivamente, auxilia o setor energético a suportar a demanda elétrica em horários de pico, usualmente entre as 19 e 22 horas (ANEEL, 2019).

Entretanto, este processo de transformação de resíduos animais em biogás e eletricidade necessita de investimentos. Logo, a viabilidade financeira do processo de produção de biogás e geração de energia elétrica é importante para os produtores de suínos. Neste sentido, esses produtores somente farão tais investimentos se esta atividade se mostrar financeiramente viável. Esta viabilidade financeira, como qualquer investimento em capital fixo, depende do valor do investimento e do retorno do capital investido. Mas, também depende da solução tecnológica adotada e das condições climáticas às quais a produção de suínos e seus resíduos está submetida, ou seja, a localização geográfica da atividade (GONÇALVES; 2018).

Na literatura recente sobre o tema, existem alguns estudos sobre a viabilidade financeira da conversão de resíduos da suinocultura em biogás e eletricidade. Mariano Neto *et al.* (2019) estudaram três projetos localizados no Brasil e implantados para produção de biogás e eletricidade baseados nos resíduos de suínos. Os autores estimaram os indicadores econômico-financeiros e concluíram que o sistema de produção de biogás e eletricidade é economicamente viável quando todo o biogás produzido é quase que totalmente utilizado na produção de eletricidade.

Cervi *et al.* (2010) estudaram o uso de biodigestores para produção de biogás e energia elétrica em uma agroindústria brasileira com 2.300 suínos em terminação localizada em São Manuel, São Paulo. Os autores concluíram que o sistema de produção de biogás é viável do ponto de vista econômico se o consumo de energia elétrica for de 35 kWh por dia, em média, pois com isso a taxa interna de retorno (TIR) é de 9,34% ao ano. Entretanto, o projeto não contempla a possibilidade de comercializar a energia com as concessionárias de energia elétrica.

Lindemeyer (2008) estudou uma granja de suínos em Concórdia, Santa Catarina, com 2.500 animais e identificou que o sistema resíduos-biogás-eletricidade é economicamente viável e o investimento é amortizado em pouco mais de 12 anos com uma taxa de retorno de 14% ao ano. Este projeto contempla a comercialização de energia elétrica e consumo na propriedade rural, tanto de biogás quanto de energia elétrica, portanto com custos evitados pelo produtor rural.

Antonio (2016) pesquisou 22 suinocultores em diferentes regiões do Estado brasileiro de Minas Gerais e identificou que algumas granjas não se mostraram viáveis economicamente em decorrência de falhas no manejo do plantel cujas consequências são a entrada de resíduos no biodigestor fora das especificações, tendo como consequência uma menor produção de biogás e energia elétrica. Contudo, na maioria das granjas, daqueles produtores rurais que adotam manejo adequado, estes obtêm viabilidade econômica pois conseguem maior produtividade na geração de energia. O estudo ainda identificou redução significativa na emissão dos gases de efeito estufa.

Diel *et al.* (2020) analisaram uma granja de suínos no município de Santo Cristo no Estado do Rio Grande do Sul que produz biogás e energia elétrica a partir dos resíduos de um plantel de 1.480 matrizes e 3.310 leitões. A taxa de retorno do projeto é de 26% e o investimento retorna em seis anos.

Zhou *et al.* (2021) estudaram três plantas de produção de biogás e energia na Alemanha e outras três na China, com sistemas diferentes de conversão de resíduos de suínos e de outros animais em energia. Na Alemanha os projetos analisados são viáveis e têm taxa interna de retorno entre 8% e 22%. Por outro lado, na China todos os projetos obtiveram TIRs negativas (projetos inviáveis economicamente), mas recebem subsídios governamentais que os mantêm em funcionamento.

Salerno *et al.* (2017) pesquisaram uma planta de produção de biogás e geração de energia na Itália. A TIR estimada para o projeto é de 26% e o tempo de retorno do capital é de 3,7 anos. Outros dois cenários consideram a aplicação de tarifas sobre o produto e subprodutos das plantas de biodigestão, o que reduziu a TIR para 17% e 7% e 5 e 11 anos de retorno do capital, respectivamente. Contudo, em todos os cenários se mantém a viabilidade econômica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A estimativa de resultados robustos e aplicáveis em termos de análise técnica e econômica necessita de informações sobre o dimensionamento e características desejáveis do biodigestor e as condições financeiras do negócio. Para tanto, após definidas as características técnicas do equipamento, deve-se obter um orçamento detalhado que represente os gastos distribuídos ao longo do tempo de implantação, além de outros custos e receitas. Além disso, deve-se considerar outros indicadores financeiros para medir a viabilidade financeira (estimados no Microsoft Office Excel).

2.1 A PLANTA DE BIODIGESTÃO

A escolha do tipo de reator, dada a região geográfica, considerou o tipo de substrato e o elevado nível de umidade, isto porque as condições climáticas importam, especialmente pela intensidade dos invernos. Para tanto, estimou-se uma planta de produção de biogás e energia elétrica para as regiões produtivas de suínos do sul do Brasil onde o inverno não é longo ou rigoroso.

Para o orçamento da planta de produção foi preciso estimar o volume total do tanque de digestão e elencar os equipamentos desejados. O arranjo técnico dos equipamentos escolhidos seguiu a orientação encontrada no Guia Prático do Biogás (FNR, 2010).

A escolha do volume do reator se deu considerando o tamanho médio de um suinocultor brasileiro e o índice diário de produção de dejetos de um suíno em fase de terminação (maior proporção dos produtores de suínos no Brasil). O tamanho médio do suinocultor, em termos de animais, foi identificado no Mapeamento da Suinocultura Brasileira (SEBRAE; ABCS, 2016).

O volume do reator foi calculado através da equação 1 de Tempo de Retenção Hidráulica (TRH).

$$V [m^3] = P \times Q \left[\frac{m^3}{d} \right] \times TRH [d] \quad (1)$$

em que:

V = volume do reator a ser encontrado em m^3 ;

P = tamanho do plantel ou quantidade de animais;

Q = vazão de entrada do resíduo no reator;

TRH = tempo de retenção hidráulica.

2.2 RETORNO ECONÔMICO-FINANCEIRO

Para uma avaliação da viabilidade financeira do investimento foram empregadas estimativas para a projeção dos fluxos de caixa futuro, de modo a estimar o retorno financeiro. Foram considerados também a correção monetária ao longo do período, a depreciação do maquinário, o pagamento do financiamento bancário, as despesas operacionais e pagamentos de impostos. O objetivo é obter a estimativa do tempo para a recuperação do investimento (*payback*) e comparar o retorno do investimento físico com alternativas de investimentos financeiros de baixo risco (por exemplo, aplicações em fundos de renda fixa conservadores – rentabilidade próxima à taxa Selic).

2.2.1 Receita Diária e Anual

A receita da planta de produção é designada Receita Operacional Bruta (ROB). Trata-se da remuneração pela energia elétrica exportada para a concessionária de energia elétrica multiplicada pela quantidade de dias de operação em um ano. Conforme descrito por Motta e Calôba (2002) e Assaf Neto (2020), a ROB pode ser calculada por:

$$ROB \left[\frac{R\$}{a} \right] = Receita_{Exp} \left[\frac{R\$}{d} \right] * Df \left[\frac{d}{a} \right] \quad (2)$$

em que:

ROB = Receita Operacional Bruta;

$Receita_{exp}$ = receita diária da planta medida em termos monetários (R\$ - Reais);

$Df \left[\frac{d}{a} \right]$ = dias de funcionamento anual do equipamento.

2.2.2 Depreciação

A depreciação de ativos é considerada uma despesa contábil e deve constar da projeção do fluxo de caixa (FONSECA, 2012).

$$DEP \left[\frac{R\$}{a} \right] = \frac{CAPEX_{maq} [R\$]}{[a]} + \frac{CAPEX_{CHP} [R\$]}{[a]} + \frac{CAPEX_{fer} [R\$]}{[a]} \quad (3)$$

em que:

DEP = depreciação em unidades monetárias (R\$ - Reais) por ano;

$CAPEX_{maq}$ = valor do investimento com o equipamento de biodigestão;

$CAPEX_{CHP}$ = valor do investimento com o grupo gerador de energia;

$CAPEX_{fer}$ = valor do investimento com o tanque de biodigestão;

a = anos de depreciação do capital referido no numerador.

2.2.3 Despesas Operacionais

O reator funciona em grande parte automaticamente. Contudo, se faz necessária certa quantidade de mão de obra (MDO). Conforme Motta e Calôba (2002), a equação 4 apresenta a forma de apurar o gasto com a MDO para operação do biodigestor, também chamado de despesa operacional (OP):

$$OP \left[\frac{R\$}{ano} \right] = MDO \left[\frac{h}{d} \right] * MDO \left[\frac{R\$}{h} \right] * Dt \left[\frac{d}{a} \right] \quad (4)$$

em que:

OP = despesas operacionais (R\$ por ano);

$MDO \left[\frac{h}{d} \right]$ = quantidade de horas de trabalho por dia;

$MDO \left[\frac{R\$}{h} \right]$ = valor pago por hora de trabalho da MDO;

$Dt \left[\frac{d}{a} \right]$ = dias de trabalho anual da MDO.

2.2.4 Manutenção, Seguro e Casualidades

Assume-se que a manutenção e seguros são necessários para a operação de qualquer equipamento e, ainda, que casualidades podem acontecer e, por isso, devem ser consideradas. Para tanto deve-se estimar o MSC, segundo Bioköhler (2017), como segue:

$$MSC \left[\frac{R\$}{a} \right] = (CAPEX_{total} [R\$]) \times d \quad (5)$$

em que:

$MSC \left[\frac{R\$}{a} \right]$ = despesas de manutenção, seguro e casualidades (por ano);

$CAPEX_{total}$ = investimento total em capital fixo;

d = taxa de reserva anual de capital para despesas com manutenção, seguro e casualidades.

2.2.5 Lucro ou Prejuízo

Para calcular o resultado líquido do período, também chamado de lucro (quando positivo) ou prejuízo (quando negativo), faz-se necessário somar as receitas e diminuir as despesas e custos. Para isso, utiliza-se a receita operacional líquida (ROL) e dela se subtraem todas as despesas (FONSECA, 2012; MOTTA; CALÔBA; 2002).

$$RESL = ROL - CD \quad (6)$$

em que:

$RESL$ = resultado líquido do período (em R\$);

ROL = resultado operacional líquido (em R\$);

CD = custos e despesas (em R\$), descritos pelas fórmulas 3, 4 e 5 acrescidos da despesa financeira com juros do financiamento.

2.2.6 Valor Presente Líquido (VPL)

O cálculo do Valor Presente Líquido é realizado através de um método de desconto financeiro que traz para valor presente o fluxo de caixa futuro, corrigido pela Taxa Mínima de Atratividade - TMA (FONSECA, 2012).

Para calcular o VPL em um fluxo de caixa não uniforme utiliza-se a equação 7 (BUDEL, 2017):

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0 \quad (7)$$

em que:

VPL = valor presente líquido;

FC_t = fluxo de caixa no ano t ;

FC_0 = montante do investimento inicial;

i = TMA [%];

n = período estimado para o projeto segundo cenário escolhido.

2.2.7 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Para calcular a TIR utiliza-se a fórmula do VPL (7), igualando-o a zero, e resolve-se a igualdade para encontrar a taxa “i”. No período de tempo em que o $VPL=0$, a interpretação é de que o projeto “se pagou”; em outras palavras, os fluxos de caixa foram descontados de forma a não produzirem lucro ou prejuízo. Consequentemente, a TMA “i” é igual à TIR, ou seja, registra viabilidade financeira minimamente satisfatória para planta produtiva, considerando a correção monetária ao longo do tempo (FONSECA, 2012; ASSAF NETO, 2012).

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - FC_0 = 0 \quad (8)$$

FC_t = fluxo de caixa no ano t;

FC_0 = montante do investimento inicial;

TIR = taxa interna de retorno;

n = período estimado para o projeto segundo cenário escolhido.

2.2.8 Tempo de Retorno do Investimento (Payback)

O Payback Descontado considera a correção monetária através da TMA ao longo do tempo a fim de tornar os resultados o mais reais possível e, assim, mitigar o risco de erro de previsão do projeto (BRUNI; FAMÁ; 2003).

Portanto, para determinar o tempo de retorno do investimento busca-se o período (ano) em que o fluxo de caixa descontado acumulado deixa de ser negativo, conforme a equação 9:

$$\sum_{t=1}^i \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \geq FC_0 \quad (9)$$

em que:

FC_0 = fluxo de caixa acumulado do primeiro período, aquele em que a aplicação do capital é feita;

FC_t = fluxo de caixa acumulado no ano “t”;

TMA = taxa mínima de atratividade.

2.2.9 Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE)

O custo da eletricidade gerada por uma planta de geração de energia é calculado utilizando a fórmula do Custo Nivelado de Eletricidade ou *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). Este custo compara a combinação de capital investido, custos de operação e manutenção, capacidade instalada e outras despesas variáveis, com a quantidade de energia produzida.

Este custo não considera, entretanto, a depreciação de ativos e externalidades ambientais ou incertezas do futuro. Contudo, é um bom indicador para comparar

opções de investimento, pois traz o custo médio da produção ($\frac{R\$}{kWh}$) ao longo do tempo (NREL, 2018). Para calcular o LCOE, tem-se a equação 10:

$$LCOE = \frac{(CAPEX [R\$] \times CCF [\frac{\%}{ano}]) + OP [\frac{R\$}{a}] + MSC [\frac{R\$}{a}]}{Energia_e [\frac{kWh}{d}] \times Df} \quad (10)$$

em que:

$LCOE$ = custo nivelado de eletricidade (R\$/kWh);

$CAPEX_{total} [R\$]$ = valor do capital fixo total de R\$ 348.332,66;

$CCF [\frac{\%}{a}]$ = fator de amortização de capital igual a 14%;

$OP [\frac{R\$}{a}]$ = despesas operacionais do reator;

$MSC [\frac{R\$}{a}]$ = despesas com manutenção, seguro e casualidades;

$Energia_e [\frac{kWh}{d}]$ = quantidade de eletricidade exportado pelo reator à rede da concessionária de energia elétrica;

$Df [\frac{d}{a}]$ = dias de funcionamento anual do equipamento.

2.2.10 Simulações: volume mínimo de resíduos e análise de sensibilidade

Para o cálculo considerou-se um produtor de suínos cujo plantel varia entre 3.000 e 10.000 cabeças de suínos em terminação e a aquisição do biodigestor com o motogerador de 75 kW de potência instalada. As análises dos indicadores de retorno econômico foram feitas para os períodos de 5 e 10 anos após o investimento inicial (logo, são dois cenários). O C5 indica a quantidade de lodo necessária para o investimento se pagar em cinco anos. Analogamente, o C10 faz o mesmo para 10 anos.

Além disso, incorporou-se uma análise de sensibilidade para contemplar, em certa medida, as incertezas quanto à variação no preço da energia elétrica e que interfere nos resultados econômico-financeiros. Para tanto, simularam-se os impactos nos indicadores financeiros resultantes da elevação e da redução no preço da tarifa de energia da ordem de 5%. Esta é a tarifa paga ao produtor rural.

3 RESULTADOS

3.1 PARÂMETROS GERAIS

O valor da vazão de entrada do resíduo (V) no reator (equação 1) considerado nesta pesquisa é de $0,0046 [\frac{m^3}{animal \times d}]$, conforme exposto por Cibogas (2017). Ademais, o tempo de retenção hidráulica (TRH) empregado é de 40 dias, de acordo com a informação contida em Appels (2008).

Para as receitas anual e diária (equação 2), assume-se $Df = 330$, que equivale à operação em dias no ano para a geração de eletricidade, em função da produção de biogás. Os 35 dias restantes são destinados a pequenos reparos e imprevisibilidades, segundo o Instituto Via Pública (2012).

Em propriedades rurais os empregados geralmente executam mais de uma função. Por isso, presume-se que a MDO não será exclusiva para operação biodigestor e cuja jornada de trabalho é de $Dt = 330$ dias por ano (equação 4). Esta quantidade de dias considera a inoperabilidade da planta de biodigestão para manutenção, férias dos trabalhadores e feriados. Ademais, considerou-se o valor de R\$ 10,42 por hora de trabalho, com correção monetária anual de 3% e a quantidade de horas de trabalho por dia em 4 horas por dia (WU *et al.*, 2016).

Para o prêmio de risco MSC - manutenção, seguro e casualidades – (equação 5) empregou-se a taxa $d = 6\%$ a.a. do CAPEX total para esses três itens, conforme recomendado por Bioköhler (2017). Esta taxa cobre eventuais falhas humanas (uso incorreto do equipamento) e naturais (descargas elétricas por raios, chuvas de granizo, que causam danos ao equipamento etc.) que podem ter impacto negativo no funcionamento (danos) dos equipamentos e que geram ações de manutenção.

Para o investimento em análise, dada a situação financeira da maioria dos produtores de suínos, estes não dispõem de recursos próprios para a totalidade do investimento. Para aqueles produtores que dispõem de recursos próprios, em decorrência das taxas de juros subsidiadas, existe a preferência em financiar no banco ao invés de investir seu capital. Sendo assim, simulou-se um financiamento bancário na linha de crédito INOVAGRO do Banco do Brasil S/A. Em simulação feita em julho de 2021, esta linha de crédito ofereceu aos produtores rurais juros de 7% a.a., financiamento de 100% do projeto com amortização pelo Sistema de Amortização Constante (SAC) e com até três anos de carência (BANCO DO BRASIL, 2021). O valor total orçado e financiado tem carência de 1 ano, incidência de juros durante a carência e prazo de liquidação de 10 anos em 9 parcelas, compostas por juros e amortização. A despesa financeira média com os juros das parcelas do financiamento estimada é de R\$ 57.051,91.

A TMA (Taxa Mínima de Atratividade) utilizada para este estudo é de 6,5% a.a. (Expectativa da taxa Selic do Banco Central para 2021 – remuneração de títulos públicos). Esta taxa é empregada para os indicadores de viabilidade financeira, especialmente nas equações 7 e 8. Contudo, alerta-se que é elevada a incerteza dos resultados obtidos neste estudo quanto ao retorno do capital investido, especialmente em decorrência das variações ocorridas nas taxas de juros praticadas na linha de crédito e na taxa mínima de atratividade.

3.2 ORÇAMENTO DO INVESTIMENTO

O orçamento utilizado para a análise econômica foi elaborado pela empresa Bioköhler de Marechal Cândido Rondon, Paraná. Foram considerados como características necessárias ao equipamento, para elaboração do orçamento, um volume de 2.000 m³ para o tanque de digestão e 2.000 m³ para a lagoa de armazenamento do digestato, conforme se observa na tabela 1.

A tabela 1 apresenta os valores por grupo de gastos do projeto. O orçamento é dividido em três partes: construção do reator de biodigestão por R\$ 142.085, tratamento do biogás por R\$ 26.589, e geração de eletricidade por R\$ 233.100.

O projeto total soma R\$ 401.775,50, sendo que 58% envolve a geração de eletricidade, 35% a construção do reator e 7% o tratamento do gás. Todo o investimento em capital fixo se dá no primeiro período (ano) do projeto e, assim, nos demais períodos ocorre o abatimento (amortização do capital investido) via saldo líquido entre receitas e despesas.

TABELA 1 - ORÇAMENTO DO BIODIGESTOR DE 2.000 m³

ITEM	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO (R\$)	VALOR TOTAL (R\$)
Geomembrana 1 mm	1.400	21,4	29.960
Geomembrana 1,25 mm	1.180	31,5	37.170
Acesso agitador	2	3.425	6.850
Tube Ocre L2	2	535	1.070
Agitador L2 10 CV	1	23.540	23.540
Painel Agitador	1	1.337	1.337
Válvula do Biogás	2	1.819	3.638
Flare	1	4.815	4.815
Saída de Biogás 4"	3	535	1.605
MDO	1	32.100	32.100
TOTAL TANQUE (Construção do Reator)			142.085
Secador de biogás	1	18.725	18.725
Compressor de ar	1	2.247	2.247
Medidor de Ar	1	1.177	1.177
Tubos e conexões	1	695	695
MDO	1	3.745	3.745
TOTAL PÓS-TRATAMENTO (Tratamento do Biogás)			26.589
Motogerador 75 kW	1	155.000	155.000
Material Elétrico	1	6.000	6.000
Escavação	30	260	7.800
Geração Distribuída - equipamentos	1	42.504	42.504
Geração Distribuída - MDO	1	52.300	9.796
Casa de Máquina	1	12.000	12.000
TOTAL GRUPO GERADOR (Geração de Energia Elétrica)			233.100

FONTE: Bioköhler (2017)

NOTA: Elaboração dos autores.

A geração de eletricidade é a parte mais onerosa do projeto, pois computa a aquisição de um motogerador novo de 75 kW no valor de R\$ 155.000, ou seja, este motogerador é mais oneroso que toda a construção do reator de biodigestão. Além disso, existe também o gasto de R\$ 52.300 para possibilitar conexão com a rede de distribuição de eletricidade, através de geração distribuída. Isto envolve os equipamentos de segurança de rede e de qualidade da eletricidade exigidos pela concessionária de distribuição de energia elétrica.

Para os investimentos em capital e depreciação (equação 3), segundo orçamento efetuado tem-se: a) (valor do investimento com o equipamento de biodigestão) no valor de R\$ 101.039,66, com depreciação em 16 anos; b) (valor do investimento com o grupo gerador de energia) no valor de R\$ 155.000, com depreciação em 10 anos; c) (valor do investimento com o tanque de biodigestão)

no valor de R\$ 92.293,00, com depreciação em 20 anos (BIOKÖHLER, 2017). Sendo assim, o (investimento total) tem valor de R\$ 348.332,66. A depreciação dos equipamentos é uma estimativa média sugerida pelo fornecedor de equipamentos para que o produtor rural substitua os equipamentos dado o desgaste dos mesmos ao longo do tempo.

3.3 A MODELAGEM FINANCEIRA

A modelagem financeira avalia o retorno financeiro para biodigestores na suinocultura. Esta modelagem considera a configuração dos *inputs* e a caracterização do biodigestor, do resíduo a ser tratado, a eficiência do motogerador e também itens econômico-financeiros, tais como: a) valor total do investimento; b) operação do biodigestor; c) condições de financiamento; d) operacionalidade anual; e e) tarifa elétrica. Ressalta-se que esses *inputs* são as características fundamentais do projeto, sejam elas de origem técnica (da operação para produção de biogás e energia elétrica) ou parâmetros econômico-financeiros. Os parâmetros imputados se encontram na tabela 2.

TABELA 2 - PARÂMETROS DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE BIODIGESTORES NA SUINOCULTURA

PARÂMETROS DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	UNIDADE	VALOR
Temperatura do lodo	°C	20
Temperatura no interior do reator	0°C	40
Consumo do reator	kWh/d	40
Perda de calor do reator para o ambiente	%	30
Operacionalidade	d/a	330
Tempo de retenção hidráulica	D	40
Tempo morto	D	4
Caracterização do Efluente		
Densidade	t/m ³	1,026
Calor específico	kJ/(kg x oT)	4,18
Sólidos totais (ST)	%	4
Sólidos voláteis (SV) / ST	%	77,15
Produção de biogás	m ³ /t.VS	507
Caracterização do Biogás e Conversão em Energia		
Concentração de CH ₄ no biogás	%	60
Potencial calorífico CH ₄	kWh/m ³	9,97
Eficiência elétrica do motogerador	%	25
Eficiência térmica do motogerador	%	45
Tarifa energia elétrica B2-rural com impostos	R\$/kWh	0,7318
Inputs Financeiros do Investimento		
Custo total projeto com Mão de Obra (MDO)	R\$	401.774
Montante financiado	%	100
CAPEX maquinário	R\$	101.039,66
Parâmetros das Condições de Operação		
CAPEX fermentador	R\$	92.293
CAPEX motogerador (CHP)	R\$	155.000
Horas operação MDO	h/d	4
Preço operação MDO	R\$/mês	2.000
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	% a.a.	6,5
Juros do financiamento	% a.a.	6,5

FONTES: BIOKÖHLER (2017), APPELS (2008), FNR (2010), CIBIOGAS (2018), AL SAEDI (2008), COPEL (2020), BANCO DO BRASIL (2021), CIBIOGAS (2018)

NOTA: Elaboração dos autores.

Os *outputs* de cálculo são os resultados operacionais e financeiros abordados na seção Materiais e Métodos. Os resultados operacionais exibem o volume de biogás e metano produzido, por dia. Além disso, esses *outputs* também apresentam a geração de eletricidade, calor, biofertilizante e créditos de carbono.

Como a monetização proposta do biogás é a produção de eletricidade por geração distribuída em autoconsumo junto à carga, o montante de energia produzido é convertido em potencial calorífico de metano - que serve de combustível ao motogerador (em energia elétrica) e, por fim, em créditos de eletricidade que são abatidos da fatura de energia elétrica do produtor e são válidos por 60 meses.

Primeiramente, tem-se a etapa de identificação do fornecimento de dejetos para a planta de biodigestão. Posteriormente, a partir desta informação, é possível então fazer a análise de viabilidade econômica da planta de biodigestão e geração de energia.

3.4 ESTIMATIVA DA PLANTA DE BIODIGESTÃO

Segundo o Mapeamento da Suinocultura Brasileira (SEBRAE; ABCS, 2016), a frequência dos portes (tamanho) dos produtores registra que aqueles com plantel de 3 a 10 mil suínos representam 43% da produção suinícola nacional. Existe também uma expressiva relevância de 22% do total da Faixa 1 que abrange produtores de 0 a 2 mil suínos. Contudo, como a vazão de resíduos é essencial para o sucesso da planta de biodigestão, foi considerado para o estabelecimento dos cenários o mínimo (C_{min}) e o máximo (C_{max}), para a modelagem financeira, produtores na faixa de 3 e 10 mil animais.

Ao aplicar esses valores na Equação (1) de TRH, foi estimado o limite inferior de volume (para 3.000 animais) de um reator, ou seja, 552 m^3 com vazão de 14 m^3 por dia de dejetos, considerando o índice de produção de dejetos de $0,0046 \text{ m}^3$ por animal por dia, com 40 dias de retenção hidráulica. Analogamente, para o limite superior de 10 mil animais o volume do tanque de biodigestão deve ser de 1.840 m^3 e a vazão de 46 m^3 por dia de dejetos.

Com isso foi possível criar os cenários *inputs* da modelagem financeira. Além dos cenários de limite inferior ($C_{min} = 14$ [t dejetos/dia]) e superior ($C_{max} = 47$ [t dejetos/dia]) outros dois cenários foram simulados, fazendo a conta ao contrário, a fim de descobrir a vazão de resíduos necessária para que o investimento se pague em cinco anos (C_5) e em dez anos (C_{10}), ou seja, em que o $VPL = 0$.

Os valores dos cenários servem para aferir os resultados da etapa de viabilidade financeira a fim de descobrir, por exemplo, se o investidor que possui uma vazão igual ao C_{min} terá um retorno satisfatório do investimento ou não.

3.5 INDICADORES DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO INVESTIMENTO

Primeiramente, foram calculados os índices para o Cmin e Cmax a fim de determinar a viabilidade econômica do biodigestor orçado para um produtor com 3.000 suínos (Cmin) e com 10.000 suínos (Cmax). Os resultados, na tabela 3, demonstram que tal biodigestor registra um retorno financeiro insatisfatório para o produtor com 3.000 suínos, já que o VPL de cinco ou dez anos está expressivamente negativo e o *payback* não é atingido em menos de 20 anos.

TABELA 3 - RESULTADOS DA MODELAGEM FINANCEIRA PARA PRODUTORES COM 3.000 E 10.000 SUÍNOS COM ANÁLISE DE SENSIBILIDADE (+/- 5%)

ITEM	UNIDADE	-5% Cmin	Cmin	+5% Cmin	-5% Cmax	Cmax	+5% Cmax
Volume de resíduos	t/dia	14	14	14	47	47	47
Equivalente em animais	nº suínos	3.000	3.000	3.000	10.000	10.000	10.000
Produção de CH ₄	m ³ /dia	162	162	162	544	544	544
Geração líquida de eletricidade	kWh/dia	364	364	364	1.316	1.316	1.316
Receita líquida	R\$ (mil)/ano	84	88	92	302	318	334
TIR 5 anos*	% a.a.	-	-	-	35%	42%	49%
VPL 5 anos	R\$ (mil)	-614	-596	-580	244	307	369
TIR 10 anos ⁽¹⁾	% a.a.	-	-	-	49%	55%	61%
VPL 10 anos	R\$ (mil)	-727	-696	-664	836	950	1.064
<i>Payback</i> ⁽¹⁾	anos	-	-	-	3,3	3	2,8
LCOE	R\$/kWh	0,7	0,7	0,7	0,19	0,19	0,19

FONTES: Os autores (2020)

(1) O fluxo de caixa do cenário Cmin é negativo em todos os períodos projetados. Por isso, o resultado do *payback* e TIR 5 e 10 anos não podem ser estimados.

Por outro lado, para o produtor com 10.000 suínos em alojamento os resultados da modelagem de viabilidade mostram um excelente retorno do capital investido. Com uma produção estimada de 544 m³ de metano por dia, o reator se pagaria em apenas três anos, e em cinco anos já traria um retorno financeiro líquido de R\$ 306 mil. Isso equivale a uma TIR de 42% a.a., ou seja, um retorno cerca de 6,4 vezes o escolhido para a Taxa Mínima de Atratividade (TMA = 6,5% a.a.).

Produziu-se adicionalmente uma análise de sensibilidade da variável tarifa de energia elétrica para menos 5% e mais 5% de variação a partir da tarifa atual. Verifica-se que mesmo com um aumento no limite superior da análise de sensibilidade o Cmin se mantém com retorno de investimento insatisfatório. Por sua vez, nota-se que a variação de 5% na tarifa resultou em uma variação de 20% no VPL cinco anos e de 12% no VPL dez anos.

Pode-se verificar graficamente o fluxo de caixa acumulado descontado para Cmin e Cmax no gráfico 1. Ele apresenta o andamento do projeto segundo cenários, permitindo, portanto, verificar os desembolsos de capital e os saldos, já descontados pela TMA, o que determina o tempo de retorno do capital.

GRÁFICO 1 - FLUXO DE CAIXA ACUMULADO DESCONTADO DOS CENÁRIOS CMIN E CMAX



FONTE: Os autores (2020)

Ao se examinar o gráfico 1 é possível verificar que a curva vermelha (Cmin) em nenhum momento, ao longo dos 10 anos projetados, cruza o eixo horizontal, e que sua inclinação é negativa, ou seja, trata-se de um investimento não atrativo e sem perspectiva de retorno. Por sua vez, a curva azul (Cmax) cruza o eixo horizontal no período 3 e mantém uma inclinação positiva ao longo da projeção. Em outras palavras, o investimento estima um *payback* em três anos e geração de caixa líquida crescente para o investidor.

A tabela 4 apresenta os resultados da modelagem feita para auferir o volume de resíduos necessário para registrar um VPL igual a zero em cinco (C5) e em dez anos (C10) e análise de sensibilidade pela tarifa de energia elétrica. Ao analisar a tabela é possível perceber que para que o investidor tenha um retorno financeiro satisfatório em dez anos é preciso que ele possua um alojamento de no mínimo 5.448 suínos, a fim de produzir o volume de aproximadamente 28 m³/dia de resíduos diariamente. Desta forma, em cinco anos ele ainda estaria no negativo (receita insuficiente). Contudo, consegue pagar seu investimento precisamente em dez anos.

TABELA 4 - RESULTADOS DA MODELAGEM FINANCEIRA PARA VPL NULO EM 5 E 10 ANOS COM ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE (+ - 5%)

ITEM	UNIDADE	-5% C5	C5	+5% C5	-5% C10	C10	+5% C10
Volume de resíduos	t/dia	35,8	35,8	35,8	27,95	27,95	27,95
Equivalente em animais	núm. suínos	6.978	6.978	6.978	5.448	5.448	5.448
Produção de CH ₄	m ³ /dia	414	414	414	324	324	324
Geração líquida de eletricidade	kWh/dia	993	993	993	767	767	767
Receita líquida	R\$ (mil)/ano	228	240	252	176	185	194
TIR 5 anos	% a.a.	1%	6,5%	12%	-25%	-20,0%	-15%
VPL 5 anos	R\$	-47	0	47	-251	-215	-178
TIR 10 anos	% a.a.	22%	26,3%	31%	2,8%	6,5%	10%
VPL 10 anos	R\$ (mil)/ano	306	391	477	-66	0	66
Payback	anos	7,6	5	6	9,3	10	7
LCOE	R\$/kWh	0,26	0,26	0,26	0,33	0,33	0,33

FONTE: Os autores (2020)

Analogamente, para computar retorno financeiro satisfatório em metade do tempo, ou seja, em cinco anos, é naturalmente necessário que se produza um volume maior de metano por dia, e para isto o produtor deve possuir um plantel maior. Conforme o resultado da modelagem, o volume de resíduo necessário para registrar um *payback* de cinco anos é de aproximadamente 36 m³/dia ou o equivalente a 6.978 suínos em estágio de terminação.

Um produtor com essa quantidade de animais consegue pagar seu investimento em cinco anos. Destaca-se que com dez anos de operação tal investimento em biodigestão e geração de energia tem potencial de gerar uma TIR de 26,3%, ou seja, R\$ 391 mil de retorno líquido. Vale ressaltar que na modelagem financeira, um investimento que se paga precisamente em cinco anos, por exemplo, terá um VPL de 5 anos igual a zero, uma TIR=TMA e o *payback* será de exatamente 5 anos. Em ambos cenários apresentados na tabela 4 é possível verificar a confirmação destas premissas.

A análise de sensibilidade indica que o C5 registra uma amplitude no VPL de R\$ 47 mil, e o C10 de R\$ 66 mil. No caso do C10 o aumento da tarifa em 5% não é suficiente para viabilizar o negócio em cinco anos e, inversamente, a redução da tarifa de energia em 5% faz com que o C5 se torne não atrativo em cinco anos.

Por fim, registrou-se um custo nivelado de eletricidade (LCOE) no valor de R\$ 0,33/ kWh para o C10, ou seja, a eletricidade produzida é 55% mais barata do que a fornecida pela concessionária, no valor de R\$ 0,73/kWh. Para o C5 este indicador é ainda mais atraente, no valor de R\$ 0,26/kWh. Cabe destacar que o LCOE se mantém constante nas variações proporcionadas pela análise de sensibilidade, pois sua fórmula não leva em conta fatores de monetização ou receita, apenas custos, despesas e performance em unidades de energia.

CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, estudou-se o retorno do investimento em plantas de produção de biogás e energia para a classe de pecuaristas suinocultores do sul do Brasil de porte médio, entre 3.000 e 10.000 cabeças de suínos em fase de terminação. Isto porque representam a maioria dos produtores brasileiros, proporcionalmente. Estabeleceu-se dois cenários, cinco e dez anos, para o retorno do capital investido, com base nas estimativas de matéria orgânica gerada nas granjas, tamanho de plantel e orçamento para investimento em um biodigestor com 75kW de capacidade instalada.

O cenário temporalmente mais curto, Cmin ($14 \frac{t}{d}$), mostrou-se inviável para o projeto orçado. O VPL para cinco ou dez anos é negativo e, portanto, insatisfatório. Assim, existe um indicativo, para este cenário, de instalação de um projeto com menor capacidade instalada de geração de energia, o que reduz os custos e certamente facilita a obtenção da viabilidade econômica.

A partir dos resultados, é possível concluir que, para registrar retorno financeiro satisfatório ao investimento feito, dadas as configurações da planta de produção de biogás e energia, para um *payback* em dez anos, a propriedade rural deve gerar no mínimo $28\frac{t}{d}$ de resíduos para alimentação do reator, o que equivale a um plantel de 5.500 suínos em estágio de terminação. Paralelamente, para registrar lucro e tempo de retorno do investimento em cinco anos, a quantidade mínima deve ser 28% maior: $36\frac{t}{d}$ ou um plantel de 7.000 suínos.

Ao confrontar esses dados com o perfil do produtor suinícola brasileiro, obtém-se que tal projeto de biodigestão é viável para aproximadamente 29% das granjas do território brasileiro, 24% das granjas localizadas no Estado do Paraná, 48% daquelas situadas no Estado do Rio Grande do Sul e cerca de 20% das granjas localizadas no Estado de Santa Catarina.

No entanto, isso não quer dizer que produtores com menores ou maiores plantéis de animais não devem levar em consideração o aproveitamento energético dos resíduos de seus animais. Neste caso, estes devem investir em plantas adequadas de produção de biogás, com capacidade de produção de biogás e energia elétrica compatíveis com a produção de resíduos e que mantenham equipamentos necessários para uma boa performance técnica.

REFERÊNCIAS

AL SAEDI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas handbook**. Esbjerg, Dinamarca: University of Southern Denmark, 2008. Disponível em: <http://lemvigbiogas.com>. Acesso em: 14 jul. 2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração. ANEEL abre audiência pública para analisar revisão de regras para geração distribuída**. 2019. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/17868568. Acesso em: 11 maio 2019.

ANTONIO, A. S. **Viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás de produção de suínos de Minas Gerais**. 69 f. Dissertação (Magister Scientiae) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, 2016.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. Elsevier, v.34, p.755-781, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>. Acesso em: 17 jul. 2021.

ASSAF NETO, A. **Estrutura e análise de balanços: um enfoque econômico-financeiro**. 12.ed. São Paulo: Atlas, 2020.

ASSAF NETO, A. **Matemática financeira e suas aplicações**. 12.ed. São Paulo: Atlas, 2012.

BANCO DO BRASIL **Inovagro**. 2021. Disponível em: https://www.bb.com.br/docs/portal/dirag/Inovagro.pdf?pk_vid=40c993abb44f92e41626551639c6625b. Acesso em: 17 jul. 2021.

BIOKÖHLER. **Orçamentos, parâmetros, consumo e boas práticas de um biodigestor ótimo de 75 kW no Paraná**. Mensagem recebida por [biokohler@biokohler.com]. Comunicação pessoal com a empresa em 14 dez. 2017. (Mensagem pessoal).

BREETZ, H.; MILDENBERGER, M.; STOKES, L. The political logics of clean energy transitions. **Business and Politics**, v.20, n.4, p.492-522, 2018.

BRUNI, A. L.; FAMÁ, R. **As decisões de investimentos**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2003.

BUDEL, D. A. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos em residências**. 2017, 46 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.

CERVI, R. G. *et al.* Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica. **Revista engenharia agrícola**, v.30, n.5, p.831-844, set./out. 2010.

CIBIOGAS. Centro Internacional de Energias Renováveis. **Tecnologias para tratamento de biogás: vantagens e desvantagens das tecnologias de tratamento de biogás**. Foz do Iguaçu, PR: CIBIOGAS. 2017.

COPEL. Companhia Paranaense de Energia Elétrica. **Tarifa convencional subgrupo B2 rural**. Taxas e tarifas. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcweb/copel-distribuicao/taxas-tarifas/>. Acesso em: 17 jul. 2021.

CRUZ, A. *et al.* Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v.1, n.45, p.137-187, 2017.

DIEL, P. B. *et al.* Economic management model of electricity generated from biomass in a pig farm. **Revista engenharia agrícola**, v.40, n.2, p.132-138, 2020.

FACHVERBAND BIOGAS. **German biogas scenario: biogas basics workshop**. Disponível em: <https://app.box.com/v/IBABTT17Content>. Acesso em: 14 dez. 2017.

FNR. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. **Guia prático do biogás - geração e utilização**. 5.ed. Gülzow: FNR, 2010.

FONSECA, J. W. F. **Elaboração e análise de projetos: a viabilidade econômico-financeira**. São Paulo: Atlas, 2012.

GEF BIOGÁS BRASIL. **Projeto aplicações do biogás agroindústria brasileira**. Potencial de produção de biogás no Sul do Brasil. Foz do Iguaçu: CIBiogás, UTFPR. 2019. Disponível em: <https://databasebrae.com.br/biblioteca-relatorios-biogas/>. Acesso em: 17 jul. 2021.

GONÇALVES, M. N. **Os efeitos da temperatura na produção de biogás em biodigestores**. 2018. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, 2018.

Instituto Via Pública. **Estudo de alternativas de tratamento de resíduos sólidos urbanos: incinerador mass burne biodigestor anaeróbio**. Relatório técnico. São Paulo: Instituto Via Pública; Climate Works; NRG, 2012.

JENDE, O. *et al.* **Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil/ Probiogás**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); (ed.). Brasília, DF; Ministério das Cidades, 2016.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de política agrícola**, ano XV, n.3, p.28-35, jul./set. 2006.

LIMA, J. A. M.; *et al.* Techno-economic and performance evaluation of energy production by anaerobic digestion in Brazil: bovine, swine and poultry slaughterhouse effluents. **Journal of Cleaner Production**, v.277, dez. 2020.

LINDEMAYER, R. M. **Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica**. 2008. Relatório de estágio, Curso de Administração – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2008.

MARIANO NETO, L. Economic viability of the biogas produced on pig farms in Brazil for electric power Generation. **African Journal of Biotechnology**, v.18, n.30, p.935-945, out. 2019.

MOTTA, R. R.; CALÔBA, G. M. **Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais**. São Paulo: Atlas, 2002.

NEUFFER, D. **Anaerobe co-fermentation von konzentratenaus der textilveredlungs industrie**. 2004. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **Distributed generation energy technology operations and maintenance costs**. 2018. Disponível em: <https://bit.ly/2NfWsqq>. Acesso em: 04 jul. 2018.

PARKER, E. **Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) economic viability on swine operations**. 2021. 71 f. (Master of Science) – Department of Agricultural Economics College of Agriculture Kansas State University Manhattan, Kansas, 2021.

SALERNO, M. *et al.* Costs-benefits analysis of a small-scale biogas plant and electric energy production. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v.23, n.3, p.357-362, 2017.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas; ABCS Associação Brasileira dos Criadores de Suínos. **Mapeamento da suinocultura brasileira**. Brasília, DF: SEBRAE. 2016.

ZHOU, L. Operating performance of full-scale agricultural biogas plants in Germany and China: results of a year-round monitoring program. **Applied Sciences**, v.11, n.1271, 2021.