

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS**

SIMONE ANDREIA GUARES

**MODELO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE
BIODIGESTORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E
BIOFERTILIZANTE COM DEJETOS DA BOVINOCULTURA**

DISSERTAÇÃO

**PATO BRANCO
2020**

SIMONE ANDREIA GUARES

**MODELO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE
BIODIGESTORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E BIOFERTILIZANTE
COM DEJETOS DA BOVINOCULTURA**

**Model for technical and economic evaluation of the use of biodigestors in
generation of electric energy and biofertilizer with bovine culture.**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. José Donizetti de Lima

PATO BRANCO

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco



SIMONE ANDREIA GUARES

**MODELO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE BIODIGESTORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E
BIOFERTILIZANTE COM DEJETOS DA BOVINOCULTURA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia De Produção E Sistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Gestão Dos Sistemas Produtivos.

Data de aprovação: 27 de Novembro de 2020

Prof Jose Donizetti De Lima, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Gilson Adamczuk Oliveira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Rodrigo Barichello, Doutorado - Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/11/2020.

*“A vitória está reservada para aqueles
que estão dispostos a pagar o preço”.*
(Sun Tzu – A arte da Guerra)

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser o motivo que provém minha fé, que permite transpor os obstáculos de minha jornada e não me deixar esmaecer nos momentos de dificuldade.

Gratidão eterna aos meus pais, Adejir Guares e Zilia Fabian Guares e meu irmão, Rudinei Cesar Guares, pelo incentivo diário, por sempre acreditarem em mim e torcerem pelo meu sucesso.

Ao meu orientador professor José Donizetti de Lima, pela paciência e por acreditar em meu potencial, sempre cobrando, incentivando e tentando extrair o melhor possível da minha pesquisa.

Ao professor Rodrigo Barichello por aceitar participar da banca examinadora como membro externo.

Ao professor Gilson Adamczuk Oliveira pelo aceite ao convite de participação da banca examinadora.

À secretária do PPGEPS, Adriani Michelin, pelas orientações e cordialidade em todos os momentos em que busquei auxílio.

GUARES, Simone A.; **Modelo de avaliação técnica e econômica do uso de biodigestores na geração de energia elétrica e biofertilizante com dejetos da bovinocultura**. 2020. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi propor um modelo de avaliação da viabilidade técnica e econômica da produção de energia elétrica via biodigestores com dejetos da bovinocultura. Na etapa da análise dos aspectos técnicos, foi realizado um levantamento de quais aspectos são relevantes na implantação do sistema de biodigestores. Na avaliação econômica, primeiro foi elaborando um ranking dos Projetos de Investimento (PIs), utilizando o critério Valor Presente Líquido (VPL). Na sequência, foram analisados os resultados da Metodologia Multi-Índice Ampliada MMIA) determinística para os PIs que apresentaram VPLs > 0. Por fim, para os PIs que apresentam alta sensibilidade foi aplicada a Simulação Monte Carlo (SMC). Para isso, utilizou-se os indicadores para avaliação técnica que mostraram qual dos sistemas apresenta melhor desempenho para essa região, considerando a disponibilidade de matéria-prima e as condições climáticas. Como resultado técnico obteve-se que o perceptual ótimo de combinação dejetos e forragem de milho (Projeto B), se encontram entre 22-65%, sendo a relação de C:N 25:1, para a combinação dejetos e forragem de capim (Projeto C) está na faixa de 18-54%. De acordo com os dados coletados na aplicação do modelo de análise dos aspectos técnicos e econômico, a geração de energia elétrica nos três sistemas avaliados apresentou vantagens econômica na medida que a proporção do sistema se incrementa, pela economia de escala. Os resultados indicam a viabilidade econômica do investimento para todos os sistemas avaliados, mas a viabilidade depende da potência instalada. Dessa forma, a escolha do melhor sistema e a potência mínima são fundamentais para assegurar a viabilidade econômica do investimento.

Palavras-chave: *Biodigestores, Energia elétrica, Bovinocultura, PI, MMIA, SMC.*

GUARES, Simone A.; **model for technical and economic evaluation of the use of biodigestors in generation of electric energy and biofertilizer with bovine culture**. 2020. 102 p. Dissertation (Master's Degree in Production Engineering and Systems) – Federal Technology University of Paraná. Pato Branco.

ABSTRACT

The main objective of this work was to propose a model for the evaluation of the technical and economic feasibility of the production of electric energy via biodigesters with cattle manure. In the stage of analysis of technical aspects, a survey was carried out of which aspects are relevant in the implementation of the biodigester system. In the economic evaluation, a ranking of Investment Projects (PIs) was first developed, using the Net Present Value (NPV) criterion. Next, the results of the deterministic Multi-Index Methodology (MMIA) were analyzed for PIs with NPVs > 0. Finally, for PIs with high sensitivity, Monte Carlo Simulation (SMC) was applied. The feasibility of the evaluation model was tested on a rural property located in the Southwest region of Paraná, comparing three system options, both with ten variations in power. As a technical result it was obtained that the optimum perceptual combination of manure and forage of corn (Project B), are between 22-65%, with the ratio of C: N 25: 1, for the combination of manure and grass forage (Project C) is in the 18-54% range. According to the data collected in the application of the analysis model of the technical and economic aspects, the generation of electric energy in the three evaluated systems presented economic advantages as the proportion of the system increases, due to the economy of scale. The results indicate the economic viability of the investment for all evaluated systems, but the viability depends on the installed power. Thus, the choice of the best system and the minimum power are fundamental to ensure the economic viability of the investment.

Keywords: Biodigestores, Electric power, Bovinocultura, PI, MMIA, SMC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da dissertação	18
Figura 2 - Procedimento <i>Snowballing</i> resumido para obtenção do portfólio bibliográfico	20
Figura 3 - Seção transversal do biodigestor modelo canadense	29
Figura 4 – As 4 fases da degradação anaeróbia	30
Figura 5 - Representação do sistema produtivo de biofertilizante e biogás	37
Figura 6 - Ciclo Rankine	46
Figura 7 - Definições dos índices conforme dimensões de retorno, riscos e sensibilidade.....	49
Figura 8 - Enquadramento Metodológico da pesquisa	51
Figura 9 - <i>Framework</i> do trabalho	53
Figura 10 - Fluxo das etapas desenvolvidas para a avaliação técnica.....	54
Figura 11 - Etapas desenvolvidas para a avaliação econômica.....	55
Figura 12 - Etapas desenvolvidas para a avaliação econômica.....	57
Figura 13 - Metodologia de análise de viabilidade técnica e econômica	58
Figura 14 - Regressão matemática das eficiências elétrica e térmicas	59
Figura 15 - Relação C:N das combinações Projeto B e Projeto C	61
Figura 16 - Variação do TRH em função da temperatura.....	65
Figura 17 - Consumo de energia elétrica com referência do total de energia elétrica produzida pelo sistema	67
Figura 18 - Consumo de calor com referência do total de calor produzida pelo sistema CHP	67
Figura 19 - Análise econômica dos sistemas em avaliação	72
Figura 20 - Ranking dos projetos avaliados pelo critério VPL	73
Figura 21 - Escala para confrontar as dimensões da MMIA no sistema A	74
Figura 22 - Escala para confrontar as dimensões da MMIA no sistema B	75
Figura 23 - Escala para confrontar as dimensões da MMIA no sistema C.....	75
Figura 24 - Tela de entrada dos dados para a SMC	77
Figura 25 - Estatísticas descritivas via SMC	78
Figura 26 - Estatísticas inferências segundo a SMC	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Referências para análise da produtividade do biogás	38
Tabela 2: Referências usada para avaliação técnica	39
Tabela 3: Referências de valores para o sistema de degradação.....	41
Tabela 4: Referências da avaliação das demandas e perdas de calor no sistema ..	43
Tabela 5: Referências da avaliação do gasto energético do sistema.....	44
Tabela 6: Consumo energético dos sistemas de remoção biológica de H ₂ S.....	44
Tabela 7: Quantidades de dejetos bovino, forragem de milho e forragem de capim utilizados para geração das respectivas potências elétricas.....	62
Tabela 8: Quantidades de cabeças de gado, área de milho e área capim necessários para geração das respectivas potências elétrica.	63
Tabela 9: Produção de biogás e metano das diferentes potências avaliadas	64
Tabela 10: Dimensões dos principais componentes do sistema	66
Tabela 11: Consumos de energia dos equipamentos dos sistemas de degradação para as diferentes potências avaliadas	68
Tabela 12: Custos total de investimentos iniciais dos diferentes sistemas	69
Tabela 13: Investimentos iniciais, receitas estimadas e fluxos de caixas dos sistemas em avaliação	71
Tabela 14: Configuração adotada para a SMC	76

LISTA DE SIGLAS

ABC	Agricultura de Baixo Carbono
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AS	Análise de Sensibilidade
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CED	Culturas Energéticas Dedicada
C:N	Carbono: Nitrogênio
CNA	Conselho Nacional do Agronegócio
CPH	Combined Heat and Power
CVaR	Valor em Risco Condicional (<i>Condition Value at Risk</i>)
FCo	Investimento Inicial
FC	Fluxo de Caixa
IFCN	<i>International Farm Comparison Network</i>
IL	Índice de Liquidez
MMI	Metodologia Multi-índice
MMIA	Metodologia Multi-índice Ampliada
N	Horizontes de planejamento ou análise
RAFA	Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente
RCEs	Reduções Certificadas de Emissões
Ph	Potencial hidrogeniônico
PI	Projeto Investimento
PIs	Projetos de Investimento
ROIA	Retorno Adicional Sobre Investimento
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes de Energia no Brasil
\$AVEPI®	Sistema de Análise da Viabilidade Econômica de Projetos de Investimento
SMC	Simulação de Monte Carlo
SNA	Sociedade Nacional de Agricultura
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TRH	Tempo de Retenção Hidráulico
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
VaR	Valor em Risco (<i>Value at Risk</i>)
VPL	Valor Presente Líquido
VPLA	Valor Presente Líquido ajustado ao Horizonte de Planejamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	10
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 JUSTIFICATIVA.....	13
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
1.6 ESTRUTURA GERAL DA DISSERTAÇÃO.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 MÉTODO PARA CONSTRUÇÃO DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO	19
2.2 BOVINOCULTURA BRASILEIRA.....	21
2.2.1 Alternativa para o tratamento dos impactos ambientais causados pela bovinocultura	23
2.3 BIODIGESTORES	28
2.3.1 Biogás	32
2.3.2 Biofertilizante.....	34
2.4 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PEQUENA ESCALA.....	35
2.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA	36
2.5.1 Quantidade de substância necessário no sistema	38
2.5.1.1 Estruturação do sistema biodigestor	40
2.5.1.2 Déficit energético do sistema	42
2.6 TECNOLOGIA DE CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA.....	45
2.7 OPORTUNIDADES DE INVESTIMENTO	47
2.8 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	48
3 METODOLOGIA.....	51
3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	51

3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.2.1	Método de avaliação técnica	54
3.2.2	Metodologia de avaliação de viabilidade econômica	55
3.3	METODOLOGIA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	ANÁLISE DOS ASPECTOS TÉCNICOS	59
4.1.1	Quantidade de substâncias e substrato	61
4.1.2	Dimensionamento do sistema	64
4.1.3	Consumo energético	66
4.2	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DOS SISTEMAS	69
4.2.1	Análise determinística via VPL	71
4.2.2	Análise determinística via MMIA	73
4.2.3	Análise estocástica via SMC	76
4.3	DISCUSSÃO	79
5	CONCLUSÕES	81
6	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, mostra-se os seguintes tópicos: (i) contextualização do tema de pesquisa; (ii) problema de pesquisa; (iii) objetivo geral e específicos; (iv) justificativa da pesquisa; (v) aspectos metodológicos; e (vi) delimitação da pesquisa.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica tornou-se evidente durante as últimas décadas, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento tecnológico, o qual proporcionou o crescimento da economia dos países emergentes e a busca por comodidade (DRANKA *et al.*, 2018). Além disso, é necessário a busca pelo desenvolvimento sustentável, o qual possui o foco em minimizar ou evitar impactos ambientais indesejáveis (REIS *et al.*, 2014).

Diante desse cenário, ocorreram algumas mudanças nas políticas energéticas e incentivos financeiros a geração distribuída foi concedida aos consumidores brasileiros em 2012. A publicação da normativa (REN) nº 482 e da REN nº 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), permitiu a conexão de geração distribuída a rede de distribuição.

Segundo a ANEEL (2016), o crescimento é contínuo na utilização da energia elétrica, mas a geração é constante. Sendo assim, é necessário buscar estratégias para aumentar a produção para suprir essa demanda de energia elétrica, por meio de processos eficientes e que diversifiquem a matriz energética existente. Segundo a ONU (2017), mais um bilhão de pessoas no mundo ainda vivem sem energia elétrica.

A produção de energia elétrica, usando recursos naturais, está se desenvolvendo e ganhando força por se tratar de uma energia limpa, ou seja, energia renovável, a qual origina-se do sol, do vento, da chuva, da biomassa, entre outros. Sua utilidade é crescente, por ser uma alternativa que causa o mínimo de impacto ambiental e é considerada economicamente viável (AHNA *et al.*, 2012).

Essas fontes de energia sustentáveis são consideradas uma alternativa aos combustíveis fósil tradicionais, como o petróleo e carvão. Porém, isso não significa

que seja totalmente segura ambientalmente, mas causa menores impactos ao meio ambiente se comparamos com as outras origens (KARLSSON, 2014)

O Brasil possui situação privilegiada em produtividade de biomassa em larga escala, pois existem extensas áreas cultiváveis e condições climáticas favoráveis no decorrer do ano. A biomassa também é comumente utilizada em sistemas termelétricos para gerar energia elétrica. No Brasil, 83% de sua matriz elétrica originada de fontes renováveis, de acordo departamento de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia, (2020). A participação é liderada pela hidrelétrica (63,8%), seguida de eólica (9,3%), biomassa e biogás (8,9%) e solar centralizada (1,4%).

O uso da biomassa de origem animal é uma matéria-prima adequada para produzir biogás para a geração de energia elétrica e biofertilizante para adubação de plantações. Dessa forma, torna-se uma opção para os produtores fazerem o tratamento dos dejetos antes de serem descartados no meio ambiente. Esta estratégia de tratamento dos dejetos para fins energéticos é uma maneira de obter energia elétrica nas propriedades rurais. Também é possível reduzir o potencial poluidor, minimizar o uso de recursos naturais e o custo da energia no valor dos produtos (ANGONESE, 2006).

Segundo o International Farm Comparison Network (IFCN, 2019), o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de bovinos, detentor de um rebanho superior a 213,5 milhões de cabeças de bovinos, sendo em torno de 38,34 milhões destinada a produção leiteira e 175,16 milhões de bovinos destinado para pecuária de corte (IBGE, 2019). Consequentemente, a produção de resíduos é elevada, os quais não podem ser descartados diretamente no meio ambiente. (Segundo o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, (2019), o setor do agronegócio brasileiro é responsável por 21,1% do PIB. Sendo assim, mostra como o setor necessita de investimentos significativo e da criação de um processo de governança para a produção do setor atender à crescente garantia de segurança alimentar, sustentabilidade ambiental e a saúde humana (FAO, 2017).

Segundo a Agroanalysis (2014), atividades da bovinocultura é a maior usuária mundial de recursos naturais: em especial as pastagens e as terras utilizadas para produção de grãos que compõem a ração, que corresponde por cerca de 80% de toda

a área agrícola. Sendo assim, conforme destacam Miranda et al. (2006), uma alternativa tecnológica promissora, no que diz respeito ao aproveitamento da biomassa para produzir energia, é a degradação.

O biodigestor anaeróbico do modelo canadense, é um equipamento que tem sido utilizado para o processamento de matéria orgânica. O seu princípio de funcionamento, é como um reator químico em que as reações têm origem biológica, ou seja, são realizadas por bactérias que digerem matéria orgânica em condição anaeróbica, na ausência de oxigênio (COLDEBELLA, 2006).

A implantação de biodigestores na zona rural é um projeto viável tanto para o meio ambiente quanto para o produtor, pois é uma maneira de viabilizar a produzir um biofertilizante, oneroso para o pequeno produtor e ainda contribuir para tornar os produtores rurais autossustentáveis energeticamente (RANZI *et al.*, 2004). Além da diminuição do desmatamento de forma desordenada, do reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados, da redução da emissão de odores e gases poluentes para a atmosfera.

Avaliação de viabilidade econômica da implantação do sistema de degradação, deriva das estimativas da temperatura da região, da quantidade e qualidade dos dejetos, investimento inicial, valor da tarifa de energia elétrica da concessionária, da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e possíveis incentivos governamentais. A disponibilidade de matéria-prima combinada com os valores tarifários de eletricidade elevados, promove incentivos para análise de viabilidade econômica da produção de energia elétrica através do processo de digestão, tornando a propriedade autossuficiente em eletricidade ou até mesmo a venda do excesso injetando na rede elétrica (PALACIO *et al.*, 2004).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Como avaliar a viabilidade técnica e econômica do Projeto de Investimento (PI), na geração de energia elétrica e biofertilizante via biodigestores anaeróbicos do modelo canadense a partir de dejetos da bovinocultura?

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Nessa subseção, apresentam-se o objetivo geral e os objetivos específicos que serão trabalhados no decorrer da pesquisa.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de avaliação da viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de biodigestor anaeróbico para geração de energia elétrica e biofertilizante em propriedades rurais, que desenvolvam atividades no segmento da bovinocultura no sistema confinado.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, o trabalho será desenvolvido buscando atingir aos seguintes objetivos:

- I. Desenvolver um modelo para a análise de viabilidade técnica e econômica para esse tipo de empreendimento; e
- II. Aplicar o modelo proposto para análise de viabilidade econômica em um projeto já existente.

1.4 JUSTIFICATIVA

As atividades que pertencem ao agronegócio, estão se tornando um investimento atrativo, pois são competitivas frente ao mercado e procuram acirradamente aumentar a produtividades com custos menores. Como em qualquer outra atividade, a produtividade, a competitividade e a qualidade são fatores vitais. Neste contexto, uma estratégia que visa aumentar a competitividade na bovinocultura, é o investimento em um sistema de biodigestor para produção de energia elétrica e biofertilizante (DEMIREL *et al.*, 2010; WANG, 2014).

Conforme IBGE, (2019), no Brasil aproximadamente 41% do território nacional é ocupado por propriedades rurais. A modernização desse setor, foi um importante

fator para o crescimento do país. Os proprietários rurais conseguiram aumentar seu rendimento e reduziram os trabalhos manuais o que proporcionou maior qualidade de vida (IBGE, 2019).

Diante a este cenário, o Brasil é privilegiado pois, com o vasto território com clima tropical que ocupa quase metade da parte sul do continente americano, que potencializam a possibilidade do crescimento da bovinocultura e a participação no mercado mundial. Ainda que, a pecuária de produtora de bovino esteja presente no Brasil desde o tempo da colonização portuguesa, a relevância econômica da atividade no agronegócio internacional apenas se despontou nas últimas décadas com a evolução do setor, proporcionando ocupar as mais elevadas posições mundiais, destacando-se atualmente com o maior rebanho bovino e a segunda maior na produtividade de carne (AGROANALISYS, 2014).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018), as projeções de crescimento da produção de carne bovina no Brasil são de 26,3%, chegando a 12 milhões de toneladas em 2029/30. Neste contexto de crescimento, tornou-se necessário destinar corretamente os dejetos.

Segundo IBGE (2019), a maioria da criação bovina de corte, no país serem criados, recriados e em torno de 65% da fase final é no sistema confinado. Essa tecnologia tem sido empregada há muito tempo e com excelentes resultados econômicos, embora muitos aspectos do sistema devam ser analisados, entre eles o bem-estar animal (LANDSKRON *et al.*, 2018).

De acordo com Catapan *et al.* (2013), as atividades no meio rural, no contexto mundial, é um forte potencial poluidor quando os dejetos são depositados diretamente no solo, sem tratamento. Dentro desta perspectiva, é necessário mudar a maneira de gerenciar o manejo desses dejetos, pois, os dejetos não podem ser lançados sobre as lavouras ou solo diretamente, pois sem tratamento, podem ocasionar elevados riscos ao meio ambiente (CATAPAN, 2011).

Além do exposto, a conscientização da sustentabilidade, quando se aborda o pilar ambiental, relacionado ao armazenamento e tratamento dos dejetos desses animais, necessita acompanhar o desenvolvimento tecnológico que foi acompanhando a globalização. Tendo conhecimento da complexidade dos problemas nos quais o depósito dos dejetos no solo pode ocasionar impactos ambientais, por

exemplo, danos na água, solo, e no ar (KUNZ *et al.*, 2005; CATAPAN *et al.*, 2011; CATAPAN *et al.*, 2013). Além de evitar este impacto ambiental, o uso dos dejetos dos animais para a geração de energia, quando apresenta viabilidade econômico-financeira, é uma forma das propriedades rurais agregarem mais valor as suas atividades (CATAPAN *et al.*, 2013).

Atividade da bovinocultura está em expansão no Brasil, porém, é uma atividade que contribui para um dos mais graves problemas ambientais por meio, a emissão dos gases causadores do efeito estufa na atmosfera. A produção de bovinos teve um aumento considerável e, por consequência, a produção de dejetos também. Com isso, além da emissão dos gases de efeito estufa a poluição de mananciais de água aumentou drasticamente (BARBOSA; LANGER, 2011).

Dessa forma, foi necessário a busca de estratégias viáveis a serem implementadas evitando que os dejetos da bovinocultura continuem a ser lançada nos mananciais, exemplo, a utilidade dos dejetos como biofertilizantes nas lavouras, trazendo ganhos econômicos para as lavouras, sem comprometer a qualidade do solo e ao ambiente (ALVAREZ *et al.*, 2011).

Por outro lado, vale lembrar, que não é recomendado a utilidade de dejetos puros, como adubo, pois ultrapassa o limite de absorção do solo. Uma medida que é eficaz no combate à poluição dos rios e da emissão dos gases causadores do efeito estufa é a implantação de biodigestores nas propriedades rurais (MONTORO *et al.*, 2013).

Devido a implantação do biodigestor anaeróbico, o produtor rural pode se tornar autossuficiente em energia elétrica ou até mesmo em um produtor independente, por meio comercialização do excedente de sua geração nas várias modalidades que o mercado de energia oferece (JUNQUEIRA, 2011).

Diante desse cenário, pode-se verificar que a bovinocultura representa uma importante atividade, com maiores benefícios sociais e econômicos. Consequentemente, torna-se necessário para o produtor rural o desenvolvimento de ferramentas que permitam a análise da viabilidade técnica e econômica da geração de energia a partir da utilidade de biodigestor (DIOHA, 2013).

O presente estudo traz como contribuição teórica, a elaboração de um modelo que auxilia na avaliação de viabilidade dos aspectos técnico e econômico na implantação de um sistema de biodigestores em propriedades rurais para a geração de energia elétrica e biofertilizante a partir de dejetos bovinos. Na análise dos aspectos técnicos avalia-se o tipo e a quantidade da substância, a influência da temperatura externa, o tempo de retenção hidráulica do sistema, a quantidade de energia gerada e conseqüentemente a redução dos custos com a eletricidade, a qual subsidiará os elementos necessários para a análise econômica.

Por meio de um estudo de caso, o modelo proposto será validado em uma propriedade rural. Essa unidade produtiva analisa a implantação de um sistema de biodigestor anaeróbico, com a finalidade de destinar corretamente esses influentes e agregar valor ao empreendimento.

A viabilidade da presente pesquisa ocorre na medida que já foi identificada uma propriedade no Sudoeste do Paraná para a aplicação do modelo proposto. Essa unidade produtiva fornecerá os dados e informações econômico-financeiras para a realização do estudo de caso.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Conforme Miguel Cauchick (2012), o uso de variáveis que são mensuradas no decorrer da pesquisa implica em sua definição como quantitativa, visto que serão observados e coletados dados para análise, utilidade via aplicação de método e obtenção de resultados. Como o trabalho é realizado dentro de uma propriedade rural, define-se também a pesquisa como estudo de caso (YIN, 2015). Ainda, a abordagem pode ser também classificada como qualitativa e quantitativa em alguns aspectos, visto que se obtém informações sobre a percepção dos indivíduos, além de interpretação do ambiente em que a problemática se desenvolve (GIL, 2017).

Para realização do presente trabalho, primeiramente é feita a delimitação inicial da pesquisa, a qual parte da definição da realização do trabalho como estudo de caso. Apresentando as diversidades do local, problemas de desperdícios e mal-uso dos recursos disponíveis na propriedade.

A segunda delimitação parte da necessidade de tratar as etapas necessárias na produção de energia elétrica com a utilidade do biogás resultado da degradação. A terceira delimitação é precedida pela importância da eficiência no uso de recursos naturais, visto que o processo de fabricação de energia elétrica utilizando os dejetos bovino como matéria-prima. Assim, os termos análise dos aspectos técnico e econômica surgem como pilares da pesquisa.

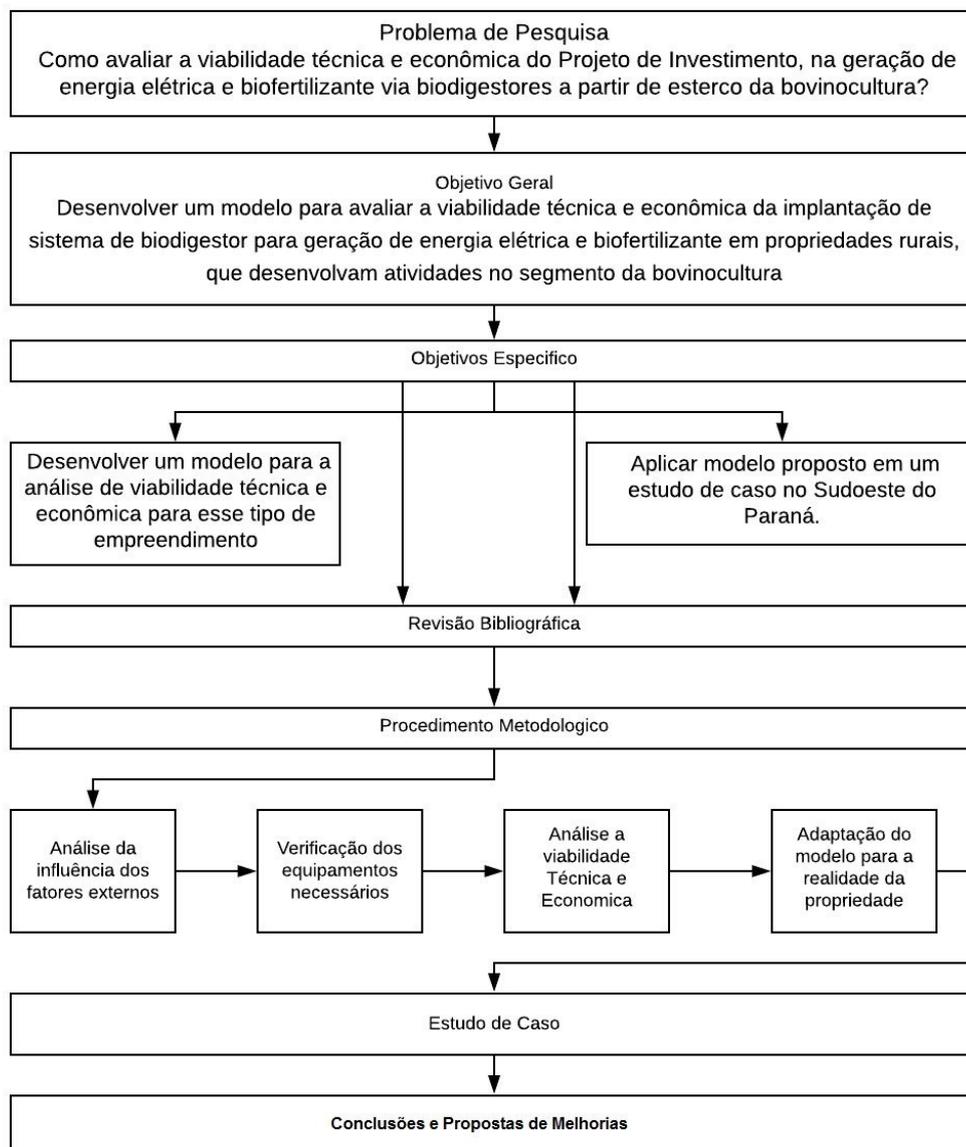
A quarta delimitação leva ao estudo bibliográfico com a busca em base dados de estudo relacionadas diretamente ao tema definido, em diferentes bases de pesquisa e em período específico.

1.6 ESTRUTURA GERAL DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1, apresenta a introdução da pesquisa e seus elementos pré-textuais. Por sua vez, o Capítulo 2 apresenta uma revisão sobre os principais tópicos da pesquisa: biodigestores, processo de degradação, aspectos técnico e análise de viabilidade econômica. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia geral da pesquisa. O Capítulo 4 contempla o estudo de caso e o confronto dos resultados obtidos frente a literatura.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões da pesquisa e propostas para trabalhos futuros. A Figura 1 apresenta a estrutura geral da dissertação.

Figura 1 - Estrutura da dissertação



Fonte: Elaborada pela autora.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada primeiramente o método da construção da base conceitual, em seguida o portfólio bibliográfico que dá suporte ao desenvolvimento do trabalho, discorrendo sobre os assuntos relativos ao contexto da pesquisa.

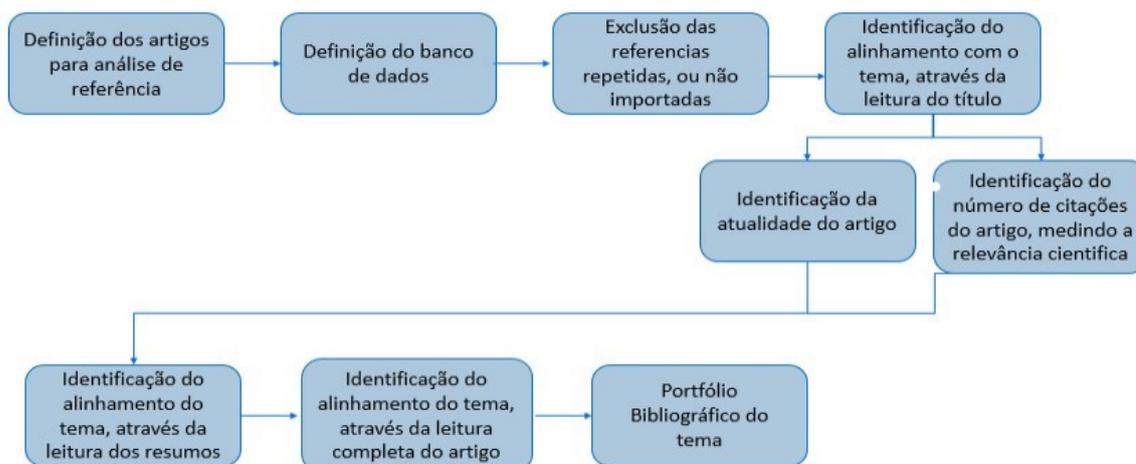
2.1 MÉTODO PARA CONSTRUÇÃO DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Foi realizado um levantamento bibliográfico em bases de pesquisa nacionais e internacionais. O instrumento utilizado foi uma adaptação da técnica *Snowballing* (WOHLIN, 2014), levando à obtenção do Portfólio Bibliográfico (PB), utilizado para elaboração do referencial teórico e definição da metodologia a ser adotada neste trabalho, com maiores detalhes apresentado na figura 2. A definição das ferramentas e técnicas usada estão apresentadas no decorrer do trabalho tem base desta pesquisa, bem como a verificação de poucos trabalhos que tratem a Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA) sob a abordagem estocástica de (Lima et al., 2017).

Para selecionar os artigos científicos disponíveis nas bases de dados de maior relevância para o tema de pesquisa estabelecido é necessário de uma técnica (TEIXEIRA, 2014). A Figura 2, apresenta resumidamente as etapas do processo de seleção do PB. Para a realização deste trabalho é necessário justificar as escolhas na construção do conhecimento a respeito do tema estabelecido para pesquisa e, a fim de tornar o processo de seleção de um PB estruturado, eficiente e provedor de bons resultados, utilizou-se a técnica *Snowballing*, identificando a relevância e contribuição científica desses artigos para o presente estudo (WOHLIN 2014).

Para a seleção dos artigos a serem aceitos pelo *snowball*, conforme a Figura 9 apresenta, foi realizado o levantamento das referências dos 10 artigos, totalizando 397 referências, destas 33 referências não poderiam ser importadas para software de gerenciamento bibliográfico e foram excluídas, restando 364 publicações.

Figura 2 - Procedimento *Snowballing* resumido para obtenção do portfólio bibliográfico



Fonte: Elaborada pela autora.

Foram eliminados livros, com o objetivo de manter apenas artigos e excluído publicações duplicadas, restando 340 artigos. Realizada a leitura dos títulos para verificar a semelhança com o tema, selecionados 74 artigos, após realizado o levantamento do reconhecimento científico e realizado o corte em 25 citações, 53 artigos foram mantidos por representarem 96,86% das citações, feito a leitura dos resumos destes artigos e mantidos 41 alinhados com o tema, após feito a leitura integral dos artigos restaram 36 alinhados com o tema, foram aceitos no portfólio os 32 artigos com maior número de citações.

Os artigos selecionados são em sua maioria provenientes das bases Scopus, *ISI Web of Science*, *Science Direct* e *Emerald*, com Qualis Sucupira A1, A2, B1 e B2 na área de Engenharia III, salvo em poucas situações em que o documento tenha elevado reconhecimento científico (elevado número de citações). A Sucupira, entre outras funcionalidades, é uma plataforma de classificação de periódicos nacionais e internacionais, contemplando produções acadêmicas brasileiras em todas as áreas do conhecimento. Os periódicos são classificados conforme seus estratos indicativos da qualidade, sendo que a escala varia do mais ao menos qualificado, ou seja, de A1 a C, respectivamente (SUCUPIRA, 2019).

2.2 BOVINOCULTURA BRASILEIRA

O gado bovino está presente no território brasileiro desde os primeiros anos que se seguiram após a chegada dos portugueses. Os historiadores apontam a pecuária bovina como a principal atividade econômica que desenhou os principais contornos de sua atual extensão territorial (GUIMARÃES, 2015).

A criação de gado bovino no Brasil é a atividade econômica que ocupa a maior extensão de terras atualmente. A bovinocultura praticada no Brasil se destaca no cenário mundial do agronegócio. Os brasileiros têm o do segundo maior rebanho efetivo do mundo, conta com 232,4 milhões, sendo um grande exportador de carne no cenário mundial (ABEIC, 2018).

De acordo com a Embrapa (2017), o Brasil desenvolve a bovinocultura e proporciona lucratividade em dois segmentos, são eles: cadeia produtiva da carne e a cadeia produtiva do leite. A produção de carne e de leite tem sua importância pois trata-se de uma atividade com impacto destacado na economia.

A atividade pecuária se refere ao processo produtivo de criação de animais em geral, a qual abrange desde os equipamentos utilizados, o manejo dos rebanhos até a comercialização dos animais. A bovinocultura de corte, inserida na atividade pecuária, dedica-se à criação da espécie bovina para a produção de carne, a partir do desenvolvimento de um ciclo produtivo que envolve desde o manejo reprodutivo até o beneficiamento da carne (ARAUJO, 2009; CALADO, 2009 e VENTUROSOS PEDRO FILHO, 2010).

Um sistema de produção de pecuária abrange um conjunto de tecnologias, práticas de manejo, tipo e genética dos animais, condições socioeconômicas, culturais, mercado consumidor e capacidade de investimentos (EUCLIDES FILHO, 2000). Segundo Marion (2004), a classificação presente na literatura apresenta essencialmente três tipos de sistemas para a bovinocultura: extensivo, semi-intensivo e intensivo, detalhados a seguir:

1. **Sistema Extensivo:** se caracteriza por manter a criação exclusivamente a campo, aproveitando ao máximo os recursos naturais, com economia de instalações, equipamentos e mão de obra. Nesse sistema, o gado encontra a alimentação principal na pastagem natural. É um sistema de criação muito comum e adotado

particularmente na criação de gado comum ou misto, em grande escala, visando-se a criação de novilhos para o abate. Os melhoramentos introduzidos, sem modificar o caráter do regime, são simplesmente para favorecer a criação de um gado de mais valor e mais exigente.

2. **Sistema Semi-intensivo:** se aproveitam menos os pastos naturais e exige mais instalações, mais trabalho, sendo destinado a um tipo de gado mais aperfeiçoado. Em geral, os animais são mantidos no estábulo durante algumas horas, para receberem ração e outros alimentos e, após, são soltos em poteiros ou piquetes com boa pastagem e água. É um sistema também muito usual, principalmente em zonas suburbanas, ao redor de grandes centros, onde as áreas disponíveis são reduzidas, ou mesmo nas regiões coloniais, onde as terras em sua maior proporção são utilizadas para a agricultura.

3. **Sistema Intensivo:** em relação aos outros, se caracteriza principalmente pelo emprego de maior capital e mais trabalho em relação à área. A alimentação básica constitui-se de forrageiras e complementos à base de rações e concentrados.

Com o aumento da população e com a redução da área útil, com o desejo de obter maior produtividade, aumentando a rentabilidade, com o desenvolvimento tecnológico e da assistência técnica, se está atingindo gradativamente o sistema intensivo, consiste em:

a) Na formação de pastagens artificiais adequadamente adubadas e até irrigadas, com forrageiras adequadas à região, propiciando a divisão dos pastos para o estabelecimento do rodízio (permite repouso e recuperação das pastagens);

b) Na melhor tanto das condições de alimentação (arroçoamento, sal mineral etc.), associando pasto mais suplementação, ou pasto mais confinamento, como da ordem higiênico – sanitária, o que só foi possível pela redução da distância entre o curral e o rebanho; e

c) Na Introdução de novas raças produtivas, adequadas a região, em substituição aos gados nativos.

Sob o ponto de vista gerencial, não existe um sistema único de manejo de rebanhos. A adequação não está diretamente ligada ao desejo do produtor, mas também depende das condições de cada região, da cultura pecuarista, da qualidade do gado, enfim, o produtor define o método mais adequado para alcançar seus objetivos ou atender a demanda do mercado.

De acordo com a Sociedade Nacional de Agricultura (SNA, 2018), a região Sul do Brasil, o sistema extensivo é o que predomina, pois ele se caracteriza por manter a criação exclusivamente no campo, aproveitando ao máximo os recursos naturais, onde leva vantagens em abranger custos de produção relativamente baixos. Porém, a utilidade do sistema intensivo ou confinamento, na entressafra, ou seja, o período de declínio da produção das pastagens, que é dos meses de junho a setembro, o produtor utiliza deste método para a terminação de engorda para o abate.

Uma estratégia utilizada pelos produtores para não interromper a produção é o regime confinamento para atender a demanda, sendo que na entressafra os preços se elevam devido à falta de produto (carne) no mercado. Outro caso acontece quando ocorrem alterações de temperatura fora de época, como a geada, que atrapalha o crescimento do pasto e faz com que o criador opte por outro método de manejo.

2.2.1 Alternativa para o tratamento dos impactos ambientais causados pela bovinocultura

O sistema de criação de bovinos tem contribuído para o surgimento de problemas ambientais devido à elevada produção de resíduos, que na maioria das vezes é disposta sem tratamento diretamente nos corpos de água e no solo de forma irregular. Nos últimos anos, tem sido crescente o incentivo por boas práticas, visando menores degradação do meio ambiente (AGROMAIS, 2017).

Para Cunha e Guerra (2009), as propriedades rurais são caracterizadas como as que mais geram impactos nocivos à natureza, pois as atividades agropecuárias, em geral, demandam grandes áreas e, como consequência ocorre o desmatamento de florestas a fim de transformá-las em campos de pastagens aos bovinos. Por suas dimensões gigantescas, a pecuária é, em geral, considerada a atividade econômica que, em seu conjunto, mais impacta o meio ambiente no Brasil.

A contaminação do solo e dos recursos hídricos, a infiltração de água residual no lençol freático, o desenvolvimento de gases com odores desagradáveis e a proliferação de causadores de doenças, são alguns dos possíveis prejuízos ambientais provocados pelos dejetos da produção de bovinos. Além disso, em criação de animais confinados, a contaminação de corpos d'água pode ocorrer por bactérias presentes no trato intestinal dos animais e também metais pesados e outros

componentes tóxicos que podem estar presentes em complementos minerais e em vacinas e antibióticos (MATOS, 2005). Há vários processos para o tratamento adequado dos excrementos bovinos, e sua utilidade é de grande importância não só econômica como também ambiental. Uma das alternativas para o reaproveitamento dos dejetos é a degradação, que promove geração de biogás e biofertilizante. Há também outras formas de tratamento como as lagoas de estabilização, compostagem, esterqueira, entre outros (DRUMM *et al.*, 2014).

Claudino e Talamini (2013), afirmam que entre os principais impactos ocasionados pela pecuária ao meio ambiente estão: os impactos a biodiversidade, no qual muitas espécies de plantas e animais acabam sendo extintas; os impactos ao solo, que acaba esgotando suas propriedades e diminuindo sua fertilidade; e os impactos sobre a água doce, que é continuamente contaminada e utilizada indiscriminadamente.

A primeira etapa de tratamento do efluente, conhecida como tratamento preliminar, tem como objetivo, exclusivamente a remoção de sólidos grosseiros e areia, com a finalidade de proteção das unidades de tratamento subsequentes e ainda proteção do corpo receptor, tendo os mecanismos básicos de remoção de ordem física. Segundo Von Sperling (2005), a remoção de sólidos grosseiros é feita frequentemente por meio de grades ou peneiras, tendo o material de dimensões maiores que o espaçamento entre as barras, retido.

Neste caso, a maneira de remoção é a sedimentação, os grãos de areia, devido à maiores dimensões e densidade vão para o fundo do tanque, enquanto a matéria orgânica, de sedimentação lenta, permanece em suspensão e segue para as unidades de tratamento a jusante. As etapas subsequentes têm como principal objetivo a remoção da matéria orgânica presente no efluente, sendo uma forma de acelerar os mecanismos de degradação que ocorrem naturalmente nos corpos receptores (VON SPERLING, 2005).

Considerando a praticidade e os custos de operação e manutenção, os principais métodos para tratamento de efluentes agroindustriais são os sistemas anaeróbios, os sistemas de lagoas de estabilização e ainda os sistemas *wetlands* construídos (MATOS, 2005). Tem-se ainda, a disposição controlada no solo, que além de ser considerada como forma de tratamento de efluentes, é também um método de disposição final destes (DRUMM *et al.*, 2014).

O tratamento mais recomendado aos dejetos águas residuais de instalações de bovinos é do tipo biológico (CAMPOS, 2013), tendo como base o contato efetivo entre microrganismos e o material orgânico contido no efluente, de modo a convertê-lo em gás carbônico, água e alimento para os microrganismos. Quando o processo ocorre na ausência de oxigênio, condições anaeróbias, tem-se, dentre outros, a produção de metano (VON SPERLING, 2005). Alguns dos tipos de tratamentos que podem ser feitos nos dejetos da bovinocultura:

a) Filtros Anaeróbios: usado no meio rural e em pequenas comunidades, são reatores com biofilmes, onde a biomassa cresce aderida a um meio suporte, usualmente pedras, funciona com fluxo ascendente, com elevada carga de DBO por unidade de volume, garantindo assim as condições anaeróbias e um menor volume do reator. Os filtros anaeróbios devem ser fechados, para que não haja entrada de oxigênio, principalmente (VON SPERLING, 2005).

b) Os reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), também denominados de RAFA (Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente) e ainda como Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo são vistos como tendência atual para tratamento de esgotos no Brasil, tanto como unidades únicas ou seguidas de pós-tratamento (GOFFI *et al.*, 2019). Nos reatores UASB a biomassa cresce dispersa no meio, formando pequenos grânulos, os quais tendem a servir de meio suporte para outras bactérias, porém sem utilidade de um meio suporte físico. Nesses reatores, a concentração de biomassa é bem elevada, fazendo com que o volume requerido pelos reatores UASB seja bastante reduzido (VON SPERLING, 2005).

c) As lagoas de estabilização são unidades projetadas para tratar águas residuais por mecanismos predominantemente biológicos. De acordo com Von Sperling (2005), as lagoas de estabilização podem ser classificadas em: lagoas facultativas, sistemas de lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas, lagoas aeradas facultativas, sistemas de lagoas aeradas de combinação completa seguidas de lagoas de sedimentação, lagoas de alta taxa, lagoas de maturação e ainda lagoas de polimento. A lagoa facultativa é, dentre as demais, o processo mais simples, uma vez que depende unicamente de fenômenos naturais, como sedimentação e decomposição, após vários dias de percurso.

- Biodigestor é o equipamento no qual se realiza a fermentação anaeróbia de dejetos. O processo fermentativo depende de condições ambientais específicas,

como a temperatura, de modo a garantir o crescimento das bactérias e reduzindo assim a carga poluidora (DANIEL, 2015).

- Disposição Controlada no Solo: a disposição de águas residuais agroindustriais no solo é uma técnica atraente para a realidade brasileira, devido às condições de clima tropical e extensão territorial. Esta técnica se baseia na capacidade depuradora do sistema solo-planta, que utiliza mecanismos físicos, químicos e biológicos de remoção dos poluentes contidos nas águas residuais (ERTHAL *et. al.*, 2010).

- A fertirrigação, diferente dos demais métodos, é uma técnica de disposição/tratamento onde se prioriza o aproveitamento dos nutrientes contidos nos efluentes. O objetivo é fornecer água residuais em quantidades compatíveis com a necessidade de nutrientes para as culturas. Erthal *et al.* (2008), afirma que a lâmina de água residuais a ser aplicada como fertirrigação não deve ser calculada em função da reposição das necessidades hídricas da planta, e sim com base nos constituintes que estiverem em maior concentração, de modo a ser aplicada a menor dose. A água residual quando aplicada apenas em termos de necessidade hídrica da cultura, pode provocar o acúmulo de sais no solo, de modo a comprometer não só a produtividade da cultura, mas também a qualidade do solo e águas subterrâneas (ERTHAL, 2010). Os teores de nitrogênio, salinidade, metais pesados e elementos fito tóxicos podem ser usados como referenciais.

Estimativas apontam que, em termos mundiais, o gado bovino é responsável por 9% destes gases (nitrogênio, fósforo, potássio dos dejetos), hormônios, metais pesados e patógenos), participação superior até mesmo à do setor de transportes. No caso do Brasil, se forem excluídas as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) geradas pelas queimadas e desmatamentos, a pecuária torna-se a maior fonte emissora, com mais de 260 milhões de toneladas de carbono equivalente, que representam mais de 42% do total das emissões de GEE (REGANOLD e DOBERMANN, 2012).

A Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM, 2014) regulamenta critérios técnicos para o licenciamento ambiental de novos empreendimentos destinados a bovinos confinado e semi-confinado. Sendo que a atividade deve estar distante de corpos hídricos e do perímetro urbano, bem como de áreas de preservação ambiental.

Novos empreendimentos devem ter estruturas de armazenagem de efluentes líquidos, impermeabilizados e estanque e dimensionados compativelmente com o volume necessário, com um volume adicional de 20% como fator de segurança, com mecanismo de limpeza. Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2014), esse documento objetiva a utilidade adequada dos resíduos no solo, fim de evitar a poluição de corpos hídricos.

A NBR 7229/93, estabelece condições para: projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos, incluindo tratamento e disposição de efluentes e lodo. Já a NBR 13696/97 a qual apresenta: Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos, para tanques sépticos.

Os bovinos produzem dejetos que apresentam elevado teor de energia, com grande diversidade de macro e micronutrientes e água, sendo considerado uma substância ótima para o desenvolvimento de vetores de doenças (AMARAL *et al.*, 2004). A disposição destes dejetos muitas vezes é inadequada, sendo depositada em cursos hídricos e no solo, ocasionando a poluição das águas subterrâneas e superficiais e elevando a emissão dos gases responsáveis pelo efeito estufa (MACHADO, 2011).

O melhor sistema de tratamento de dejetos deve ser projetado para minimizar o impacto ambiental e maximizar a recuperação dos recursos, com o objetivo de aproveitá-los para o aumento da produtividade (HARDOIM, 1999). Dentre os métodos mais utilizados para o tratamento de dejetos estão: biodigestor, lagoas aeróbias, uso direto, já mencionado anteriormente, esterqueiras e compostagem. Vale ressaltar que as quantidades de nutrientes, assim como a carga orgânica dos dejetos, quando dispostos de forma inadequada podem causar grande impacto por sobrecarga de nutrientes no solo (principalmente N e P), que são lixiviados e podem causar eutrofização dos corpos d'água (JUNIOR, 2005).

Para a mitigação deste problema, a degradação que ocorre em biodigestores, se apresenta como uma boa alternativa (AMARAL *et al.*, 2004). Segundo Orrico Junior *et al.* (2010), a fermentação anaeróbia merece um enfoque especial, devido a produção de biogás com a conversão do resíduo em biofertilizante.

A energia proveniente do biogás apresenta inúmeras vantagens na propriedade rural, pois possibilita uma melhor qualidade de vida. Ainda a fixação do

mesmo no campo, devido ao surgimento de novas oportunidades e lucros, agregando valor aos resíduos gerados *in situ* (BARREIRA, 1993).

O biogás difere das outras energias renováveis obtidas das plantas (como o álcool, biodiesel e outras), pois ocupa uma pequena área de terra para a sua produção. O processo de degradação une os benefícios da produção de energia, com a conservação do meio ambiente e melhoria da agricultura, com expressiva importância social, econômica e ambiental deste tratamento (QUADROS *et al.*, 2011).

Lagoas aeróbias e Esterqueiras: utilizam a gravidade para separar a fração sólida da líquida, pela sedimentação da primeira fração (lodo) e passagem da segunda (líquida) para outro tanque ou lagoa. Essa técnica só é passível no manejo de dejetos seco ou líquido, comumente encontrado em produção de bovinos. Já as esterqueiras são áreas isoladas em que o dejetos sólido ou semissólido é armazenado para posterior distribuição e/ou utilidade (ZANETTE, 2009).

Compostagem: É o processo por meio do qual há a bio-oxidação exotérmica, aeróbia, de uma substância orgânica sólida e heterogênea, gerando como produto a água, gás carbônico e matéria orgânica que se estabiliza após a maturação (CARVALHO *et al.*, 2001). O produto da compostagem, conhecido como composto orgânico, é um material homogêneo, estável, de coloração escura e relação C/N próxima a 10:1, isento de organismos patogênicos, destruídos pela temperatura ao longo do processo. Portanto, sua utilidade na agricultura mostra-se interessante (JUNQUEIRA, 2001).

2.3 BIODIGESTORES

Os biodigestores são construções projetadas e construídas de modo a produzir a degradação da biomassa residual sem que haja qualquer tipo de contato com o ar. Isso proporciona condições para que alguns tipos específicos de bactérias, altamente consumidoras passem a predominar no meio e, com isso, provoquem uma degradação mais acelerada da matéria (ORRICO JÚNIOR, 2010).

Em relação ao abastecimento de biomassa, o biodigestor pode ser classificado como batelada e contínuo. No tipo batelada, ou intermitente, a matéria prima a ser fermentada é colocada no seu interior apenas uma vez e fica tempo suficiente para que seja realizada a decomposição pelos microrganismos. Após o

tratamento da biomassa, o resíduo tratado é retirado para que se possa ser introduzida uma nova carga. Já no modelo contínuo, o abastecimento de biomassa acontece diariamente, o volume permanece constante ao longo do tratamento, ou seja, para cada quantidade de resíduo que entra no biodigestor sairá uma quantidade de resíduo tratado igual. Os biodigestores contínuos como os modelos indiano, canadense, chinês e filipino, são versáteis, sendo que os mais diferentes resíduos orgânicos podem ser usados como substrato no seu abastecimento. Sua operação necessita que haja carga diária (OLIVEIRA, 2004).

O biodigestor de fluxo tubular, também conhecido como canadense, objeto de estudo no presente trabalho, é caracterizado por possuir uma base retangular impermeabilizada cavada no chão, onde o substrato é depositado, com a largura maior que a profundidade, fazendo com que haja maior área de exposição ao sol. O gasômetro é feito em manta flexível de PVC que pode ser retirado e facilita o manuseio e limpeza. A manta se infla à medida em que ocorre a produção de biogás, a composição desse tipo de biodigestor é basicamente uma caixa de distribuição, o gasômetro de PVC que é colocado em cima de uma lagoa perfurada no solo e impermeabilizada e a tubulação de saída de gás como os seus componentes (BARICHELLO *et al.*, 2010). Conforme a Figura 3, apresenta:

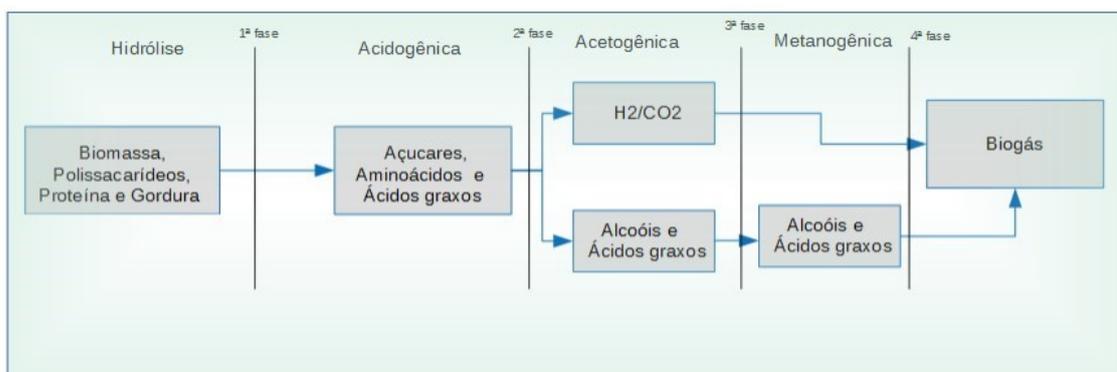
Figura 3 - Seção transversal do biodigestor modelo canadense



Fonte: CERVI (2010).

A fermentação ocorre em um biodigestor, que se compõe, de uma câmara fechada na qual a biomassa é fermentada anaeróbica (EMBRAPA, 2004). O processo de degradação é dividido em quatro etapas: fase da hidrólise, fase acidogênica, fase acetogênica e fase metanogênica. Uma ilustração é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – As 4 fases da degradação anaeróbia



Fonte: Adaptado de Weiland (2003).

Segundo Weiland (2003), para que o processo de fermentação anaeróbica ocorra é necessário o controle de algumas condições favoráveis, como: potencial hidrogeniônico (pH), temperatura e tempo de detenção. A degradação é um procedimento natural microbiológico que acontece sem a presença do oxigênio, onde a matéria orgânica é destruída produzindo, entre outros subprodutos, uma combinação de gases, principalmente, o metano (C-CH₄) e o dióxido de carbono (OLIVEIRA, 2012).

A degradação apresenta-se como uma alternativa para o tratamento e a reciclagem energética dos nutrientes contidos nos dejetos animais e resíduos vegetais, reduzindo o potencial poluidor e os riscos sanitários, além de promover a geração do biogás e de biofertilizante (RODRIGUES *et al.*, 2012).

O processo de degradação pode ser utilizado para resíduos orgânicos, tanto sólidos quanto líquidos, constituindo uma forma eficiente de tratamento, por trabalhar com quantidades consideráveis de matéria orgânica (WALKER, 2009). Esse processo ocorre através da atividade realizada por grupos específicos de bactérias, que atuam sobre o dejetos orgânicos. O resultado é a produção de biogás, que é composto principalmente pelo gás metano e por uma combinação de outros gases (AMARAL *et al.*, 2004), como o dióxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico e amônia (PERMINIO, 2013). Ao final do processo de degradação tem-se também a produção de biofertilizante, uma substância rica em nutrientes e material orgânico humificado (AMARAL *et al.*, 2004).

O Biogás produzido pelo Biodigestor é obtido via da fermentação bacteriana anaeróbica. Com esse processo biológico se obtém energia sem gasto de energia,

portanto, no final do processo o saldo é total. Pode-se usar esse processo de fermentação, dejetos humano, dejetos bovino, suíno, equino, caprino, de aves, esgoto doméstico, vinhoto, plantas herbáceas, rejeitos agrícolas e capins em geral (WILAWAN *et al.*, 2014).

A degradação depende de alguns fatores que podem interferir diretamente no resultado do sistema, com consequentes perdas dos potenciais energéticos contidos nos dejetos (ORRICO JÚNIOR *et al.*, 2010). Como a degradação é um processo biológico, vê-se a necessidade de manter condições favoráveis para que ocorra a eficiência do processo, que pode ser afetado por vários fatores que podem favorecê-lo ou não, interferindo na degradação da substância, no crescimento e declínio dos microrganismos e na produção de biogás.

Segundo Orrico Júnior, (2007), os fatores importantes no processo no biodigestor, destacam-se o tipo de substrato, o pH, a temperatura, o tempo de retenção hidráulica (TRH), a presença de inóculo e nutrientes, a composição da substância e a porcentagem de sólidos totais e, a interação entre os microrganismos envolvidos:

O substrato é usado misturado com a substância para influenciar diretamente na produção do biogás pela sua alta produção específica de biogás gerado em comparação com o esterco de gado bovino.

O pH ideal para o processo de degradação é em torno de 6,0 a 8,0, sendo ótimo entre 7,0 e 7,2. As bactérias metanogênicas acetoclásticas são extremamente sensíveis a variação brusca de qualquer fator, então uma possível perturbação no pH compromete a atuação desses microrganismos (OLIVEIRA, 2012). Em substância formada pela combinação de dejetos de ovino caprino, manipulei-a e biofertilizante, a faixa ótima de pH encontrada para o desenvolvimento das bactérias metanogênicas foi entre 6,2 e 7,8, oferecendo assim, estabilidade para o funcionamento do sistema (SILVA *et al.*, 2013).

A temperatura é um dos principais fatores físicos no processo de digestão, pois influencia diretamente a velocidade de reação. Em função do tipo de bactéria, o processo pode ocorrer numa faixa de 20 a 70 °C (LUCAS JÚNIOR; SANTOS, 2000). De acordo com o estudo de Casto e Cortez (1998), a temperatura mais adequada para

produção de biogás, obtida em experimento em laboratório com biodigestor rural modelo indiano, foi de 31 °C.

O TRH é o intervalo de tempo necessário de permanência do dejetos dentro do biodigestor para que ocorra o processo de degradação de maneira adequada (COSTA, 2009), sendo esse fator ligado diretamente ao teor de sólidos totais (ST) da substância (AUGUSTO, 2007). De acordo com Orrico Júnior *et al.* (2010), o tempo de retenção hidráulica representa o período necessário para a combinação ser digerida no biodigestor, o que ocorre quando a produção de biogás é máxima, definindo assim o ponto de melhor qualidade do biogás no processo de degradação.

Segundo Stéfano (2013) e Orrico Júnior *et al.* (2010), quanto mais carga diária de biomassa é colocada no biodigestor, menor é o tempo de retenção. No entanto, o tempo de retenção reduzido pode tornar a degradação incompleta, desencadeando um desequilíbrio no processo. Matos *et al.* (2016), na avaliação dos benefícios do uso de diferentes doses de enzimas e tempos de retenção hidráulica (7, 14 e 21 dias) sobre a produção de biogás, recomendaram a utilidade da concentração de até 1,0 g/L de enzima e tempo de retenção hidráulica de somente 7 dias.

O trabalho silencioso das bactérias é em favor do progresso e conforto da humanidade produzindo energia, fertilizando o solo e evitando a contaminação da água e do solo. E a fermentação anaeróbica produzida em um biodigestor, com a produção de gases pode ser utilizada diretamente como energia para queima, utilizados para o cozimento de alimentos ou adaptado para a produção de energia elétrica para emprego em iluminação ou acionamento de motores (LABATUT *et al.*, 2011).

2.3.1 Biogás

O Biogás é uma fonte abundante, não-poluidora e acessível de energia. Sua utilidade permitiria que a humanidade reduzisse, drasticamente, o consumo de petróleo (BARREIRA, 2011). Geralmente, os biodigestores são constituídos adaptando as necessidades da propriedade, sendo que os tipos de biodigestores mais encontrados na literatura são: modelo indiano, chinês, batelada e canadense (GASPAR, 2003).

O biogás é uma combinação gasosa combustível gerada pela fermentação da matéria orgânica. A proporção de cada gás na combinação depende de várias referências, como o tipo de biodigestor e a substância a digerir. No geral, o biogás é constituído principalmente por cerca de 60 a 70% de metano, 30 a 40% de dióxido de carbono e outros gases como nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e gás sulfídrico (SANTANA *et al.*, 2012). A eficiência do processo é influenciada por alguns fatores como carga orgânica, pressão e temperatura durante a fermentação, o biogás pode conter entre 40 e 80% de metano (GALBIATTI *et al.*, 2010).

O biogás é um combustível gasoso com um conteúdo energético elevado semelhante ao gás natural, composto por hidrocarbonetos de cadeia curta e linear. Esse combustível pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica em uma propriedade rural, contribuindo para a redução dos custos de produção (CASTANHO; ARRUDA, 2008). A composição do biogás varia, especialmente, conforme a temperatura no interior do biodigestor, o resíduo com que é alimentado e o tempo de retenção hidráulica (WALKER, 2009). A qualidade do biogás como combustível está relacionada ao seu poder calorífico, que varia em função da porcentagem de CH₄ presente.

A separação de sólidos totais no processo de degradação em biodigestores do tipo batelada com dejetos de bovinos de corte resultou em uma substância de melhor qualidade para produção de CH₄ (ZANATO, 2014). Além disso, os trabalhos têm demonstrado que, com o aumento da proporção de concentrado na dieta animal, maior é a produção de CH₄. Orrico Júnior *et al.* (2012) trabalhando com diferentes relações de volumoso e concentrado (40:60 e 60:40), observaram que a maior degradação dos dejetos provenientes da dieta com maior proporção de concentração refletiu diretamente sobre a produção de CH₄.

A maneira mais prática para se utilizar o biogás é o seu uso em geradores para a produção de energia elétrica, embora seja possível também, o uso direto para queima. Para que o biogás possa ser utilizado como combustível em carros, tratores e caminhões recomenda-se que ele seja purificado com objetivo de remover o dióxido de carbono para poder ser comprimido à alta pressão (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

2.3.2 Biofertilizante

Em 2004, foi aprovado o Decreto nº 4954 de 14/01 que regulamenta a Lei nº 6894, de 16/12/80 (BRASIL, 2004). Este decreto define os fertilizantes orgânicos como: “produtos de natureza fundamentalmente orgânica, obtidos por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais”. O Ministério da Agricultura, de acordo com o Decreto nº 86955 de 18 de fevereiro de 1982, define o biofertilizante como: “produto que contém princípio ativo ou agente capaz de atuar direta ou indiretamente sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, elevando sua produtividade” (SOUZA *et al.*, 2017). Segundo a Ricci (2004), o biofertilizante é um resíduo do biodigestor, obtido a partir da fermentação de materiais orgânicos de diferentes tipos e origens. Além de ser importante fonte de macro e micronutrientes, contém substâncias com potencial de atuar como defensivos naturais quando regularmente aplicada via foliar.

Os resíduos da degradação em geral apresentam alto teor de nitrogênio (N), fosfato, potássio e demais nutrientes em consequência da perda de carbono (C) (ARRUDA *et al.*, 2002). Além disso, apresenta baixa relação C/N, o que confere características que possibilita seu uso como biofertilizante. Além disso, o biofertilizante se encontra em grau avançado de decomposição, o que aumenta a sua eficiência e solubilização parcial de alguns nutrientes (ARRUDA *et al.*, 2002).

O emprego de fertilizantes orgânicos tem papel fundamental no aumento de produção, visto que, podem melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo, além de promover um desenvolvimento vegetativo adequado à obtenção de produtividade economicamente viável produtores rurais (SILVA *et al.*, 2012b; OLIVEIRA *et al.*, 2004; ARAÚJO *et al.*, 2007a). Araújo *et al.* (2007b), ao estudarem a eficiência do pimentão adubado com dejetos bovino na presença e ausência do biofertilizante bovino, observaram que o biofertilizante bovino, aplicado de forma isolada ou associado com matéria orgânica, pode ser utilizado como alternativa para fertilização não-convencional no pimentão. Verificou-se também que, a aplicação de biofertilizante bovino, via foliar, atendeu às exigências nutricionais do pimentão.

Campos *et al.*, (2011), analisando o efeito do biofertilizante bovino líquido na biometria e produção de matéria seca das mudas de maracujazeiro amarelo observaram que o aumento das doses de biofertilizante estimulou o crescimento inicial e a produção de matéria seca do maracujazeiro amarelo.

2.4 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PEQUENA ESCALA

O Brasil está sendo reconhecido internacionalmente pela alta inserção de pequenas unidades geradoras de energia renováveis em sua matriz energética, sobretudo, devido a expressiva contribuição da energia hidráulica (DRANKA *et al.*, 2018). Nos últimos anos, o setor energético brasileiro, está sendo desafiado e forçado realizar algumas mudanças regulatórias.

Neste cenário, de crescimento acelerado da geração em pequena escala distribuída (ANEEL, 2018), necessita de mudanças nos tipos de tarifas existente. O crescente aumento do nível de consciência ambiental dos consumidores, as novas políticas regulatórias e a volatilidade nos preços da energia elétrica, por exemplo são aspectos fundamentais a serem levados em consideração nos processos de tomada de decisão em investir em biodigestores.

A produção de energia elétrica a partir da biomassa, atualmente, é defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento. Considerado um dos principais causadores de problemas ambientais no agronegócio, o dejetos gerado na criação de animais pode ser aproveitado para a geração de gás combustível e fertilizante, no qual a matéria orgânica é utilizada como substância para bactérias metanogênicas (bactérias formadoras de gás metano) responsáveis pela produção de biogás (PALACIO *et al.*, 2014).

Segundo Florindo (2015), os biodigestores têm sido alvo de destaque a crise de energia e conseqüente busca por fontes alternativas. Este autor ressalta que os biodigestores são importantes no intenso processo de modernização da agropecuária, o qual demanda energia e gera resíduos animais e de culturas que pode ocasionar problemas de ordem sanitária.

A utilidade do biogás, como recurso energético, se deve principalmente ao metano (CH₄), o qual quando puro em Condições Normais, de pressão (1 atm.) e temperatura (0°), tem um Poder Calorífico Inferior (PCI) de 9,9 kWe/m³. O biogás com

um teor de metano entre 50% e 80% terão um poder calorífico inferior entre 4,95 e 7,92 kWe/m, respectivamente (COLDEBELLA *et al.*, 2006).

A ANEEL criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, que autoriza a transformação do excedente em créditos, que podem ser trocados com a distribuidora local e reduzir o valor da fatura de eletricidade. Para isso, o consumidor precisa ter um sistema de monitoramento da sua rede (ANEEL, 2018).

Isso pode ser feito com ajuda de medidores inteligentes que, ao contrário dos relógios analógicos, avaliam a rede de forma mais rápida e precisa. O equipamento registra quanto o consumidor envia de energia e quanto usa do sistema tradicional. Se ele receber mais do que enviou, paga a diferença para a distribuidora. Caso contrário, ganha créditos na próxima fatura. O prazo de validade de uso dos créditos é de 60 meses. Além disso, é possível abater uma fatura de outro local que esteja na área de atendimento da distribuidora, como o de uma filial.

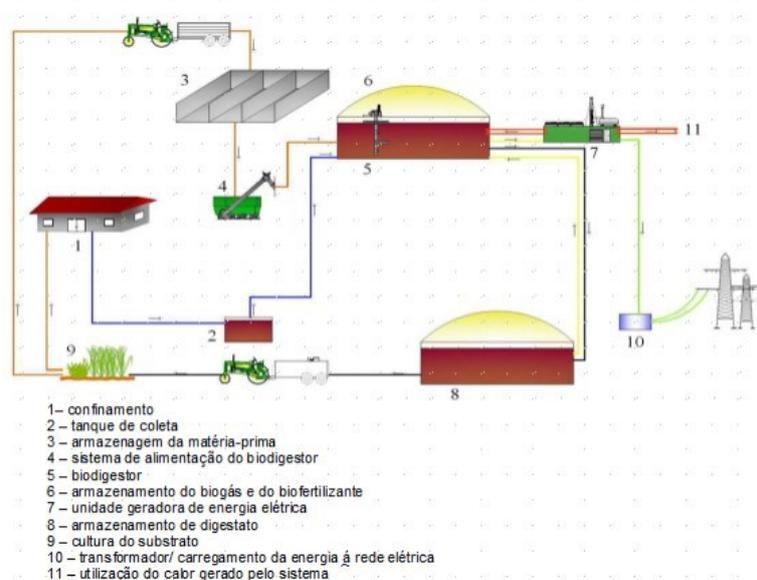
2.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

O processo que ocorre a degradação é do tipo fluxo contínuo do tipo úmida. A parte sólida no biodigestor deve ser menor que 12%, essa é a umidade permitida no bombeamento da matéria do biodigestor DEUBLEIN *et al.*, (2008) apud PIÑAS, (2016).

A matéria-prima principal usada na avaliação técnica é o dejetos da bovinocultura, que são mantidos apenas no sistema confinado. Os bovinos vivem em confinamento, facilitando a coleta dos dejetos e são encaminhados para o tratamento (ZANETTE, 2009) apud (PIÑAS, 2016). Os substratos são utilizados, em geral, para aumentar a produção de biogás, pois, possuem quantidades elevadas de carbono em relação ao nitrogênio, o que permite que estas, ao serem misturadas com a substância que contém baixo teor de carbono, como os dejetos animais, podem chegar a ter valores equilibrados de carbono e nitrogênio, o que pode permitir um ótimo desempenho dos processos de digestão anaeróbia (SgROI *et al.*, 2015) apud (PIÑAS, 2016).

A Figura 5 apresenta as etapas da degradação avaliado nesse estudo, no qual a degradação de dejetos da bovinocultura é a substância principal e, a forragem do capim elefante e a forragem de milho são os substratos.

Figura 5 - Representação do sistema produtivo de biofertilizante e biogás



Fonte: Adaptação de SgROI *et al.* (2015) apud Piñas, (2016)

O milho é uma das culturas mais espacialmente homogêneas disponível a nível mundial e sua disponibilidade como substrato misturado com os dejetos animais pode resultar tecnicamente factível. O capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) é uma gramínea forrageira com excelente potencial para a produção de matéria seca, tendo variedades com poderes caloríficos variáveis PIÑAS, (2016).

A quantificação da produtividade de energia elétrica é necessária considerar a dimensão do sistema, pequeno á grande porte, na faixa da potência instalada de 100 kWe a 1.000 kWe. Essa definição quanto aos tamanhos dos sistemas foi classificada por Poeschl *et al.* (2012) apud PIÑAS, (2016) e Pullem *et al.* (2015) apud PIÑAS, (2016).

A definição das efetividades elétricas e térmicas do sistema produtivo de biogás e biofertilizante, fez uso de ajuste de resultado das variações das eficiências elétricas e térmica. Os motores que fazem a conversão do biogás em energia elétrica e que apresentam um resultado satisfatório, são motores de combustão interna tipo Otto-gás (PIÑAS, 2016).

No processo de degradação considera-se os três sistemas, tendo o sistema de apenas dejetos bovinos, o qual é chamado de Projeto A os sistemas de degradação de dejetos dos bovinos combinado com o substrato, com a forragem de milho, a qual é chamado de Projeto B e com a forragem de capim a qual é chamado de Projeto C.

A produção do biogás e da concentração do metano é diretamente ligada nas dimensões do sistema. Para a análise é necessário considerar os fatores padrão com: a quantidade de metano no biogás gerada na degradação, poder calorífico menor do biogás e tempo total do processo do sistema, como pode ser visto na (Tabela1).

Tabela 1 – Referências para análise da produtividade do biogás

Padrões	Unidade	Valor
Porcentual de metano no biogás	%	65
Poder Calorífico	kWh/Nm ³	6,5
Tempo de Operação do Motor gerador	h/a	8.000
Poder Calorífico	MJ/Nm ³	35,53

Fonte: Adaptação de PIÑAS, (2016)

O propósito de fazer a misturar a substância principal com um substrato é influenciar diretamente na produtividade do biogás pelo meio da alteração do poder calorífico

2.5.1 Quantidade de substância necessário no sistema

Para quantificar a substância e os substratos convertidos em unidade de percentual mássica a ser usado no processo, é necessário iniciar fazendo uma análise da máxima quantidade possível no biodigestor tenha um bom desempenho no processo. Primeiramente, é necessário definir o balanço da relação C:N, que é um importante fator considerado na geração boa do biogás. Para mensurar a relação de C:N será utilizada a Eq. 1 que considera as concentrações de carbono e nitrogênio de cada matéria-prima (PIÑAS, 2016).

$$f = \frac{C1*Q1+C2*Q2+\dots+Cn*Qn}{N1*Q1+N2*Q2+Nn*Qn} \quad (1)$$

Na qual:

f = C:N da combinação da substância e substrato;

C_i = Percentual de C na matéria-prima [%];

N_i = Percentual de N orgânico na matéria-prima [%];

Q_i = Peso da substância e substrato [kg].

Para definir a quantidade de biogás em unidade de tonelada de combinação do processo deve-se considerar as eficiências médios dos dejetos bovino e dos substratos usados, que são obtidos a partir das quantidades de sólidos totais, sólidos voláteis e a eficiência específica de biogás das substâncias avaliadas (Tabela 2). Assim, deve-se considerar a percentual de substâncias e substrato a utilizar, o qual é definido pela relação de C:N ótima da combinação. A eficiência do biogás por tonelada da combinação das substâncias pode ser calculada através da Eq. 2, considerando apenas o percentual de substância e substrato a utilizado e sua eficiência de biogás respectivo (PROCHNOW *et al.* 2009) apud (PIÑAS, 2016). Esta avaliação considera a quantidade de substrato a qual é dependente dos intervalos mínimos e máximos da relação C:N conforme definida anteriormente.

Tabela 2: Referências usada para avaliação técnica

Padrões	Unidade	Dejeto bovino	Forragem de milho
Sólidos totais	%	20,1	33,5
Sólidos voláteis	%	80	95,5
Relação C:N	C:N	15,44	40,5
Nitrogênio (média)	%	0,3 – 2,0	0,77 – 1,11
Eficiência específico do biogás	m ³ /kg SV	0,28	0,6

Fonte: Adaptação PIÑAS, (2016).

$$EB = x_1 * S_1 + x_2 * S_2 + \dots + x_n * S_n \quad (2)$$

Na qual:

EB = Eficiência de biogás da combinação [mbiogás/toncombinação];

S₁ = Eficiência de biogás da substância [biogás/ton];

S₂ = Eficiência de biogás da substância [biogás/ton];

S_n = Eficiência de biogás da substância [biogás/ton];

x₁ = Quantidade mássica da substância ou substrato 1;

x₂ = Quantidade mássica da substância ou substrato 2; e

x_n = Quantidade mássica da substância ou substrato n.

A definição do território (hectares) que vai ser usado para produzir os substratos depende do valor das potências elétricas definidas na avaliação, deve-se considerar os valores médios da eficiência por território (hectares) dos substratos usados na produção de biogás (Tabela 2). Para definir a quantidade de bovinos foi

considerado a máxima quantidade de produção de dejetos por bovino (unidade geradora), um bovino adulto de 300 kg de peso (SANTOS, 2012) apud (PIÑAS, 2016).

2.5.1.1 Estruturação do sistema biodigestor

O Tempo Retenção Hidráulica é um dos principais padrões para o processo depende da temperatura do sistema. Considerando a operação do sistema de biogás em condições mesofílicas de 38° C. Assim, se faz necessário o aquecimento do sistema. O TRH do sistema é calculado pela Eq. 3, que foi estimada através partir de dados experimentais de sistemas produtivo de biogás semelhantes, mas em algumas variações na temperatura e TRH Unidade de Planejamento Minero Energética (UPME, 2013) apud (PIÑAS, 2016).

$$TRH = -51,227*Ln(T) + 206,72 \quad (3)$$

Na qual:

TRH = Tempo de retenção hidráulico [dias];

T= Temperatura [°C].

A dimensão do sistema de biodigestores é dependente de alguns fatores como: o tipo e a quantidade de substância, que será carregada por dia e o TRH. Para dimensionar os componentes do sistema, tais como: sistema de preparação de dejetos, silo de armazenagem de forragem, gasômetro para o armazenamento de biogás e tanque de armazenamento do digestato, podendo usar o método de cálculo de Deublein *et al.* (2008) apud PIÑAS (2016), que faz consideração dos critérios para o projeto de biodigestores de fluxo contínuo, com agitação e aquecimento.

A projeção do biodigestor, pode considerar que os sólidos totais máximos permitidos para a degradação úmida sejam de 12%, calculando a quantidade de substância carregada no sistema multiplicando pelo tempo de retenção hidráulico. Também, é necessário o fator de segurança, que é fundamental na instalação do reator. Para as substâncias líquidas e semilíquidas, considera a densidade equivalem

a 1.000 kg/m³, já para as forragens a densidade de 700 kg/m³. Esses valores são para o sistema de degradação apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Referências de valores para o sistema de degradação

Referências	Unid.	Tanque de preparação	Silo	Biodigestor	Tanque armazen. de digestato
Tempo de retenção	Dia	10	10	TRH	10
Fator de projeto	F	1,25	1	1,25	1,1
Relação altura/diâmetro	H/D	2	-	1/2	1/3
Densidade de substância/substrato	kg/m ³	1.000	700	1.000	1.000

Fonte: Adaptação de PIÑAS, (2016)

Para dimensionar os componentes do sistema (biodigestor, sistema de preparação de dejetos bovino, silo para armazenamento das forragens e tanque de armazenamento de digestato) através das equações 4, 5, 6 e 7. O cálculo do volume do gasômetro para armazenamento de biogás, considerou-se a relação de volume de biodigestor/volume de gasômetro de 1:1, tendo em consideração que o armazenamento tem que ser no mínimo, suficiente para um dia de produção de biogás. (PIÑAS, 2016).

$$VB = \dot{M}t * \rho - 1 \times TRH * fBD \quad (4)$$

Na qual:

VB = Volume do biodigestor [m³];

Mt = Massa total das substâncias e substrato adicionado diariamente [ton/dia];

ρ = Densidade de substâncias a ingressar no biodigestor [ton/m³];

TRH = Tempo de retenção hidráulica [dias]; e

fBD = Fator de projeto para o biodigestor.

Tanque de preparação:

$$VPT = \dot{M}SP + \acute{a}gua * \rho - 1 * TR * fPT \quad (5)$$

Silo (armazenamento de forragens):

$$VS = \dot{M}CO * \rho - 1 * TR * fS \quad (6)$$

Tanque de armazenamento de digestato

$$VAD = \dot{MAD} * \rho - 1 * TR * fAD \quad (7)$$

Na qual:

VPT ; VS ; VAD = Volume dos componentes [m^3];

$MSP+agua$; MCO ; MAD = Massa total das substâncias para cada componente [ton/dia];

ρ = Densidade das substâncias/substrato [ton/m^3];

TR = Tempo de retenção para cada componente [dias]; e

fPT ; fS ; fAD = Fator de projeto para cada componente.

2.5.1.2 Déficit energético do sistema

É necessário quantificar o gasto energético do sistema, pois a quantidade de energia usada será descontada da quantidade de energia gerada. O gasto energético do sistema gerador, ocorre principalmente, pelo aquecimento do biodigestor, nas bombas para o bombeamento de substância líquido ao biodigestor desde o tanque de preparação de dejetos, transportadores de forragem de milho desde o silo até o biodigestor e agitadores para a agitação do biodigestor, em baixa rotação. Além disso, é somado ao gasto energético o consumo de energia usada no processo de dessulfurização (PIÑAS, 2016).

Os cálculos das demandas de calor e perdas de calor no biodigestor foram feitos a partir da metodologia para avaliar biodigestores descrita por Deublein *et al.* (2008) apud PIÑAS, (2016)., a qual fornece valores padrão dos coeficientes de transferência de calor para biodigestores (RUTZ, 2015) apud (PIÑAS, 2016), fornecem detalhes das perdas de calor do sistema. O cálculo da demanda de energia e perdas de calor é feita utilizando as equações (8), (9) e (10);

$$Q = mt * Cp * (T2 - T1) \quad (8)$$

Na qual:

Q = Calor requerido para aquecer a substância [kWe/a];

mt = Fluxo de massa de combinação de substância [ton/h];

Cp = Calor específico de substância [kJ/kg.°C];

$T1$ = Temperatura de inicial de substância [°C]; e

T_2 = Temperatura da degradação[°C].

$$Q_{Perdido} = A * U * (T_2 - T_1) \quad (9)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_a}} \quad (10)$$

Na qual:

$Q_{Perdido}$ = Calor perdido nas superfícies do biodigestor [kWe/a];

A = Área de transferência de calor [m²];

U = Coeficiente global de transferência de calor [W/m²°C];

T_1 = Temperatura ao exterior do biodigestor [°C];

T_2 = Temperatura ao interior do biodigestor [°C];

h_i = Coeficiente de transferência de calor ao interior do biodigestor [W/m²°C];

h_a = Coeficiente de transferência de calor ao exterior do biodigestor [W/m²°C];

d_1 = Espessura de isolante 1 [m];

d_2 = Espessura de isolante 2 [m];

k_1 = Condutividade térmica do isolante 1 [W/m°C]; e

k_2 = Condutividade térmica do isolante 2 [W/m°C].

Para o cálculo do gasto energético, considera-se os valores de coeficientes de transferência de calor, condutividade térmica das isolantes do biodigestor, temperaturas de degradação e calor específico das substâncias (Tabela 4).

Tabela 4: Referências da avaliação das demandas e perdas de calor no sistema

Referências	Unidade	Valor
Temperatura da digestão	T_2 [°C]	38
Temperatura inicial da substância	T_1 [°C]	25
Calor específico de substância	C_p [kJ/kg. °C]	4,19
Coeficiente de transferência de calor interno	h_i [W/m ² . °C]	4
Coeficiente de transferência de calor externo	h_a [W/m ² . °C]	400
Espessura de isolamento poliestireno	d [m]	0,1
Condutividade térmica poliestireno	k [W/mK]	0,05

Fonte: Deublein, (2011) apud Piñas, (2016).

Para definir o gasto energético, dos outros componentes, tais como transportadores do silo, agitadores e bombas, utilizou-se dados padrão de projeto dos

componentes de um sistema de biogás com agitação e aquecimento e combinação de substâncias. Para definir a potência de bombeamento utiliza-se a Eq. 11. Além disso, o gasto energético dos outros componentes, é determinado a partir do tempo de utilidade dos equipamentos, tendo em consideração quantidade de substância bombeado, quantidade de substrato transportado do silo ao biodigestor e volume do biodigestor, no caso da agitação (Tabela 5).

Tabela 5: Referências da avaliação do gasto energético do sistema

Equipamentos	Referências	Unidade	Valor
Bomba	Varição de pressão	bar	1
Bomba	Eficiência	h	0,5
Bomba	Tempo de bombeamento	horas	5
Transportadora do silo	Potência nominal da correia	kW	5
Transportadora do silo	Capacidade nominal	ton/h	1
Agitação	Densidade energética	w/m ³ BD	10
Agitação	Tempo de trabalho	min/h	5

Fonte: Adaptação Piñas(2016)

$$P_{VP} = \frac{V_{VP} \cdot \Delta P_{VP} \cdot 100}{\eta \cdot 3600} V_{VP} = \frac{V_{BD}}{t_B} \quad (11)$$

Na qual:

V_{VP} = Velocidade nominal de bombeamento [m³/h];

V_{BD} = Volume do biodigestor [m³];

t_B = Tempo de bombeamento (carga completa) [horas];

P_{VP} = Potência da bomba [kW];

ΔP_{VP} = Variação de pressão (pressão de carga) [bar]; e

η = eficiência.

O equipamento para realizar a dessulfurização também apresenta gasto energético, o qual é considerado no balanço final. Para isso, é considerada os dados fornecidos na Tabela 6.

Tabela 6: Consumo energético dos sistemas de remoção biológica de H₂S

Equipamentos	Unidade	Valor			
Capacidade	m ³ /h	200	500	1.000	2.000
Consumo	kWh/ano	9.000	12.000	21.000	24.000

Fonte: PIÑAS (2016).

2.6 TECNOLOGIA DE CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA

A energia retida no biogás é em média de 20,2 MJ/kg, a energia obtida pode variar dependendo da finalidade para qual vai ser utilizada e tipo de equipamentos que são utilizados, isto equipamentos vai definir a eficiência na qual a energia é utilizada, tendo eficiências de utilidade por equipamento de 45,32% a 55,47% para fogões de gás e biogás, 3% para equipamento de iluminação, 68% para aquecedor de água com biogás, de 3% a 6% nos fogões a forno aberto e 34% a 42% para geração de eletricidade nos motores de combustão interna (ASMELL *et al.*, 2001 apud PIÑAS, 2016).

A energia gerada pela combustão do biogás possui muitas utilidades, dependendo da fonte de biogás e a demanda local. Normalmente, o biogás pode ser usado para a produção de calor por combustão direta, a produção de eletricidade em células de combustível ou microturbinas, geração em Sistema Combinado de Calor e Energia Elétrica “*Combined Heat and Power (CHP)*”, pode ser introduzida no sistema de distribuição de gás natural ou como combustível para veículos (TEODORITA *et al.*, 2008 apud PIÑAS, 2016).

A energia elétrica produzida em sistemas CHP pode ser vendida à rede elétrica e o calor pode ser distribuído via sistema de aquecimento urbano para os consumidores (PALACIO *et al.*, 2014 apud PIÑAS, 2016).

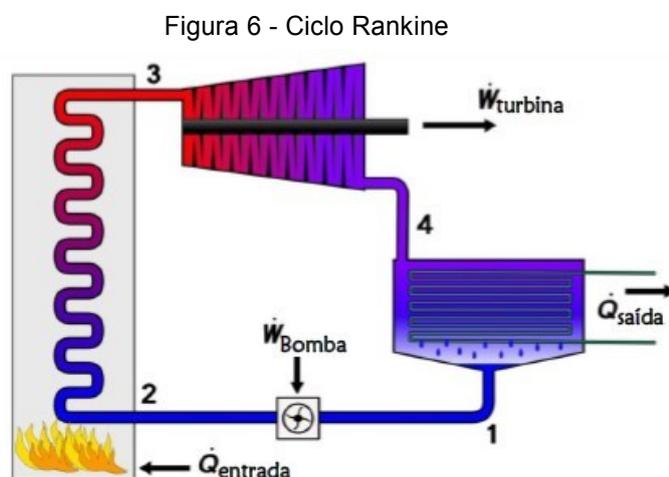
Os sistemas de geração de eletricidade e calor (CHP) são muito comuns em unidades de biogás, pois apresentam algumas vantagens de produzir energia elétrica e calor em paralelo. Cerca de 50% dos CHPs instalados em unidades de biogás na Europa são como motores de quatro tempos e cerca de 50% com motores diesel de ignição (DEUBLEIN *et al.*, 2008 apud PIÑAS, 2016); (LAMPE *et al.*, 2010 apud PIÑAS, 2016).

Um motor tipo otto-gás, a energia é convertida em energia aproveitável e não-aproveitável. Em torno de 90% da energia gerada poderá ser usada, dos 10% são, 35% é a energia mecânica (eletricidade) e, 55% é o calor dissipado. O calor total produzido, a maior parcela de calor disponível é de gases de escape e do ciclo de resfriamento do motor, tendo que 1 a 3% e do ciclo de lubrificação que tem temperaturas de 80 a 90 °C, 3 a 5% são perdas na radiação, 30 a 40% é a energia para o resfriamento do motor de temperaturas entre os intervalos 80 a 90 °C e, 50 a 60% é a energia dos gases de escape que podem sair a 460 a 550 °C.

O calor residual dos sistemas de biogás com temperaturas relativamente baixas e que variam desde 80 a 550 °C pode resultar na difícil conversão em outras formas de energia. No entanto, existem soluções técnicas para converter o calor residual em eletricidade adicional em ciclos termodinâmicos e, assim, obter receitas provenientes da venda de energia elétrica. Estes ciclos termodinâmicos podem ser (TEODORITA *et al.*, 2008 apud PIÑAS, 2016):

- Ciclo Rankine Convencional (Clausius Rankine Cycle “CRC”)
- Ciclo Rankine Orgânico (Organic Rankine Cycle “ORC”)
- Ciclo Kalina
- Ciclo Stirling
- Turbina de gás de escape

Geralmente, um ciclo termodinâmico é constituído por uma série de processos termodinâmicos da transferência de calor e de trabalho, enquanto se varia a pressão, temperatura, e outras variáveis de estado (vide Figura 6). Turbine saída.



Fonte: Teodorita *et al.* (2008) apud PIÑAS, (2016).

Os motores a gás-Otto (vide Figura 5) são motores especificamente concebido para a utilidade de biogás de acordo com o princípio Otto. Eles são operados geralmente operado com excedentes elevados de ar, a fim de minimizar as emissões de monóxido de carbono (TEODORITA *et al.*, 2008 apud PIÑAS, 2016). A capacidade eléctrica de motores a gás-Otto está geralmente compreendida entre 100 kWe a 1 MWe e pode ser utilizado para produção de biogás com teores de metano a partir de 45%. Os intervalos de eficiência eléctrica se encontram entre 34 e 40%

de motores a gás-Otto de tecnologia especial para sistemas de biogás é de no mínimo 120 mil horas, com manutenção especial a cada 60 mil horas de funcionamento. Os motores são feitos para operarem 24 horas por dia, com paradas eventuais para troca de óleo (BERNS *et al.*, 2015 apud PIÑAS, 2016). O tempo de vida em geral, depende muito das características de operação e em intervalo.

2.7 OPORTUNIDADES DE INVESTIMENTO

O Programa de Incentivo às Fontes de Energia no Brasil (PROINFA) tem por objetivo aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética, com a participação de produtores independentes. Assim, surge novas oportunidades para implantação de sistemas de geração de energia elétrica utilizando biogás como fonte primária de energia pode ser implantado para reduzir a participação na matriz energética do país de combustíveis fósseis e da água (PROINFA, 2010).

O investimento em energias renováveis se firma cada vez mais como uma oportunidade garantida de negócios. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 do Ministério de Minas e Energia, a oferta interna de energia elétrica deve ter um crescimento de 2% ao ano, sendo que na expansão da capacidade instalada a previsão é de que 50%, seja proveniente de fontes renováveis.

Dentro desse cenário, a biomassa merece um destaque, pois o Brasil é um dos maiores produtores mundiais dessa fonte renovável, boa parte devido à forte produção agropecuária, que somente em 2017, teve um crescimento de 13%. Além disso, o programa Renovaria do Governo Federal, criado para incentivar o uso de biocombustíveis, ajuda a reforçar a utilidade da biomassa que é uma das matérias-primas utilizadas (LUKEHURST *et al.*, 2015).

Como um bom exemplo dos benefícios do uso de biodigestores, a China comprovou desde a década de 70 com a instalação de 7,2 milhões de digestores que no biogás pode ser uma importante matriz para geração de energia. Estes biodigestores produziram um valor energético equivalente a cinco "Itaipús", ou seja, 48 milhões de toneladas de carvão mineral (NEVES, 2010).

O PROINFA criou em 2010 o Plano da Agricultura de Baixo Carbono (ABC), com a finalidade de destinar e ampliar os recursos para financiamento de custeio, comercialização e investimento para os produtores rurais adotarem técnicas agrícolas

sustentáveis. A produção de biogás a partir da degradação de dejetos de animais foi englobada pelo ABC, e pretende tratar 4,4 milhões de metros cúbicos de dejetos, e evitar a emissão de 6,9 milhões de toneladas de CO₂ ao utilizar o biogás como fonte de obtenção de energia elétrica ou para aquecimento nas propriedades (MAPA, 2017).

2.8 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para analisar a viabilidade econômica e financeira de um Projeto de Investimento (PI) pode ser utilizada a Metodologia Multi-índice (MMI). A MMI apoia o processo decisório, no que tange à aceitação ou rejeição do projeto, por meio da utilidade de indicadores, categorizados tanto nas dimensões de riscos quanto de retorno (SOUZA; CLEMENTE, 2008). Ainda, deve-se considerar os riscos relacionados ao empreendimento, tendo-se como uma alternativa a utilidade da abordagem estocástica para análise do desempenho econômico do PI (LIMA *et al.*, 2017a).

Lima *et al.* (2015) ampliaram a metodologia Multi-índice (MMI), de Souza Clemente (2008), a qual foi denominada Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA) a fim de apoiar a tomada de decisões de investimentos em ativos reais. A MMIA possibilita a análise de sensibilidade do projeto que se deseja estudar, com sete índices incorporados que analisam variações máximas permitidas antes da inviabilização do PI, considerando-se variações máximas de Taxa Mínima de Atratividade (TMA), custos estimados, receitas esperadas e utilidade concomitante destes. Maiores detalhes podem ser conferidos em Lima *et al.* (2015).

Também é necessário conhecer os riscos ligados ao empreendimento, tendo-se como uma alternativa a utilidade da abordagem estocástica para análise do desempenho econômico do PI (LIMA *et al.*, 2017). A Figura 7 mostra o resumo das definições dos índices relativos às dimensões retorno, riscos e sensibilidade, utilizadas neste trabalho, respectivamente (RASOTO, 2002; GROPELLI, NIKBAKHT, 2010; SOUZA, CLEMENTE, 2008; KOPITTKE, 2010; LIMA *et al.* 2017; DRANKA *et al.*, 2018, TORRICO *et al.*, 2018, GOFFI *et al.*, 2019).

Figura 7 - Definições dos índices conforme dimensões de retorno, riscos e sensibilidade

Dimensão	Indicador	Conceito
Retorno	VPL	O Valor Presente Líquido (VPL) é o resultado da aglomeração de todos os valores de um Fluxo de Caixa (FC) esperados, descontados para a data “zero” (presente) utilizando como taxa de desconto a TMA. Apresenta em valor monetário atual, a diferença entre os recebimentos e os pagamentos projetados do projeto.
	VPLA	O indicador VPL precisa ser ajustado para expressar a riqueza gerada pelo projeto em um horizonte de tempo mais convencional, ano ou mês, por exemplo. O VPLA é um indicador adequado para comparação de projetos com horizontes de planejamento ou análise (N) longos ou diferentes. A vantagem do VPLA em relação ao VPL é a possibilidade do gestor conseguir avaliar melhor a magnitude do ganho por unidade de tempo.
	IBC ou IL	Também conhecido como Índice de Liquidez – IL, traduz as expectativas de ganho, por unidade de capital investido no projeto, em relação ao que seria obtido se a mesma unidade fosse aplicada à TMA. O IBC, que estima a rentabilidade, busca comparar o retorno gerado pelo projeto de investimento em estudo para cada unidade monetária investida.
	ROIA (%)	O Retorno Adicional Sobre Investimento (ROIA) demonstra a melhor avaliação de rentabilidade, já eliminado o efeito da TMA, do projeto de investimento analisado. É comparado ao percentual do Valor Econômico Agregado (<i>Economic Value Added</i>).
	ROIA/TMA (%)	É a razão entre o ROIA e a TMA. Esse índice mede a magnitude do retorno extra do investimento. É o retorno adicional proporcionado pela decisão de investir no projeto.
	TIR	Esse indicador tem o objetivo de fazer com que os FCs, tanto de entrada (receitas) como de saída (custos), sejam iguais, ou seja, possuam a mesma taxa de desconto.
	<i>Payback</i>	<i>Payback</i> descontado, ajustado ou corrigido, é o período de tempo necessário para a recuperação do investimento, utilizando-se a TMA como taxa de desconto do FC.
Riscos	<i>Payback</i> /N (%)	Compreende a razão entre o <i>Payback</i> e o horizonte de planejamento. Pode ser interpretado como o risco de não recuperação do capital investido.
	TMA/TIR (%)	Definido como a razão entre a TMA e a TIR. Pode ser interpretado como o risco financeiro.
	$\Delta\%$ TMA	Caso positiva, indica a variação máxima que a TMA suporta antes do PI se tornar economicamente inviável. Caso negativa, indica a variação que a TMA deve sofrer para tornar o PI economicamente viável. A variação ocorre sempre mantendo constantes os demais Referências.
Limites de Elasticidade	$\Delta\%$ FC ₀	Caso positiva, indica a variação máxima que o Investimento Inicial (FC ₀) suporta antes do PI se tornar economicamente inviável. Caso negativa, indica a variação mínima que o FC ₀ deve sofrer para tornar o PI economicamente viável. A variação ocorre sempre mantendo constantes os demais Referências.

Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2013) e Lima *et al.* (2015).

A variabilidade dos diversos fatores envolvidos em um PI pode ser preponderante para torná-lo realmente realizável, ou dependendo do nível de risco, acarretando na sua inviabilização. O tomador de decisão deve ter as informações mais claras e realistas quanto possível, tornando assim interessante a utilidade de técnicas que contribuam para diminuição das incertezas na realização de um PI. Esse procedimento envolve a utilidade de números pseudo-aleatórios nas simulações, facilitando os cálculos dos riscos, com o auxílio de uma planilha eletrônica ou *software* específico, permitindo a geração automática dos resultados (BRUNI, 2013).

Colaborando com isso, foram utilizadas as abordagens MMIA e SMC na presente pesquisa. Segundo Correia Neto (2013), a Simulação de Monte Carlo (SMC) consiste em simular cenários futuros por meio de ferramentas computacionais com base em variáveis estocásticas. A SMC também pode ser entendida como uma análise comportamental que tem como base a estatística e por meio disso calcula o valor esperado para o projeto e sua medida de risco (CORREIA NETO, 2013; LIMA *et al.*, 2017; CARICIMI e LIMA, 2018, DRANKA *et al.*, 2018; DRANKA *et al.*, 2020; GULARTE *et al.*, 2020; TONIAL *et al.*, 2020).

Correia Neto (2013) especifica as etapas que devem ser seguidas para realizar uma SMC, sendo elas: (i) criar um modelo que descreva o fluxo de caixa e calcule o VPL do projeto; (ii) especificar a distribuição de probabilidades de cada variável estocástica do fluxo de caixa e especificar os valores das variáveis estocásticas; (iii) o computador atribui aleatoriamente um valor para cada variável estocástica dentro da distribuição de probabilidade especificada para ele; (iv) os valores gerados para cada variável estocástica, acompanhado de os demais valores, são empregados no modelo para definir os fluxos de caixas líquidos para cada período e calcular um VPL; e (v) as etapas 3 e 4 são repetidas n vezes, resultando em n VPLs, que compõem uma distribuição de probabilidades. A aplicação da SMC permite a geração de resultados e respectivas probabilidades (LIMA *et al.*, 2017a).

3 METODOLOGIA

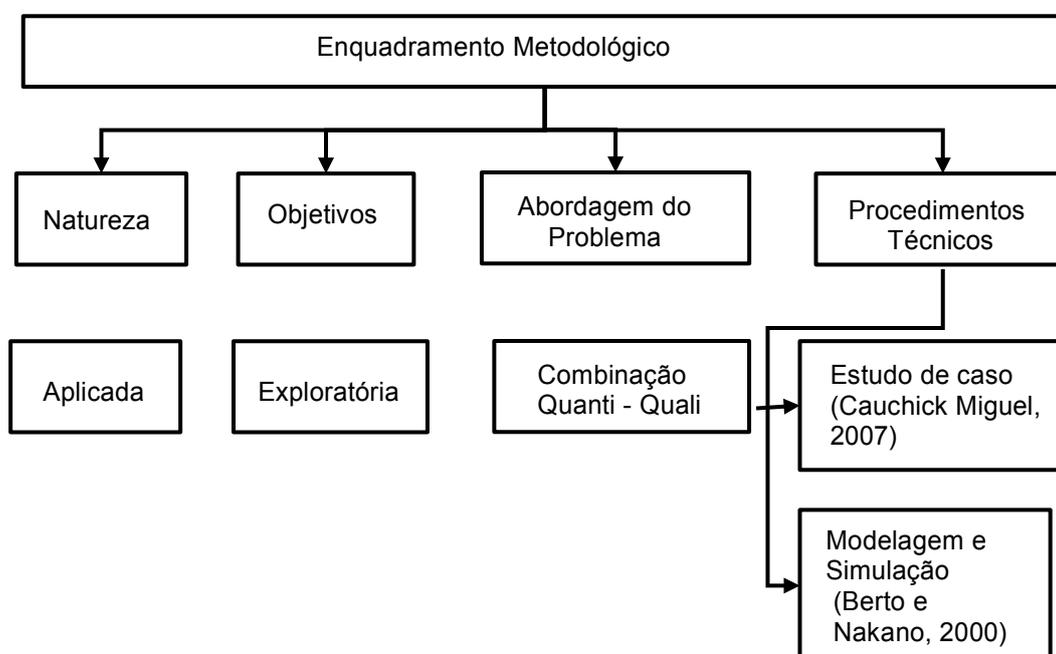
Neste capítulo é abordado a caracterização e a estratégia adotada para a realização da pesquisa: descrição das etapas para desenvolver o trabalho e alcançar os objetivos propostos.

Segundo Gil (2002), a pesquisa pode ser definida como um procedimento racional e sistemático que visa proporcionar respostas aos problemas propostos. A pesquisa é utilizada quando não se dispõe de informações suficientes para responder um problema, os quais são observados. Em relação à sua natureza se caracteriza como exploratória, visto que tem o objetivo de levantar dados para posterior aplicação dos métodos e obtenção de resultados (MARCONI e LAKATOS, 2010).

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

A Figura 8 apresenta o enquadramento metodológico da pesquisa:

Figura 8 - Enquadramento Metodológico da pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com Gil (2002), a Pesquisa aplicada se refere ao método científico que envolve a aplicação prática da ciência. Segundo Malhotra (2001), a pesquisa

exploratória é usada em casos nos quais é necessário definir o problema com maior precisão. O seu objetivo é prover critérios e compreensão. Tem as seguintes características: informações definidas ao acaso e o processo de pesquisa flexível e não-estruturado.

Com relação à abordagem do problema, este estudo é considerado qualitativo e quantitativo. Segundo Miguel Cauchick *et al.* (2012), a combinação de abordagens permite que a vantagem de uma amenize a desvantagem da outra. Por exemplo, a abordagem quantitativa é fraca em entender o contexto do fenômeno, enquanto a qualitativa não é. Por outro lado, a abordagem quantitativa é menos suscetível a vieses na coleta de dados que a abordagem qualitativa. Assim, é possível fortalecer as abordagens combinando-as.

A pesquisa qualitativa é fundamentada na interpretação os dados, ou seja, o pesquisador realiza uma descrição dos dados com a finalidade de identificar temas ou categorias para fazer uma interpretação ou extrair conclusões sobre o significado do objetivo de estudo (CRESWELL *et al.*, 2007). Neste sentido, o estudo é considerado qualitativo por realizar uma interpretação dos resultados encontrados.

Já a pesquisa quantitativa é baseada na possibilidade de realizar mensuração de variáveis, de forma que o pesquisador deve capturar as evidências por meio da mensuração das variáveis. Deste modo, nenhum subjetivismo influenciará a apreensão dos fatos no uso da indução para a geração do conhecimento (MIGUEL CAUCHICK *et al.*, 2012). Contudo, é considerado também um estudo quantitativo por realizar a contagem do número de ocorrência de metodologias utilizadas. O estudo de caso é caracterizado pelo fato de o trabalho ser executado dentro de uma propriedade rural localizada na região Sudoeste do Paraná.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

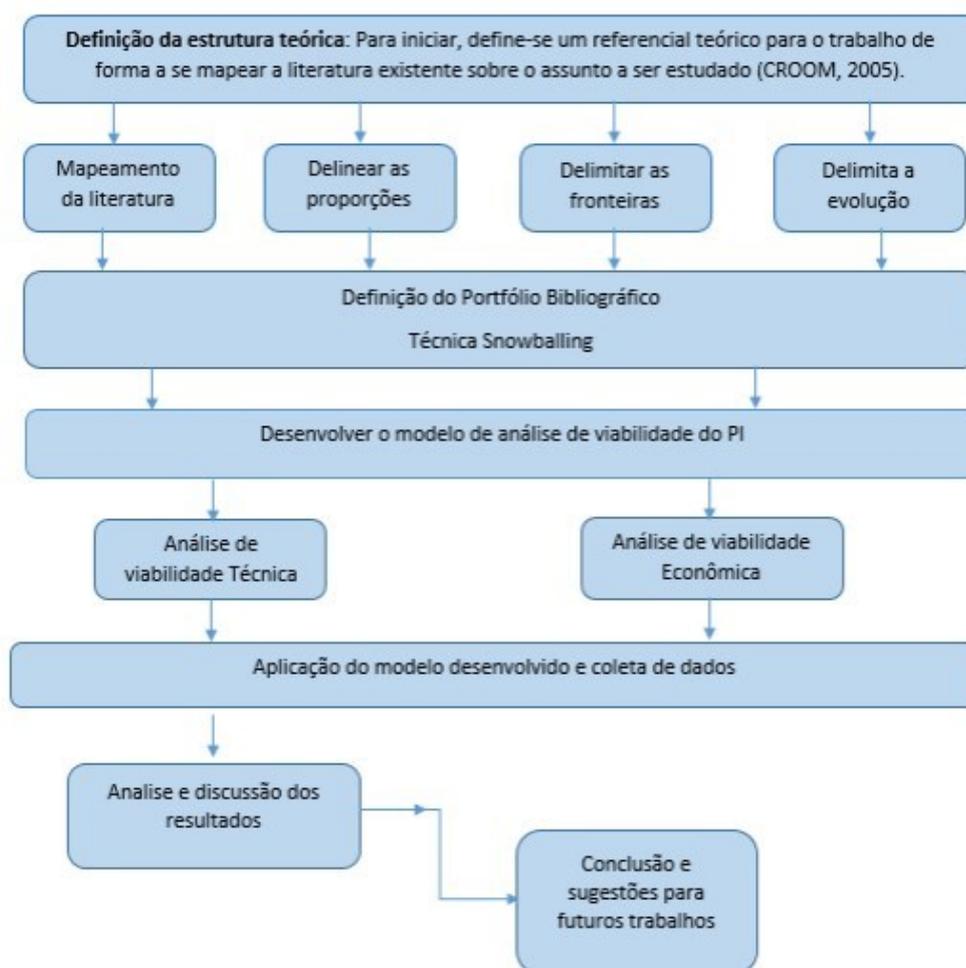
Na etapa inicial, encontra-se a definição da estrutura conceitual teórica, explicitada anteriormente. Na sequência, encontra-se a metodologia para avaliação técnica da implantação do sistema para geração de energia elétrica. E por fim, a avaliação de viabilidade econômica do projeto.

Para tratar das convergências entre ambos os paradigmas e, para a presente pesquisa, as atenções são voltadas ao foco em maximizar a geração do biogás. Bem

como as técnicas, ferramentas e práticas utilizadas para atingir foco, de desenvolver uma metodologia que avalie a viabilidade técnica e econômica da instalação do sistema.

A Figura 9 mostra as fases do trabalho em formato de framework, desenvolvido com base na proposta de conteúdo e sequência para a condução de um estudo de caso, sugerido por Miguel Cauchick (2012). Ainda, dentro da proposta do estudo de caso, dada a percepção, via leitura do Portfólio Bibliográfico (PB) selecionado, de que pela sequência com que a metodologia deve ser aplicada, existe uma ampla similaridade com o modo que um estudo de caso deve ser conduzido. A Figura 9, tem o objetivo de sintetizar as próximas etapas do estudo, norteando as próximas etapas.

Figura 9 - *Framework* do trabalho

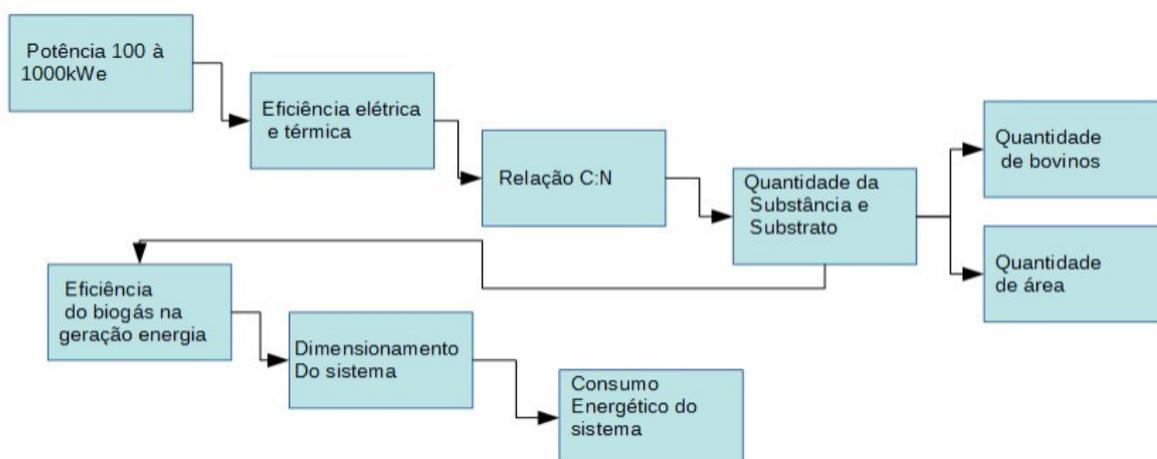


Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.1 Método de avaliação técnica

Na Figura 10, mostra-se o diagrama de fluxo das etapas envolvidas para realizar a avaliação técnica. Na primeira parte são avaliadas as potências, tendo em considerado as outras etapas envolvidas como a eficiência energética do biogás, o tipo e a quantidade de substância usado a eficiência dessa combinação chegando as especificações dimensionamento do sistema e pôr fim a avaliação econômica dos resultados da energia elétrica gerada.

Figura 10 - Fluxo das etapas desenvolvidas para a avaliação técnica



Fonte: Adaptado de PIÑAS, (2016).

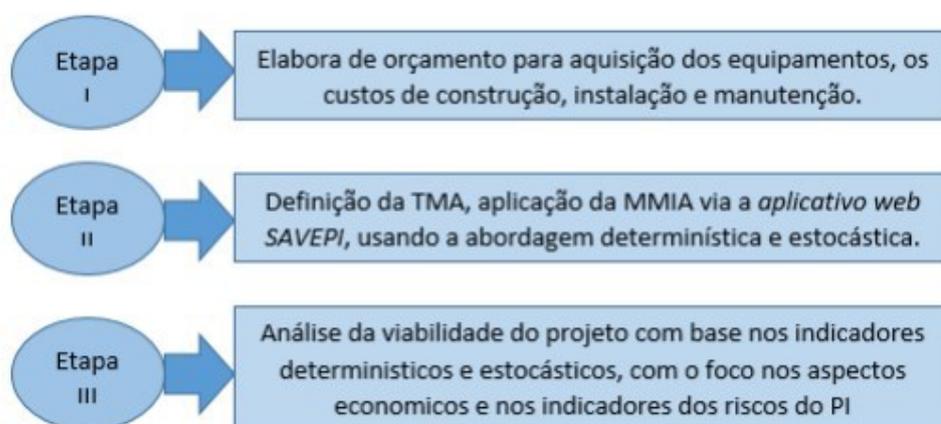
Para realizar a análise de viabilidade técnica do Projeto de Investimento (PI) de geração de energia elétrica via biodigestores, essa análise será dividida em algumas etapas, conforme é apresentado na Figura 9.

Esta etapa se propõe a efetuar uma análise dos sistemas de produção de biogás em propriedades rurais, utilizando resíduos, gerado em suas atividades, adicionando substâncias que permitam o incremento da produção de biogás, com a finalidade de gerar energia elétrica. O modelo de avaliação técnica, no qual se faz uma avaliação das referências principais que podem limitar e definir os sistemas de produção de biogás.

3.2.2 Metodologia de avaliação de viabilidade econômica

Para realizar a análise de viabilidade econômica da geração de energia elétrica via biodigestores, o estudo será dividido em três etapas, conforme é mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Etapas desenvolvidas para a avaliação econômica



Fonte: Elaborada pela autora.

Na etapa I realiza-se um levantamento dos dados do PI, elaborando o orçamento do investimento necessário para aquisição dos equipamentos com os possíveis fornecedores, os custos de construção, instalação, manutenção e treinamentos. Deve-se optar pelo equipamento que melhor atende a necessidade da propriedade e oferece melhor vantagem financeira. De posse das estimativas de custos e receitas, projeta-se o Fluxo de Caixa (FC). O horizonte de planejamento deve estar de acordo com a vida estimada pelo fabricante do equipamento. As alíquotas para calcular os impostos podem ser obtidas junto a normativa elaborada pela Secretaria da Receita Federal. Os recursos financeiros necessários para implementação do PI podem ser na modalidade recursos próprios ou obtidos via financiamento, junto a uma linha de crédito para esse tipo de investimento.

Na segunda etapa, é definido o valor da TMA, podendo ser utilizado o valor da SELIC (SOUZA e CLEMENTE, 2012; SOUZA *et al.*, 2017). A SELIC corresponde à taxa básica de juros da economia brasileira, utilizada no mercado interbancário para financiamento de operações com duração diária. Essa análise também utiliza os

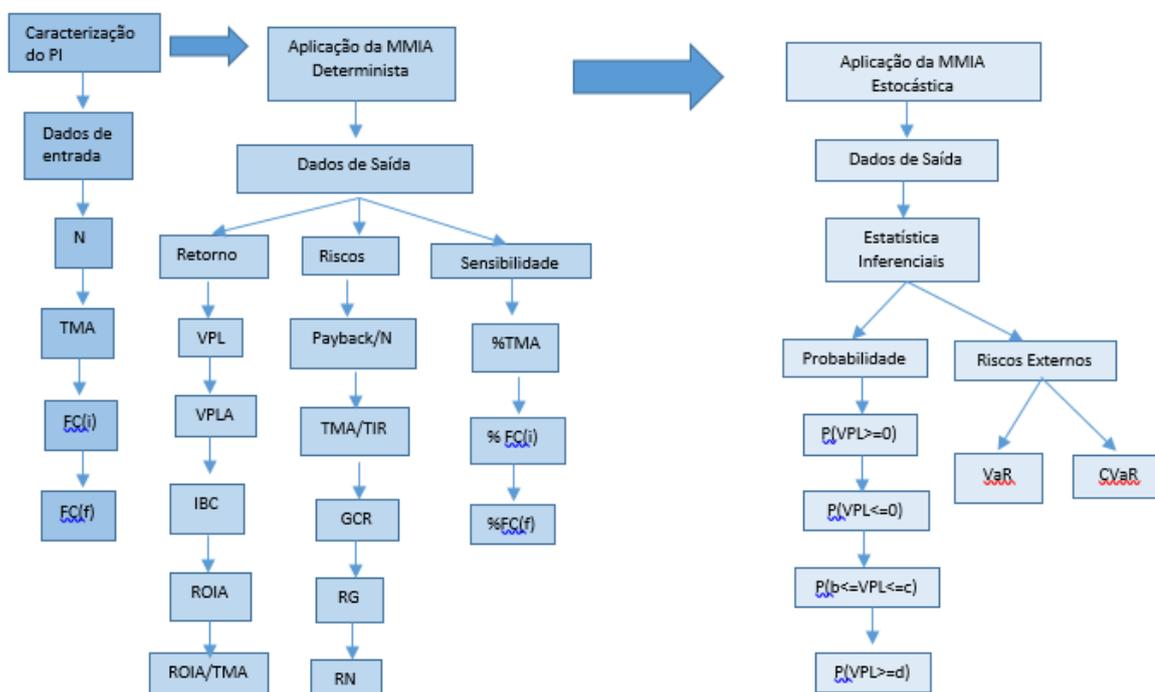
créditos da Redução Certificada de Emissões (RCE) por evitar liberar o metano que se geraria pela fermentação entérica dos dejetos bovinos e pelo tratamento dos mesmos, sendo que o metano tem o potencial de aquecimento global de 25 vezes maior que o dióxido de carbono, segundo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), (2012). Também pode ser obtido RCE pela geração de energia renovável, a qual contribui à matriz energética brasileira. Para a análise das receitas obtida pela utilização de RCE. A intensidade de carbono na geração de energia elétrica brasileira considerado foi de 0,137 ton CO₂ por cada MWh gerado. Os cálculos para análise de viabilidade econômica do PI, realiza-se seguindo a Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA), por meio do aplicativo web \$AVEPI® (Sistema de Análise da Viabilidade Econômica de Projetos de Investimento; LIMA *et al.*, 2017b), utilizando as abordagens determinística e/ou estocástica via SMC, comparando o investimento com Recursos Próprios ou Financiamento.

Para aplicar a SMC serão utilizadas 100.000 simulações, considerando variações no investimento inicial, no Fluxo de Caixa (FC) e na estimativa de custos com energia elétrica da propriedade rural. Com isso, verifica-se a distribuição de probabilidades do VPL e a possibilidade de o retorno ser menor que zero, e o cálculo das medidas de riscos extremos: Value at Risk – VaR (MORGAN, 1989) e Conditional Value at Risk – CVaR (WEISE, 2011; SILVA *et al.*, 2019).

Na última etapa, de posse dos dados será analisado de forma crítica a viabilidade do projeto com base nos indicadores determinísticos e os dados estocásticos, com foco nos aspectos econômicos e nos indicadores de riscos encontrados.

A Figura 12 mostra o diagrama de fluxograma com o detalhamento das etapas envolvidas para realizar a avaliação econômica. É detalhado quais os dados necessários de entrada (*input*) e os resultados obtidos com a aplicação da MMIA determinística (LIMA *et al.*, 2015) e estocástica via SMC (LIMA *et al.*, 2017a).

Figura 12 - Etapas desenvolvidas para a avaliação econômica



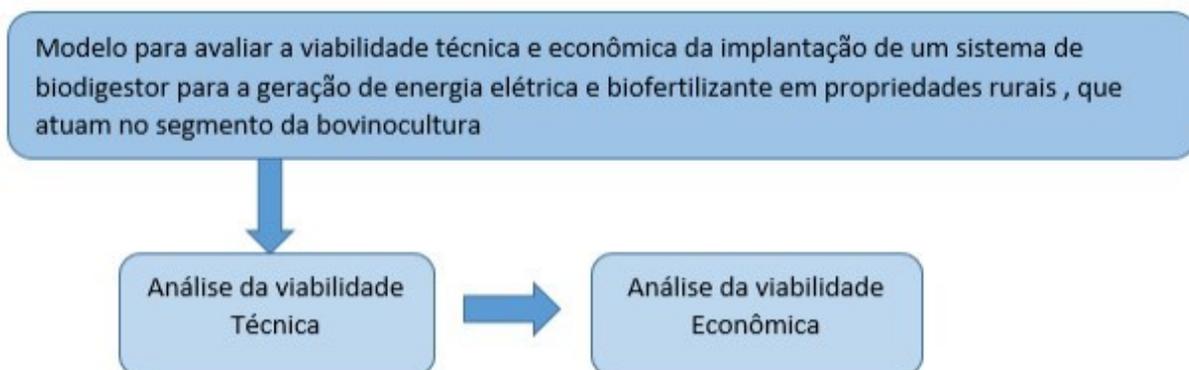
Fonte: elaborada pela autora.

De acordo com a figura 12, como pode-se observar a etapa inicial, a caracterização do PI define o horizonte de planejamento, a vida útil do sistema, a TMA que é um histórico dos últimos dez anos da Taxa Selic e fluxo de caixa. Com a aplicação da MMIA, pelo aplicativo web SAVEPI, na parte determinística temos os dados de saída que é importante na análise da viabilidade econômica do empreendimento, como por exemplo os indicadores de retorno, de riscos e a sensibilidade. E por fim na análise estocástica temos a estatística inferenciais.

3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

A proposta desse trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia que possa avaliar o PI sob os aspectos técnico e econômico. A Figura 13 apresenta a metodologia proposta.

Figura 13 - Metodologia de análise de viabilidade técnica e econômica



Fonte: Elaborada pela autora.

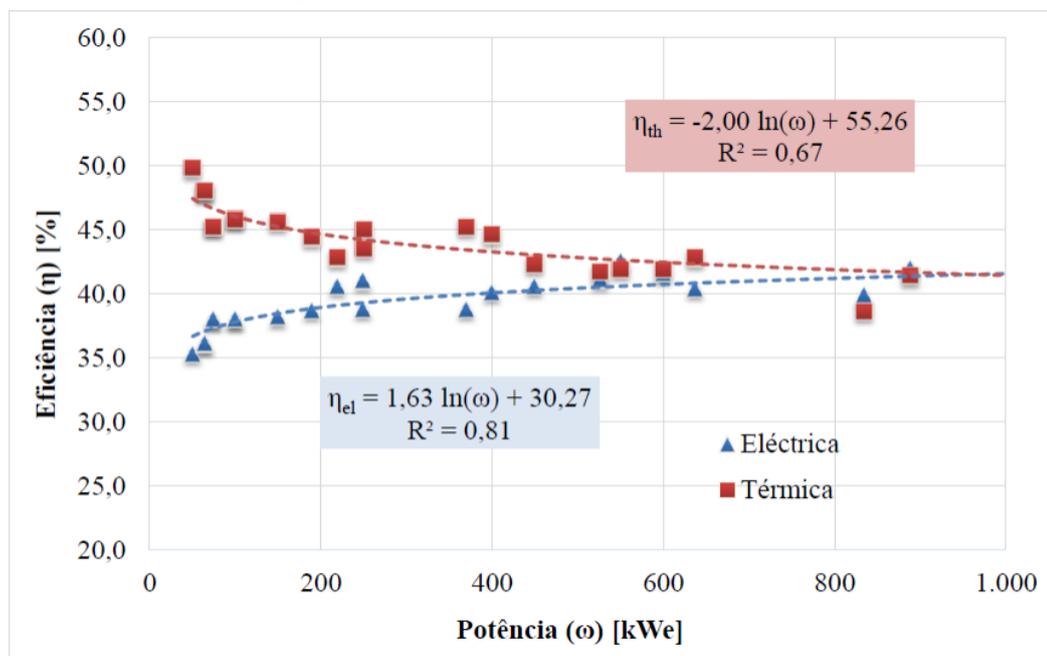
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação do método descrito na seção de metodologia, discutindo as variações de cenários avaliados para produção de energia elétrica usando o biogás como combustível, que gerado a partir de dejetos da bovinocultura. Apresentando os resultados das avaliações dos aspectos técnicos e econômicos para a produção de biogás utilizando o substrato forragem de milho e de capim, avaliando as variações dos resultados apenas variando o tipo de substrato do sistema. Mostrando a influência da utilidade do substrato na viabilidade dos diferentes tamanhos do PIs.

4.1 ANÁLISE DOS ASPECTOS TÉCNICOS

De acordo com o Figura 13, o fluxograma da análise dos resultados se inicia avaliando as eficiências elétricas e térmicas para os sistemas diferentes, com capacidade de potência diferente, a partir de um ajuste dos dados fornecidos pelos fabricantes de moto geradores Otto a gás (CHP) para diferentes potências, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Regressão matemática das eficiências elétrica e térmicas



Fonte: PIÑAS, (2016).

Para a análise dos sistemas, as eficiências elétricas encontram-se nos intervalos de 37,79% a 41,56%, para as potências de 100 kWe e 1.000 kWe, e com suas eficiências térmicas de 46,04 kW a 41,42 kW. Segundo Lantz *et al.* (2012) apud Piñas, (2016) estas eficiências elétricas em sistemas combinados de calor com eletricidade para o sistema de geração de energia através do biogás podem estar na faixa entre 30% a 40%, com suas respectivas taxas de recuperação de calor entre os intervalos 35% a 55%. Além disso, os geradores normalmente trabalham nos intervalos de 100 kWe até 1.000 kWe e podem alimentar-se com biogás de teores de metano a partir de 40% RUTZ *et al.*, 2015) apud PIÑAS, (2016).

Um dos fatores importantes e necessário para que a degradação dos substâncias seja eficiente, é a relação de carbono e nitrogênio da combinação (C:N), sendo que esta deve estar no intervalo de 20:1 a 30:1 para que a produção de biogás tenha boa qualidade e quantidade (WANG, 2014 apud PIÑAS, 2016) e (ZANETTI *et al.* 2014 apud PIÑAS, 2016) , avaliaram a influência da relação C:N, em amostras de biomassa, e, concluíram que as relações de C:N de 30:1 tem maior influência na geração de biogás.

De acordo com pesquisas feitas por Hills (1979) apud PIÑAS (2016) uma boa relação de C:N é de 25:1 para amostras de dejetos bovino. Resultados parecidos foram obtidos por Wang *et al.* (2014) apud Piñas, (2016) os quais avaliaram o efeito da eficiência de biogás para degradação de dejetos suínos e palha de trigo para diferentes relações C:N, tendo determinado que a melhor eficiência ocorre para relações C:N de 27,2:1, para relações de combinação de 40,3:59,7 de dejetos suíno e palha de trigo.

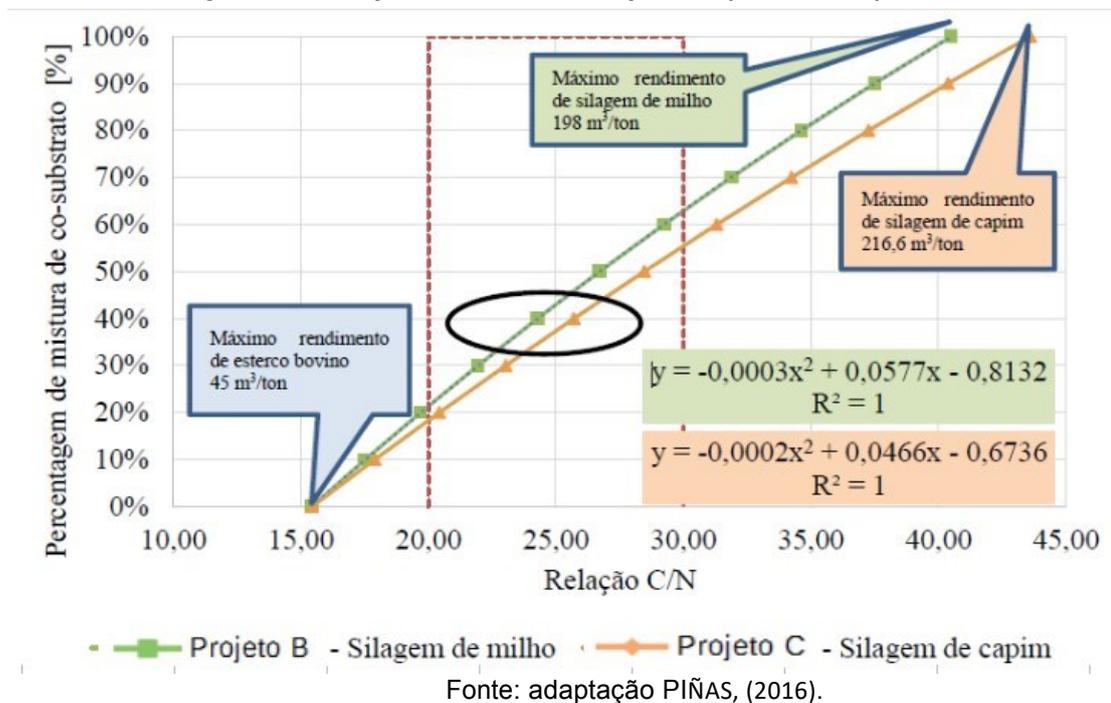
As avaliações feitas por diferentes pesquisadores demonstram que a relação ótima de C:N pode mudar dependendo da temperatura, sendo que os modelos desenvolvidos para combinações de dejetos suínos e palha de arroz tem resultados de relações ótimas de C:N de 26,76:1 para temperaturas de 35 °C e 30,67:1 para temperaturas de 55 °C (WANG, 2014 apud PIÑAS, 2016).

No Brasil, ainda não existe registro de uma base de dados disponível sobre a eficiência das substâncias para a produção de biogás, ou os dados existentes de eficiência específicos são poucos disponíveis, podendo ser estes dados diferentes devido às características dos resíduos e do processo produtivo (STEINMETZ, 2014 apud PIÑAS, 2016).

Nesse caso, em condições ideais de carbono nitrogênio.

A relação C:N considerada para a degradação de dejetos bovino e forragens de milho e capim foram determinadas sobre a base do conteúdo de nitrogênio e carbono. A Figura 15 mostra a avaliação realizada, a quantidade máxima admissível para a degradação, Projeto B está nos intervalos de 22 a 65%; já para o Projeto C, está nos intervalos de 18 a 54%.

Figura 15 - Relação C:N das combinações Projeto B e Projeto C



Neste caso, considera-se para as avaliações dos sistemas, valores de combinação dejetos bovino e substrato de 60:40, pois estes valores encontram-se próximas ao intervalo médio ideal das relações C:N de 25:1.

4.1.1 Quantidade de substâncias e substrato

Para definir quantidade de substrato a substância que vai ser utilizado para as potências elétricas avaliadas, foi considerado a potência de geração elétrica e a utilidade da quantidade de substrato definida em 40% de combinação para

degradação que possui digestão. A eficiência de biogás para as combinações de Projeto B e Projeto C foram de 106,21 m³/ton e 113,64 m³/ton, respectivamente PIÑAS, (2016).

A Tabela 7 apresenta as quantidades das substâncias e substrato necessários para a geração das potências estabelecidas dos sistemas de mono degradação e digestão. As quantidades de dejetos de bovino para cada potência avaliada nos sistemas de mono degradação são maiores do que as quantidades de combinação, tanto no sistema Projeto B como de Projeto C. Isso ocorre porque a eficiência de biogás por tonelada de dejetos bovino é inferior à eficiência das forragens de milho e de capim, tendo valores de eficiência de 45 m³/ton para dejetos bovino, 198 m³/ton para forragem de milho e 216,6 m³/ton para forragem de capim.

Tabela 7: Quantidades de dejetos bovino, forragem de milho e forragem de capim utilizados para geração das respectivas potências elétricas

Potência elétrica [kWe]	Digestão						
	Projeto A (ton/ano)		Projeto B (ton/ano)		Projeto C (ton/ano)		
	Total	Dejetos Bovino	Forragem de milho	Total	Dejetos Bovino	Forragem de capim	Total
100	7.812	1.987	1.325	3.311	1.857	1.238	3.095
200	15.169	3.858	2.572	6.430	3.606	2.404	6.010
300	22.372	5.690	3.793	9.484	5.318	3.546	8.864
400	29.480	7.498	4.999	12.496	7.008	4.672	11.680
500	36.517	9.288	6.192	15.480	8.681	5.787	14.468
600	43.500	11.064	7.376	18.439	10.341	6.894	17.235
700	50.438	12.828	8.552	21.380	11.990	7.994	19.984
800	57.338	14.583	9.722	24.305	13.631	9.087	22.718
900	64.205	16.330	10.887	27.216	15.263	10.175	25.439
1.000	71.043	18.069	12.046	30.115	16.889	11.259	28.148

Fonte: PIÑAS, (2016).

A quantidade de forragem de capim utilizada no sistema em cada potência é menor se comparada com a forragem de milho, pois, a sua eficiência de biogás é maior. Um fator que determina que as forragens, de milho ou de capim elefante, têm eficiência de biogás superior ao dejetos bovino, é porque esse dejetos é um resíduo da alimentação de animal, o qual, já assimilou uma fração da energia total do alimento (QUIAO, 2011) apud (PIÑAS, 2016).

As forragens de milho e de capim elefante são utilizados na bovinocultura também como alimentação dos animais, que, ao serem digeridas por estes, aproveitam uma fração da energia transformada em biogás, enquanto as

A Tabela 8 apresenta o número de cabeças de gado e áreas de milho e capim elefantes necessários para a geração das potências elétricas. Para o Projeto A com potências de 100 kWe e 1.000 kWe são necessárias 1.033 e 9.397 cabeças de bovino. Já para degradação Projeto B com potências de 100 kWe e 1.000 kWe são necessárias 263 e 2.390 cabeças de bovino respectivamente, além de áreas de 33,11 ha e 301,15 ha dedicadas para as plantações de milho. Também para a degradação Projeto C com potências de 100 kWe e 1.000 kWe são necessárias 246 e 2.234 cabeças de bovino, respectivamente, além de áreas 32,86 e 298,88 hectares dedicadas para as plantações de capim elefante.

Deixa claro que esse estudo para grande propriedade, devido ao número elevado de bovinos necessário.

Tabela 8: Quantidades de cabeças de gado, área de milho e área capim necessários para geração das respectivas potências elétrica.

Potência elétrica [kWe]	Digestão				
	Projeto A	Projeto B		Projeto C	
	Total [Nº]	Dejetos Bovino [Nº]	Fragem de milho [ha]	Dejetos Bovino [Nº]	Fragem de milho [ha]
100	1.033	263	33,11	246	32,86
200	2.006	510	64,30	477	63,82
300	2.959	753	94,84	704	94,12
400	3.899	992	124,96	927	124,02
500	4.830	1.229	154,80	1.148	153,63
600	5.754	1.463	184,40	1.368	183,00
700	6.672	1.697	213,80	1.586	212,20
800	7.584	1.929	243,10	1.803	241,20
900	8.493	2.160	272,20	2.019	270,10
1.000	9.397	2.390	301,15	2.234	298,90

Fonte: PIÑAS, (2016).

A menor quantidade de área é para a degradação Projeto C, devido principalmente as características da forragem de capim, a qual tem a eficiência de biogás superior à da forragem de milho. As quantidades de cabeça de bovinos menores, somente estão relacionadas ao tipo de dejetos e biogás de cada cabeça de bovinos, com valores de produção de dejetos bovino de 21 kg por unidade ao dia e produção de biogás de 45 m³/ton de dejetos.

Para fazer o cálculo da produção de biogás para as diferentes potências, tendo em consideração a variação das eficiências elétricas apresentadas na Tabela 9 para a produção de biogás nos tamanhos de 100-1.000 kW foi considerado que a eficiência elétrica se incrementa à medida que a potência elétrica aumenta. As eficiências de conversão elétrica dos cenários a avaliar variam de 37,79% a 41,56% para potências de 100 kWe a 1.000 kWe, respectivamente. As eficiências térmicas determinadas variam de 46,04% a 41,42% para potências de 100 a 1.000 kWe, respectivamente.

Tabela 9: Produção de biogás e metano das diferentes potências avaliadas

Potência elétrica [kWe]	Eficiência elétrica [%]	Energia elétrica gerada [MWh/a]	Eficiência térmica [%]	Energia térmica gerada [MWh/a]	Quantidade de biogás [m ³ /a]	Quantidade de metano [m ³ /a]
100	37,8	800	46	975	351,7	228,6
200	38,9	1.600	44,6	1.835	682,9	443,9
300	39,5	2.400	43,8	2.658	1.007,3	654,7
400	40,1	3.200	43,3	3.456	1.327,3	862,7
500	40,4	4.000	42,8	4.236	1.644,1	1.068,7
600	40,7	4.800	42,4	5.004	1.958,4	1.273,1
700	41	5.600	42,1	5.759	2.270,9	1.476,1
800	41,2	6.400	41,9	6.506	2.581,6	1.678,0
900	41,4	7.200	41,6	7.244	2.890,7	1.878,9
1.000	41,6	8.000	41,4	7.975	3.198,6	2.019,1

Fonte: PIÑAS, (2016).

Na Tabela 9 está apresentado a vazão de biogás calculada para os diferentes valores de potência, tendo em consideração a eficiência de conversão elétrica e o poder calorífico do biogás, obtendo-se valores de produção de biogás, por ano, de 351.719 m³ para 100 kWe e 3.198.647 m³ para 1.000 kWe. As quantidades de metano necessária para as potências dos sistemas de 100 a 1.000 kWe, foram de 228.617 m³ e 2.079.121 m³, respectivamente.

4.1.2 Dimensionamento do sistema

Na primeira etapa, foi definido o tamanho do biodigestor, o qual depende basicamente do tipo de substância, da quantidade de produção de biogás por unidade de massa e do tempo de retenção hidráulico, tendo ainda que se ajustar a percentual de sólidos totais em 12% para conseguir o tipo de degradação úmida.

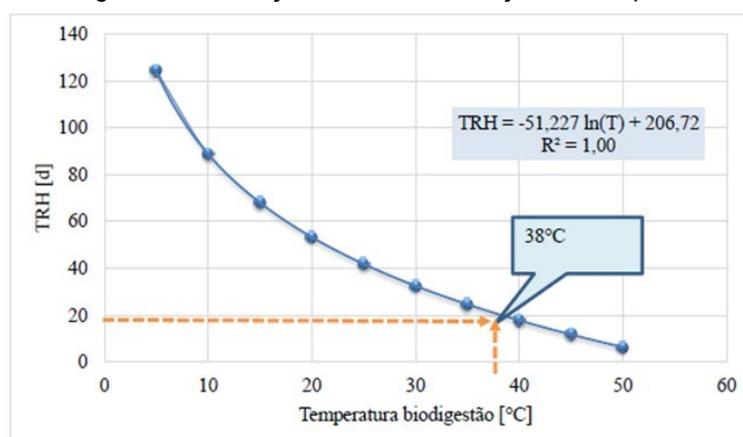
Pesquisas feitas por Orrico *et al.* (2009) apud Piñas, (2016) e Ryckebosch *et al.* (2011) apud PIÑAS (2016), concluíram que a degradação de madeira e resíduos vegetais é mais rápida em condições termofílicas de 55 °C que em condições mesofílicas de 35 °C, tendo obtido valores de TRH de 11 e 27 dias, respectivamente. No entanto, a maioria dos sistemas de biogás de escala agrícola operam em condições mesofílicas por seus mais baixos custos de instalação e operação (COLDEBELLA, 2006 apud PIÑAS, 2016).

Além disso, a maioria das archaeas metanogênicas são mesofílicas operando entre intervalos de temperaturas de 32 a 42 °C, enquanto só alguns archaeas são termofílicas, operando em temperaturas de 48 a 55 °C, de forma que as archaeas termofílicas são mais sensíveis às variações de temperatura.

O aquecimento do biodigestor é necessário já que as archaeas metanogênicas são sensíveis as alterações de temperaturas de ± 2 °C, podendo ocorrer até 30% de perdas da produção de biogás (DEUBLEIN, 2008 apud PIÑAS 2016),. Segundo Chae *et al.* (2008) apud Piñas (2016), os quais avaliaram os efeitos da eficiência de biogás na degradação a temperaturas mesofílicas, observaram que, para mudanças bruscas de temperaturas de 35 a 30 °C e temperaturas 30 a 32 °C, ocorreu uma diminuição na taxa de produção de biogás.

Para a presente avaliação foi considerada uma temperatura mesofílica de 38 °C, a qual é mantida constante utilizando o calor residual do sistema CHP. Na Figura 16 é possível verificar como o tempo de retenção hidráulica varia em função da temperatura. Assim, para as condições de operação deste trabalho, em temperaturas mesofílicas de 38°C, o tempo de retenção hidráulica calculado foi de 20,38 dias.

Figura 16 - Variação do TRH em função da temperatura



Fonte: PIÑAS, (2016).

A Tabela 10 apresenta o detalhamento do dimensionamento dos principais componentes do biodigestor. Os volumes do biodigestor foram determinados, considerando a temperatura de aquecimento do biodigestor de 38 °C e o fator de projeto, sendo que os volumes do biodigestor para a Projeto A são 2,3 vezes maiores que os volumes dos biodigestores para a degradação de Projeto B e 2,32 vezes maiores que os volumes dos biodigestores para a degradação de Projeto C.

Tabela 10: Dimensões dos principais componentes do sistema

Sistema	Componentes	Potência elétrica [kWe]									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Projeto A	Tanque de Preparação	454	882	1.302	1.715	2.124	2.530	2.933	3.355	3.734	4.132
	Silo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Biodigestor	926	1.798	2.651	3.494	4.328	5.155	5.978	6.795	7.609	8.420
	Gasômetro	926	1.798	2.651	3.494	4.328	5.155	5.978	6.795	7.609	8.420
	Tanque de Digestato	239	463	684	901	1.116	1.329	1.541	1.752	1.962	2.171
	Tanque de Preparação	198	384	567	747	925	1.102	1.278	1.453	1.627	1.800
	Silo	315	612	903	1.190	1.474	1.756	2.036	2.315	2.592	2.868
Projeto B	Biodigestor	497	965	1.424	1.876	2.324	2.768	3.210	3.649	4.086	4.521
	Gasômetro	497	965	1.424	1.876	2.324	2.768	3.210	3.649	4.086	4.521
	Tanque de Digestato	101	196	290	382	473	563	653	743	832	920
	Tanque de Preparação	196	381	562	740	917	1.092	1.266	1.440	1.612	1.784
	Silo	295	572	844	1.112	1.378	1.641	1.903	2.164	2.423	2.681
Projeto C	Biodigestor	487	946	1.395	1.839	2.278	2.713	3.146	3.576	4.005	4.431
	Gasômetro	487	946	1.395	1.839	2.278	2.713	3.146	3.576	4.005	4.431
	Tanque de Digestato	95	184	271	357	442	527	611	674	777	860

*Nota: unidades em m³.

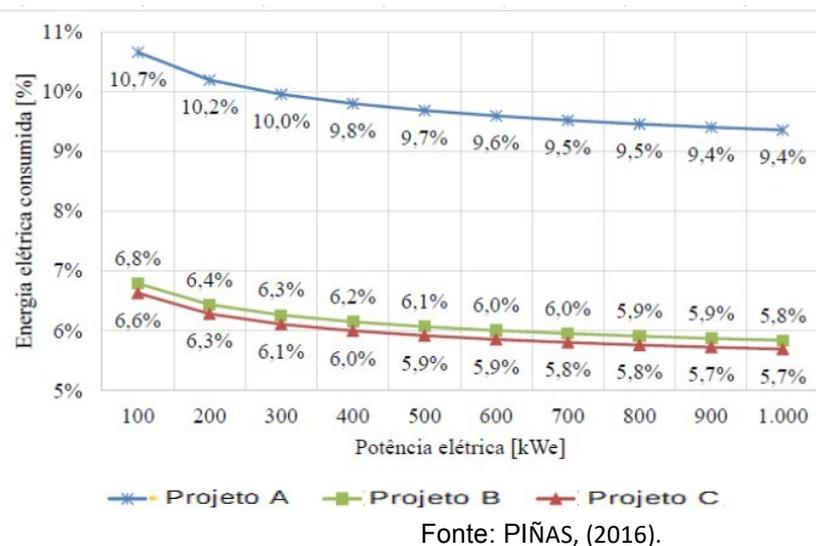
Fonte: adaptação de PIÑAS, (2016).

4.1.3 Consumo energético

O gasto de energia elétrica do sistema de degradação anaeróbio ocorre principalmente devido ao sistema de bombeamento, agitação, sistema de transporte de forragem ao biodigestor (correia transportadora) e dessulfurizador. O gasto energético do calor gerado pelo sistema CHP é principalmente devido ao aquecimento do biodigestor e as perdas de calor. Os gastos de energia elétrica e calor dependem da quantidade de substância ou combinação utilizadas no sistema.

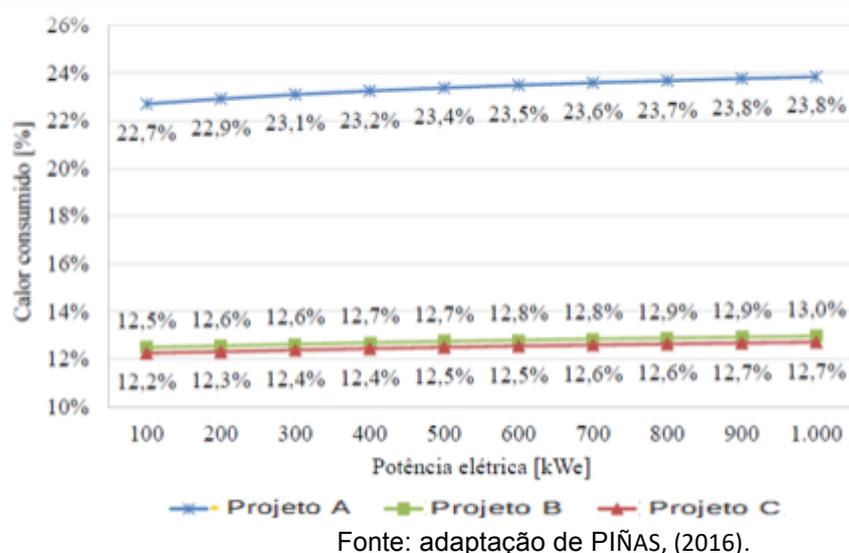
Na Figura 17, apresentam-se os consumos de energia elétrica com relação ao total de energia elétrica produzida, tendo consumos de 10,7% e 9,4% da eletricidade gerada em sistemas Projeto A, para potências de geração elétrica de 100 e 1.000 kWe e 6,8% e 5,8% da eletricidade gerada em sistemas de degradação Projeto B, para potências de geração elétricas de 100 e 1.000 kWe; e 6,6% e 5,7% da eletricidade gerada em sistemas de degradação Projeto C, para potências de geração elétrica de 100 e 1.000 kWe, respectivamente.

Figura 17 - Consumo de energia elétrica com referência do total de energia elétrica produzida pelo sistema



Na Figura 18, encontram-se os consumos de calor com relação ao total de calor produzido, tendo consumos de 22,7% e 23,8% do calor produzido no sistema Projeto A, para potências de geração elétrica de 100 e 1.000 kWe, 12,5% e 13,0% do calor produzido em sistemas de degradação Projeto B para potências de geração elétricas de 100 e 1.000 kWe, respectivamente; e 12,2% e 12,7% do calor produzido em sistemas de degradação Projeto C, para potências de geração elétrica de 100 e 1.000 kWe, respectivamente.

Figura 18 - Consumo de calor com referência do total de calor produzida pelo sistema CHP



A Tabela 11 mostra os detalhes do consumo energético, do calor e energia, para os diferentes sistemas de mono degradação Projeto A e degradação Projeto B e Projeto C, para as diferentes potências elétricas avaliadas. O maior gasto, tanto elétrico como de calor, ocorre nos sistemas de mono degradação de dejetos-bovino, devido ao fato que estes sistemas precisam de maior energia por sua maior demanda de substância em comparação dos outros sistemas de digestão.

O consumo de eletricidade para estes sistemas seria de 1,59 vezes maior que os sistemas de degradação Projeto B e 1,63 vezes maior que os sistemas de degradação Projeto C. Já o consumo de calor para o Projeto A seria de 1,83 vezes maior que os sistemas de degradação Projeto B e 1,87 vezes maior que os sistemas de degradação Projeto C.

Tabela 11: Consumos de energia dos equipamentos dos sistemas de degradação para as diferentes potências avaliadas

Sistema	Componentes	Potência elétrica [kWe]									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000
Projeto A	Agitação de Biodigestor	80	155	229	302	374	445	516	587	657	727
	Sistema de bombeamento	1	2	2,9	3,8	4,8	5,7	6,6	7,5	8,4	9,3
	Transportadora de silo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dessulfurizador	4,2	5,7	6,9	7,8	8,6	9,3	10	10,6	11,1	11,6
	Total de energia conservada	85	163	239	313	387	460	533	605	677	748
	Aquecimento dos substâncias	198	384	567	747	925	1.102	1.277	1.452	1.626	1.799
	Perdas de Calor	23,4	36,4	47,2	56,7	65,4	73,5	81,2	88,4	95,3	102
	Total de calor conservada	221	421	614	803	990	1.175	1.358	1.540	1.721	1.901
	Eletricidade disponível	715	1.437	2.161	2.887	3.613	4.340	5.067	5.795	6.523	7.252
	Calor disponível	753	1.415	2.044	2.652	3.246	3.828	4.401	4.965	5.522	6.074
Projeto B	Agitação do biodigestor	43	83	123	162	201	239	277	315	353	391
	Sistema de bombeamento	0,5	1	1,5	2	2,4	2,9	3,4	3,8	4,3	4,8
	Transportadora de silo	6,6	12,9	19	25	31	36,9	42,8	48,6	54,4	60,2
	Dessulfurizador	4,2	5,7	6,9	7,8	8,6	9,3	10	10,6	11,1	11,6
	Total de energia conservada	54	103	150	197	243	288	333	378	423	467
	Aquecimento dos substâncias	106	206	304	401	497	591	686	780	873	966
	Perdas de Calor	15,5	24,1	31,2	37,5	43,2	48,6	53,6	58,4	63	67,4
	Total de calor conservada	122	230	335	438	540	640	739	838	936	1.033
	Eletricidade disponível	746	1.497	2.250	3.003	3.757	4.512	5.267	6.022	6.777	7.533
	Calor disponível	853	1.605	2.322	3.017	3.697	4.363	5.020	5.668	6.308	6.841
Projeto C	Agitação do biodigestor	42	82	121	159	197	234	272	309	346	383
	Sistema de bombeamento	0,5	1	1,5	2	2,5	2,9	3,4	3,8	4,3	4,8
	Transportadora de silo	6,2	12	17,7	23,4	28,9	34,5	40	45,4	50,9	56,3
	Dessulfurizador	4,2	5,7	6,9	7,8	8,6	9,3	10	10,6	11,1	11,6
	Total de energia conservada	53	101	147	192	237	281	325	369	412	456
	Aquecimento das substâncias	104	202	298	393	487	580	672	764	856	947
	Perdas de Calor	15,3	23,7	30,8	37	42,7	47,9	52,9	57,6	62,1	66,5
	Total de calor cons.	119	226	239	430	529	628	725	822	918	1.003
	Eletricidade disponível	747	1.499	2.253	3.008	3.763	4.519	5.275	6.031	6.788	7.544
	Calor disponível	855	1.609	2.329	3.026	3.707	4.376	5.034	5.684	6.326	6.961

*Nota: as demais unidades são MWh/a.

Fonte: PIÑAS, (2016).

Com os resultados da análise de viabilidade técnica foi possível realizar a análise de viabilidade econômica dos sistemas, para saber qual sistema apresenta maior competitividade. Esses resultados são apresentados na próxima subseção.

4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DOS SISTEMAS

A análise realizada para os aspectos econômicos levou em consideração o dimensionamento dos equipamentos realizado na análise dos aspectos técnicos. Dessa forma, foram determinados os custos com equipamentos para a instalação, treinamento e manutenção de cada sistema.

Os custos necessários para o investimento inicial (FC0) relacionado à aquisição dos equipamentos, para os diferentes sistemas avaliados estão apresentados na Tabela 12. Destaca-se que os sistemas de degradação Projeto C têm os menores custos de investimento, devido às maiores eficiências de biogás e biofertilizantes por tonelada de forragem de capim, o qual leva a ter um biodigestor de menor volume, reduzindo o investimento inicial.

Tabela 12: Custos total de investimentos iniciais dos diferentes sistemas

Potência elétrica [kWe]	Mono-digestão esterco Bovino [R\$]	Co-digestão esterco Bovino-milho [R\$]	Co-digestão esterco Bovino-capim [R\$]	Moto gerador CHP otto gás [R\$]
100	110.033,50	98.338,00	89.771,00	22.379,00
200	124.163,00	101.927,00	101.045,00	35.524,00
300	156.789,00	127.978,00	126.836,00	46.550,00
400	185.629,00	151.000,00	149.627,00	56.391,00
500	211.952,00	172.011,00	151.000,00	65.435,00
600	236.434,00	191.551,00	172.011,00	73.893,00
700	259.487,00	209.951,00	191.551,00	81.891,00
800	281.385,00	227.428,00	209.952,00	89.516,00
900	302.326,00	244.139,00	227.428,00	96.828,00
1000	322.442,00	260.197,00	244.139,00	103.874,00

Fonte: Adaptação de PIÑAS, (2016).

O investimento inicial (FC0) representa os custos referentes a aquisição de biodigestor, moto gerador, tanque de preparação de dejetos bovino, sistema de bombeamento, gasômetro (armazenamento de biogás), mão de obra para instalação, materiais de alvenaria, dessulfurizados (limpeza de biogás), tanque de armazenamento de digestato, o orçamento dessa instalação encontra-se em anexo. Na sequência discute-se o custo de aquisição do motor necessário para cada potência analisada PIÑAS, (2016).

Os investimentos iniciais para a potência de geração elétrica de 100 kWe são de R\$ 110.033,50 para sistemas de mono degradação Projeto A, R\$ 98.338,00 para sistemas de degradação Projeto B e R\$ 89.771,00 para sistemas de degradação Projeto C. Para potência de geração elétrica de 1.000 kWe, os investimentos iniciais são de R\$ 322.442,00 para sistemas de mono degradação Projeto A, R\$ 260.179,00 para sistemas de degradação Projeto B e R\$ 244.139,00 para sistemas de degradação Projeto C. O investimento no moto gerador CHP para potência de geração elétrica de 100 kWe é de 224 R\$ /kWe. Para a potência de geração elétrica de 1.000 kWe, o custo do moto gerador é de 104 R\$ /kWe. O custo do moto gerador CHP Otto gás tem relação com os custos-padrão apresentados por Deublein et al. (2016) apud Piñas, (2016) segundo o qual os custos dos sistemas CHP encontram-se nos intervalos de 200 a 1.500 R\$ /kWe.

As receitas que podem ser obtidas nesse tipo de empreendimento são principalmente pela economia de energia elétrica na propriedade e da parte sólida do biofertilizante. Para definir os custos anuais do sistema, foram considerados: custos de depreciação, juros sobre o capital fixo e custos de manutenção e operação. Os custos anuais podem ser considerados como sendo 16,08% do custo total da instalação do sistema (ESPERANCINI *et al.*, 2012). A operação do sistema gerador é diária e exige a presença de funcionário que é responsável pelo acompanhamento e pequenas manutenções que o sistema requer no dia a dia. O valor da mão de obra está incluso nesse percentual.

Para aplicar a Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA), com suporte do aplicativo web \$AVEPI® foram feitas as seguintes definições em termos de nomenclatura: (i) sistema mono-digestão esterco bovino: Projeto A; (ii) sistema co-digestão bovino-milho: Projeto B; (iii) sistema co-digestão esterco bovino-capim: Projeto C. Esses nomes foram adotados para aplicar as abordagens determinísticas e estocásticas. Os custos totais estimados, as receitas esperadas e o Fluxo de Caixa (FC) projetados estão apresentados na Tabela 13.

A análise determinística via Valor Presente Líquido (VPL), a qual foi necessária para a formação do ranking será apresentada na subseção 4.2.1. Por outro lado, o detalhamento da análise determinística via MMIA, necessária para aprofundar a análise dos PIs que apresentaram VPLs positivos ($VPLs > 0$) é destacada na subseção 4.2.2. Por fim, a análise estocástica via SMC para os PIs que apresentam

alta sensibilidade ($\Delta\% < 33,33\%$) é apresentada na subseção 4.2.3. Tabela 13: Investimentos iniciais, receitas estimadas e fluxos de caixas dos sistemas em avaliação.

Tabela 13: Investimentos iniciais, receitas estimadas e fluxos de caixas dos sistemas em avaliação

Potência elétrica [kWe]	Investimento inicial [R\$]			Receita [R\$]			Fluxo de Caixa [R\$]		
	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C
100	107.003,00	92717,00	92.150,00	15.155,06	15.151,61	15.151,48	-2.051,02	242,72	333,76
200	159.687,00	137451,00	136.569,00	30.297,02	30.291,65	30.291,44	4.619,35	8.189,53	8.331,15
300	203.339,00	174528,00	173.386,00	45.436,80	45.429,85	45.429,57	12.739,88	17.365,74	17.549,10
400	242.020,00	207391,00	206.018,00	60.575,38	60.567,02	60.566,69	21.658,56	27.218,55	27.439,00
500	277.387,00	237446,00	216.435,00	75.713,16	75.703,52	75.698,45	31.109,33	37.522,21	40.895,71
600	310.327,00	265444,00	245.904,00	90.850,35	90.839,53	90.834,81	40.949,77	48.156,13	51.293,45
700	341.378,00	291842,00	273.442,00	105.987,09	105.975,14	105.970,70	51.093,51	59.046,95	62.001,23
800	370.901,00	316944,00	299.468,00	121.123,46	121.110,45	121.106,23	61.482,58	70.145,85	72.951,78
900	399.154,00	340967,00	324.256,00	136.259,53	136.245,49	136.241,46	72.075,56	81.418,00	84.101,10
1.000	426.316,00	364071,00	348.013,00	151.395,33	151.380,31	151.376,44	82.843,71	92.837,70	95.415,95

Fonte: adaptação de PIÑAS, (2016)

4.2.1 Análise determinística via VPL

A MMIA foi aplicada para as potências de 100 a 1.000 kWe, para os três sistemas: mono degradação dejetos bovino (Projeto A), degradação dejetos Projeto B e degradação dejetos Projeto C. Ao todo foram avaliados 30 Projetos de Investimento (PIs): 3 sistemas com 10 potências cada um. Para cada PI foram avaliadas as 3 dimensões da MMIA e seus respectivos indicadores: retorno (VPL, VPLA, IBC, ROIA e índice ROIA/TMA), riscos (índices *Payback/N* e TMA/TIR) e sensibilidades ($\Delta\%$ TMA, $\Delta\%$ FC0 e $\Delta\%$ FCj).

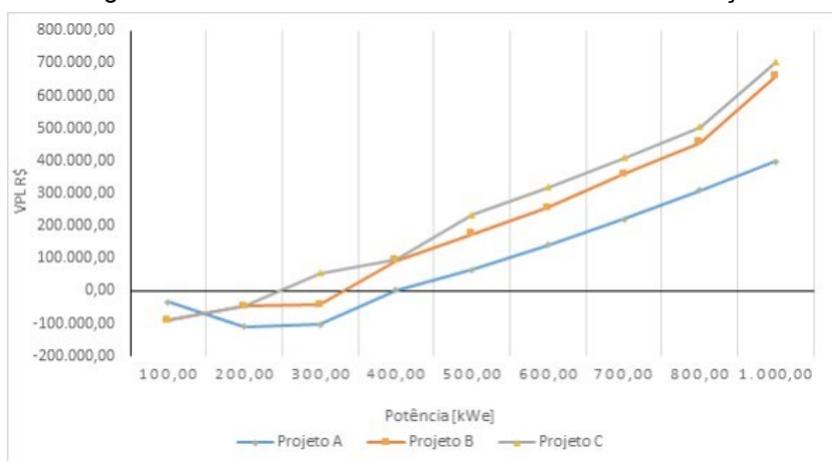
O aplicativo web \$AVEPI® foi alimentado com as informações dos PIs, a saber: (i) Taxa Mínima de Atratividade (TMA) igual a 8,5% ao ano, obtida com base na Taxa Selic de 2019; (ii) horizonte de planejamento (N) igual a 20 anos, baseado na vida útil dos sistemas; (iii) investimentos iniciais (FC0), os quais já foram detalhados na Tabela 13; (iv) Fluxos de Caixa (FCs), também já detalhados na Tabela 13; e (v) Valor Residual (VR), o qual foi considerado nulo. A Apêndice A apresenta a tela de entrada dos dados (input) na ferramenta computacional \$AVEPI®.

Com base nesses dados fornecidos, o aplicativo realizou uma comparação entre os projetos em estudo. A geração desses indicadores auxiliou na análise de viabilidade econômica desses 30 PIs, permitindo a formação de um ranking das

opções avaliadas. Nessa análise preliminar, não foram considerados os efeitos da depreciação, dos tributos e da fonte de financiamento, pois os valores são iguais para todos os PIs.

A partir dos resultados gerados, foram construídas as Figuras 19 e 20. A Figura 21 apresenta os valores dos VPLs para os sistemas de mono degradação dejetos bovinos (Projeto A), degradação Projeto B (Projeto B) e degradação Projeto C (Projeto C). Da análise desse gráfico e da interpolação linear, depreende-se que o sistema mono degradação dejetos bovinos (Projeto A), apresentam viabilidade econômica com a potência superior a **450 kWe**. Já os sistemas de degradação Projeto B (Projeto B) são economicamente viáveis para potências superiores a **365 kWe**. Por outro lado, os sistemas de degradação Projeto C (Projeto C) apresentam viabilidade econômica para potência superior a **290 kWe**. De acordo com a análise desses resultados, a produção de energia elétrica nos três sistemas apresenta vantagens econômica na medida que o tamanho do sistema se incrementa, pela economia de escala.

Figura 19 - Análise econômica dos sistemas em avaliação



Fonte: Elaborada pela autora com base nos resultados do \$AVEPI® (2020).

A Figura 20 apresenta o VPL esperado para cada PI, indicando a sua viabilidade econômica (azul) ou a sua inviabilidade (vermelho). Da análise conjunta dos 3 sistemas avaliados, observa-se que o VPL esperado por variar de um prejuízo de cerca de R\$ 130.000,00 até um lucro de aproximadamente R\$ 700.000,00. Esses resultados mostram a importância de uma análise dos aspectos técnicos bem-feita, pois a simples escolha de um sistema pode gerar insucesso no empreendimento.

Pela análise do indicador VPL, apenas 6 dos 30 PIs avaliados não apresentam viabilidade econômica (VPL > 0). Para os PIs que apresentam VPLs esperados positivos, aplicou-se a MMIA determinística e, na sequência a abordagem estocástica via SMC, se necessária, ambas com suporte da ferramenta computacional \$AVEPI®.

Figura 20 - Ranking dos projetos avaliados pelo critério VPL



Fonte: Elaborada pela autora com base nos resultados do \$AVEPI® (2020).

Na próxima subseção serão analisados os indicadores das três dimensões da MMIA (retorno, riscos e sensibilidades) para cada sistema avaliado, na menor potência a qual apresenta viabilidade econômica. Dessa forma, serão apresentados no corpo do texto a análise de apenas 3 PIs, um para cada sistema. Essa estratégia foi adotada para economizar espaço, pois a análise dos demais PIs é análoga aos casos apresentados.

4.2.2 Análise determinística via MMIA

Para o sistema de mono degradação Projeto A, na potência de 500 kWe, obtém-se um VPL igual a R\$ 65.491,38 em 20 anos, equivalente a cerca de R\$ 5.944,69 por ano (VPLA). A cada unidade monetária investida nesse PI, há a expectativa de retorno de 1,3357 (IBC). Isso é equivalente a um ganho de 1,06% ao ano, além da TMA anual de 8,5%. Esse PI apresenta um índice ROIA/TMA igual a

16,37%, sendo enquadrado na categoria de baixo retorno (Lima *et al.*, 2015). Quanto aos indicadores de riscos, o índice *Payback/N* é de 70%, ou seja, o PI tem que ser promissor em pelo menos 14 anos para se pagar. Por outro lado, o índice TMA/TIR resultou em 69,65%, representando a razão entre o percentual oferecido pelo mercado e a eficiência máximo esperado pelo PI. Esses resultados indicam que o PI em estudo apresenta um nível de risco elevado (Lima *et al.*, 2015).

Em relação à Análise de Sensibilidade (AS) desse PI, a TMA admite uma variação máxima de 43,57% antes de torná-lo economicamente inviável, sendo o Valor-Limite (VL) igual a 9,33% (TIR). Por outro lado, o investimento inicial (FC_0) suporta um acréscimo de até 23,57%, sendo o VL igual a R\$ 342.778,38 (VP). Já o FC anual permite uma redução máxima de 19,08%, sendo o VL igual a R\$ 25.174,64. Dessa forma, os índices de AS propostos pela MMIA apontam para uma alta sensibilidade para os Referências FC_0 e FC_j e moderada para a TMA. Esses resultados estão sintetizados na Figura 21, os quais indicam a necessidade de aplicação da SMC (Lima *et al.*, 2017a), a qual será apresentada na subseção 4.2.3.

Figura 21 - Escala para confrontar as dimensões da MMIA no sistema A

Dimensão	Índice	Baixo (< 33,33%)	Médio (de 33,33% a 66,66%)	Alto (> 66,66%)
Retorno	ROIA/TMA	16,37		
Riscos	<i>Payback/N</i>			70,00
	TMA/TIR			69,65
Dimensão	Índice	Alta (< 33,33%)	Média (de 33,33% a 66,66%)	Baixa (> 66,66%)
Sensibilidades	$\Delta\%TMA$		43,57	
	$\Delta\%FC_0$	23,57		
	$\Delta\%FC_j$	19,08		

Fonte: Elaborada pela autora no \$AVEPI® (2020).

Para o sistema degradação Projeto B, na potência de 400 kWe, espera-se um VPL de R\$ 92.616,79 em 20 anos, equivalente a R\$ 8.496,49 por ano (VPLA). Para esse PI, a cada unidade monetária investida, há a expectativa de retorno de 1,4461. Isso é equivalente a um ganho de 1,86% ao período, além da TMA de 8,5%. Esse PI apresenta um índice ROIA/TMA igual a 28,64%, sendo enquadrado na categoria de baixo retorno (Lima *et al.*, 2015). O índice *Payback/N* é de 50%, ou seja, o PI tem que ser promissor em metade do tempo estimado. Por outro lado, o índice TMA/TIR resultou em 55,63%. Esses resultados indicam que o PI em estudo apresenta um nível de risco moderado (Lima *et al.*, 2015). Os índices de AS da MMIA apontam para uma

alta sensibilidade no parâmetro FC_j , moderada para o FC_0 e baixa para a TMA. Esses resultados estão sintetizados na Figura 22, os quais indicam a necessidade de aplicação da SMC (Lima *et al.*, 2017a).

Figura 22 - Escala para confrontar as dimensões da MMIA no sistema B

Dimensão	Índice	Baixo (< 33,33%)	Médio (de 33,33% a 66,66%)	Alto (> 66,66%)
Retorno	ROIA/TMA	28,64		
Riscos	Payback/N		55,00	
	TMA/TIR		55,63	
Dimensão	Índice	Alta (< 33,33%)	Média (de 33,33% a 66,66%)	Baixa (> 66,66%)
Sensibilidades	$\Delta\%TMA$			79,75
	$\Delta\%FC_0$		44,61	
	$\Delta\%FC_j$	30,85		

Fonte: Elaborada pela autora no \$AVEPI® (2020).

Para o sistema de degradação Projeto C, na potência de 300 kWe, espera-se um retorno líquido de R\$ 20.978,89 (VPL) em 20 anos, equivalente a R\$ 1.013,21 por ano (VPLA). Para cada unidade monetária investida, há a expectativa de retorno de 1,1552. Isso é equivalente a um ganho de 0,55% ao ano, além da TMA de 8,5%. Esse PI apresenta um índice ROIA/TMA igual a 8,41%, sendo enquadrado na categoria de baixo retorno (Lima *et al.*, 2015). O índice *Payback/N* é de 85%, ou seja, o PI tem que ser promissor, no mínimo em 17 anos para produzir superávit financeiro. Por outro lado, o índice TMA/TIR resultou em 82,12%. Esses resultados indicam que o PI em estudo apresenta um nível de risco alto (Lima *et al.*, 2015). Os índices de AS da MMIA apontam para uma alta sensibilidade nos Referências TMA, FC_0 e FC_j . Esses resultados estão sintetizados na Figura 23, os quais indicam a necessidade de aplicação da SMC (Lima *et al.*, 2017a).

Figura 23 - Escala para confrontar as dimensões da MMIA no sistema C

Dimensão	Índice	Baixo (< 33,33%)	Médio (de 33,33% a 66,66%)	Alto (> 66,66%)
Retorno	ROIA/TMA	8,41		
Riscos	Payback/N			85,00
	TMA/TIR			82,12
Dimensão	Índice	Alta (< 33,33%)	Média (de 33,33% a 66,66%)	Baixa (> 66,66%)
Sensibilidades	$\Delta\%TMA$	21,78		
	$\Delta\%FC_0$	11,52		
	$\Delta\%FC_j$	10,33		

Fonte: Elaborada pela autora no \$AVEPI® (2020).

4.2.3 Análise estocástica via SMC

A tomada de decisão sobre a viabilidade econômica de um PI pode ser embasada utilizando a abordagem determinística, seguida pela estocástica (SILVA *et al.*, 2019; DRANKA *et al.*, 2020). A necessidade da SMC é mais acentuada em PI que apresentam margens de segurança pequenas (alta sensibilidade). A descrição da configuração adotada para a SMC, bem como os resultados gerados serão apresentados apenas para o sistema de mono degradação dejetos bovinos na potência de 500 kWe. Os demais casos, apresentam resultados e análises similares sendo omitidas por questão de espaço e objetividade.

A Tabela 14 apresenta a configuração adotada para a SMC. Ao todo, foram geradas 100.000 simulações, nas quais o horizonte de planejamento (N) foi mantido fixo em 20 anos. A TMA teve sua variação, seguindo uma distribuição de probabilidades triangular, com valores variando de 2% (valor mínimo) a 14% (valor máximo), valores baseados no comportamento histórico da Taxa Selic nos últimos anos. Demais Referências, também seguiram uma distribuição triangular, mas com valores mínimos iguais a 90% dos valores mais prováveis e valores máximos iguais a 110% dos valores-base. A Figura 24 mostra a tela de entrada dos dados no \$AVEPI®.

Tabela 144: Configuração adotada para a SMC

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Mais Provável	Valor Máximo
TMA (%)	2	8,5	14
FC _o (R\$)	249.648,30	277.387,00	305.125,70
FC _j (R\$)	27.998,40	31.109,33	34.220,26

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 24 - Tela de entrada dos dados para a SMC

\$AVEPI Recursos Didáticos Projetos e Informações Módulos Reportar Erro English Créditos Logout

Abordagem Estocástica - Simulação de Monte Carlo - Fluxo de Caixa

Taxa Mínima de Atratividade (TMA, %)	Investimento Inicial (FC ₀)	Valor Residual (VR)	Fluxo de Caixa (FC _j)
Distribuição Triangular	Distribuição Triangular	Determinístico	Distribuição Triangular
FC constante? <input checked="" type="checkbox"/>			
Limpar		Avançar	

Horizonte de Planejamento (N)	Número de simulações		
20	100000		
Deseja calcular probabilidades específicas? <input type="checkbox"/> Sim			
Taxa Mín. de Atratividade (TMA, %)	2	6.5	14
Distribuição Triangular			
Investimento Inicial (FC ₀)	249648.3	277387	305125.7
Distribuição Triangular			
Valor Residual (VR)	0		
Fluxo de Caixa (FC _j)	27998.397	31109.33	34220.263
Distribuição Triangular			
Limpar		Calcular	

Fonte: Elaborada pela autora no \$AVEPI® (2020).

Os resultados encontrados são apresentados nas Figuras 25 (estatísticas descritivas), 26 (probabilidades, Valor em Risco – VaR e Valor em Risco Condicional – CVaR). A interpretação das estatísticas descritivas é elementar, sendo omitida. Cabe observar que o VPL médio e a mediana são próximos do VPL determinístico, sendo menores pois para a TMA foi utilizado um triângulo não isóscele. Esse resultado é esperado, pois o objetivo da SMC é aprofundar a análise de risco, pouco agregando sobre o retorno do PI (GULARTE *et al.*, 2020; TONIAL *et al.*, 2020).

Figura 25 - Estatísticas descritivas via SMC

Estatísticas Descritivas	VPL
Mínimo (R\$)	-92.372,65
Máximo (R\$)	250.828,43
Amplitude (Máx - Mín) (R\$)	343.201,08
Média (R\$)	48.458,34
Desvio-padrão (R\$)	62.313,43
Coefficiente de variação (R\$)	128,59%
Mediana (R\$)	42.759,72

Fonte: Elaborada pela autora no \$AVEPI® (2020).

Figura 26 - Estatísticas inferências segundo a SMC

Quantidade: VPL < 0	24.622
Método da frequência – Lei dos Grandes Números: P(VPL < 0)	24,62%
Área sob a curva – Teorema Central do Limite: P(VPL < 0)	21,84%
Valor em Risco (VaR(5%)) – Value at Risk	- R\$ 54.038,13
Valor em Risco Condicional (CVaR(5%)) – Conditional Value at Risk	- R\$ 63.928,59

Fonte: Elaborada pela autora no \$AVEPI® (2020).

A Figura 26 apresenta as probabilidades de o PI gerar prejuízo financeiro (VPL < 0) para a propriedade rural, sob os enfoques frequentista e área sob a curva da distribuição normal. Pelo enfoque frequentista, esta probabilidade é de 24,62%, pois ocorreram 24.622 resultados desfavoráveis, em uma amostra aleatória de 100.000 cenários. Por outro lado, pelo cálculo da área sob a curva, a probabilidade é de 21,84%, sendo este o valor adotado.

Assim, pela distribuição de probabilidades resultante para o VPL em 100.000 simulações, observa-se que há 21,84% de probabilidade de o VPL ser negativo. Portanto, a probabilidade de o PI ser promissor sob a ótica econômica é de 78,16%. Uma análise análoga pode ser realizada para os demais indicadores da MMIA (LIMA *et al.*, 2017a; CARICIMI e LIMA, 2018).

A Figura 25 também apresenta o VaR (*Value at Risk*) e o CVaR (*Conditional Value at Risk*) para o nível mais comum (5%) (CARICIMI e LIMA, 2018; SILVA *et al.*, 2019). Dessa forma, há 5% de probabilidade de o PI em estudo gerar um prejuízo

financeiro de cerca de R\$ 54.038,13 (VaR). Nesse contexto, espera-se uma perda média de aproximadamente R\$ 63.928,59 (CVaR).

Os resultados indicam que variações do ambiente podem impactar severamente no desempenho econômico de cada sistema e potência. A incorporação de componentes probabilísticos foi essencial, pois permitiu concluir que mesmo diante das incertezas propostas o projeto indica recuperação do capital investido pela propriedade.

Com os resultados da SMC é possível obter uma melhor percepção quanto aos riscos associados ao PI, em que se torna possível a extensão dos resultados em conjunto com as probabilidades vinculadas, em vez de usar apenas um valor pontual. Contudo, a decisão de investir nesse empreendimento fica a cargo do proprietário, baseado no seu grau de aversão ao risco.

4.3 DISCUSSÃO

Da avaliação técnica conclui-se que os sistemas de produção de biogás e biofertilizante quanto à utilidade dos substratos o processo torna-se mais eficiente. Sendo que, a relação carbono: nitrogênio defini em grande parte o percentual de substrato utilizado podendo ser estes utilizados nos intervalos de 22 a 65% para Projeto A e Projeto B, e 18 a 54% para o Projeto C, substrato de 60:40, pois estes valores encontram-se próximas ao intervalo médio ideal das relações C:N de 25:1 de acordo com pesquisas feitas por (Hills 1979 apud Piñas, 2016), para amostras de dejetos bovino.

Os sistemas de degradação avaliados, possuem características do sistema de degradação com tecnologias de alta eficiência, já que possuem valores de taxa de carga orgânica de 3,77 m³/dia para o Projeto A; 4,15 m³/dia para Projeto B e 4,05 m³/dia para o Projeto C. De acordo com GALBIATTI *et al.* (2010) apud PIÑAS, (2016). a carga orgânica influencia diretamente na qualidade do biogás gerado, pode conter entre 40 e 80% de metano e na redução do TRH.

Quanto a eficiência na produção do biogás pode-se observar a eficiência elétrica se incrementa à medida que a potência do sistema aumenta. Quanto a

eficiência de conversão varia de 37,79% a 41,56% para potências de 100 kWe a 1.000kWe. As eficiências térmicas determinadas variam de 46,04% a 41,42% para potências de 100 a 1.000 kWe, respectivamente.

As condições determinadas para a operação do sistema, em temperaturas mesofílicas de 38°C, o tempo de retenção hidráulica calculado foi de 20,38 dias. De acordo com há pesquisas feitas por Hegde et al. (2007) apud Piñas, (2016), concluíram que a degradação de madeira e resíduos vegetais é mais rápida que em condições mesofílicas de 35 °C, tendo obtido valores de TRH de 11 e 27 dias, respectivamente.

Segundo Piñas, (2016), os biodigestores apresentaram diferença de volume para os três sistemas, para o Projeto A são 2,3 vezes maiores que os volumes dos biodigestores para a degradação de Projeto B e 2,32 vezes maiores que os volumes dos biodigestores para a degradação de Projeto C. O maior consumo, tanto elétrico como de calor, ocorre no Projeto A, devido ao fato que estes sistemas precisam de maior energia por sua maior demanda de substância em comparação dos outros sistemas de digestão.

Diante disso, recomenda-se a implantação de dois sistemas de geração de energia elétrica, ambos sistemas Projeto B e Projeto C., entretanto, é preciso monitorar os custos (investimento inicial e custos de operação e manutenção) e receitas, para que, se estes sofrerem variações significativas, o projeto seja revisto e torne o sistema inviável.

Os sistemas de degradação Projeto B e Projeto C apresentam melhores resultados econômicos, tornando-se mais vantajosas, em comparação aos sistemas do Projeto A. Entretanto os três sistemas analisados apresentam viabilidade econômica.

Para melhorar os ganhos na economia dos processos de degradação, é preciso maximizar os benefícios econômicos. Para isso, é necessário que a localização dos fabricantes dos equipamentos de biogás no Brasil se encontre perto de lugares próximos aos produtores rurais que trabalhem com tamanhos variados desses equipamentos. Desta forma, se pode garantir a viabilidade econômica e o retorno do investimento em menor tempo.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve por objetivo desenvolver um modelo para analisar aspectos técnicos e econômicos de investimentos para a geração de energia elétrica e biofertilizante através de biodigestor com resíduos da bovinocultura.

A viabilidade do modelo, foi utilizado três opções de sistema, com dez variações de potência. Para isso, utilizou-se os indicadores para avaliação técnica que mostraram qual dos sistemas apresenta melhor desempenho.

Segundo a avaliação feita por Piñas, (2016), quanto aos aspectos técnicos foi desenvolvida através pequenas variações nos parâmetros do sistema. Como resultado técnico obteve-se que o perceptual ótimo de combinação é de forragem de milho em sistemas de degradação Projeto B se encontram nos intervalos de 22-65%, para valores da relação C:N 25:1, para forragem de capim para sistemas de degradação Projeto C está nos intervalos de 18-54%. O sistema trabalhando nessa faixa de combinação e com boas condições climáticas temos a melhor eficiência na geração do biogás bem como redução do TRH.

A análise econômica foi desenvolvida por meio das abordagens determinística via MMIA e estocástica por meio da SMC para complementar a avaliação dos riscos de desempenho dos sistemas em cenários de incertezas. Os resultados dos indicadores de retorno, riscos e sensibilidades da MMIA e da SMC, melhor subsidiam a tomada de decisão.

Os resultados indicam a viabilidade econômica do investimento para todos os sistemas avaliados, mas a viabilidade depende da potência instalada. Dessa forma, a escolha do melhor sistema e a potência mínima são fundamentais para assegurar a viabilidade econômica do investimento.

6 REFERÊNCIAS

ABIEC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES. Pecuária Brasileira. Disponível em: < http://www.abiec.com.br/3_pecuaria.asp> Acesso em: 22 agosto. 2018.

AGROANALYSIS. **A Revista do Agronegócio da FGV**. Fundação Getúlio Vargas. Novembro 2014.

AHNA, J.; DOA, T. H.; KIMB, S. D.; HWANG, S. The effect of calcium on the anaerobic digestion treating swine wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, v.30, p.33-38, 2012.

ALLEGUE L. B., HINGE J., “Biogas upgrading: Evaluation of methods for H₂S removal”, **Denmark: Danish Technological Institute**. 31p., pp.1–31, 2014.

ALVAREZ, R.; VILLCA, S.; LIDÉN, G. Biogás production from llama and cow manure at high altitude. **Biomass and Bioenergy**, 2011.

ALVAREZ, R.; GUNNAR, L. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. **Renewable Energy**, 2008.

ANEEL, **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Lei nº 9.427. Brasília, DF, 2016. Disponível em:< http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=50> Acesso em: 20 de dezembro de 2018.

AMARAL, C. M. C.; AMARAL, L. A.; LUCAS JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRA, D. S.; MACHADO, M. R. F. degradação de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Revista Ciência Rural**, 2004.

ANGONESE, A.R.; CAMPOS, A.T.; ZACARKIM, C.E.; MATSUO, M.S.; CUNHA, F. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento de resíduos em biodigestor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, p.745-750, 2006.

ARAÚJO, E. N.; OLIVEIRA, A. P., CAVALCANTE, L. F.; PEREIRA, W. E.; BRITO, N. M.; CYNTHIA, M. D. L.; SILVA, É. É. Produção do pimentão adubado com esterco bovino e biofertilizante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 5, p. 466- 470, 2007b.

ARAÚJO, F. A. R. Biofertilizante bovino e adubação mineral no mamoeiro e na fertilidade do solo. 2007. 98p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Areia, PB. 2007a.

ARAÚJO, M. J. Fundamentos de Agronegócios. 2. ed. São Paulo, Atlas, 2009.

ARRUDA, M. H.; AMARAL, L. De L.; PIRES, O. P. J.; BARUFI, C. R. V. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. **Revista Científica Eletrônica De Agronomia**, Garças, ano 1, n. 2, 2002.

ASMELL, A.; CADAVID, F. J.; OSPINA, C. J. Analisis comparativos de eficiencia en cocción con gas natural y electricidad, **Revista Facultad de Ingenieria**, p.98–105, 2001.

BARBOSA, G.; LANGER, M. **Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental**. Joaçaba-SC, 2011.

BARICHELLO, R.; HOFFMANN, R. O uso de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedades Rurais com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso da Região Noroeste do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, 2010. 139p

BARRERA, P . **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 2. ed. São Paulo, 2007.

BERNS, A., SCHNICKE, H.-P., BOMBONATTI, P. “Anteprojeto de uma usina de pesquisa e capacitação em biogás/Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)”, Brasília, 2015.

BOND, M. R. Templeton, “History and future of domestic biogas plants in the developing world”, **Energy for Sustainable Development**, vol. 15, n.4, p.347–354, 2011.

BRUNI, A.L. **Avaliação de Investimentos**. Série Finanças na Prática. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

Dranka GG, Ferreira P, Vaz AIF. Cost-effectiveness of energy efficiency investments for high renewable electricity systems. **Energy**. 2020.

CALADO, A. A. C. **Agronegócio**. 2. ed. São Paulo, Atlas, 2008.

CAMPOS, V. B.; CAVALCANTE, L. F.; CAMPOS, S. S. P.; GHEYI, H. R.; CHAVES, L. H. G.; MESQUITA, F. O. Esterco bovino líquido em luvisolo sódico: Resposta biométrica e produtiva do maracujazeiro amarelo. **Idesia** (Arica), v. 29, n. 2, p. 59-67, 2011.

CAMPOS RODRÍGUEZ, C. E. ESCOBAR PALACIO, J. C. VENTURINI, O. J. SILVA LORA, E. E. COBAS, V. M. MARQUES DOS SANTOS, D. LOFRANO DOTTO, F. R. GIALLUCA, V. Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil, **Applied Thermal Engineering**, vol. 52, p.109–119, 2013.

CARICIMI R., LIMA J. D., Economic Analysis for Small Hydroelectric Power Plant using Extended Multi-Index Methodology – An Approach Stochastic by the Monte Carlo Simulation. **IEEE Latin America Transactions**, VOL. 16, 2018.

CARVALHO, P.C.F.; RIBEIRO FILHO, H.M.N.; POLI, C.H.E.C.; MORAES, A.; DELAGARDE, R. **Importância da estrutura da pastagem na ingestão e seleção de dietas pelo animal em pastejo**. In: PEDREIRA, C.G.S.e DA SILVA, S.C. (Ed.) A Produção Animal na Visão dos Brasileiros, Piracicaba: FEALQ, 2001.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. Biodigestores. IN: VI Semana de Tecnologia em Alimentos. **Anais**. Ponta Grossa, 2008.

CASAROTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. **Análise de investimentos**. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

CATAPAN, A; CATAPAN, D. C; CATAPAN, E. A. **Formas alternativas de geração de energia elétrica a partir do biogás**: uma abordagem do custo de geração da energia. São Paulo, 2011.

CATAPAN, A; SOUZA, A; CATAPAN, D. C; HARZER, J. H. Use of Bio-digesters for the Generation of Electric Energy from Equine Waste in Brazil: An Analysis of the Financial Viability with the Use of Monte Carlo Simulation. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Uberlândia, Minas Gerais, 2013.

CATAPAN, D. C; CARVALHO, R. I. N; CATAPAN, A. **Perfil da produção e destino dos dejetos de suínos no município de São José dos Pinhais**. Paraná, 2011.

CAUCHICK, M. P. A. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Elsevier: Rio de Janeiro, , 2012.

CEPEA - **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada/Esalq-USP**. Piracicaba, acessado 27 maio 2019, <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>.

CLAUDINO, Edison. S.; TALAMINI, Edson. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agro-negócio: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiente**, v. 17, n. 1, p. 77-85, 2013.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M. de; SOUZA, J. de. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite. In: **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 6., 2006.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. Cascavel-PR, 2006.

CORREIA NETO, J. F. **Avaliação de um software houve através da simulação de Monte Carlo**. Fortaleza, 2013.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. Porto Alegre, 2007.

DANIEL, T; da R;. Avaliação dos afluentes e efluentes em sistemas de biodigestores em escala real para a produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos da pecuária leiteira. 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

DEGANUTTI, R., PALHACI, M. C. J. P., ROSSI, M., TAVARES, R., SANTOS, C. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. FEAGRI. Faculdade de Engenharia Agrícola de São Paulo, São Paulo, 2002.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an Introduction**. 2nd edition. Germany: Wiley VCH. 2011.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**, 2008.

DIOHA, I., IKEME, C. NAFI'U, T. SOBA N., YUSUF, M. B. S., "Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production", **International Research Journal of Natural Sciences**, 2013.

DRANKA, G.G., Lima, J. D., R., Bonotto C., Machado, R. H.S. **Economic and Risk Analysis of Small-Scale PV Systems in Brazil**. Paraná. Brasil, 2018.

DRUMM, F. C. GERHARDT, A. E. FERNANDES, G. D. CHAGAS, P. SUCOLOTTI, M. S. KEMERICH, P. D. D. C. “Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores”, **Reget**, vol. 18, p.66–78, 2014.

EMBRAPA. **Sistema de Tratamento de dejetos Bovinos**. Inventário Tecnológico, 2011. Disponível:<http://www.cnpsa.embrapa.br/invtec/09.html> Acesso em: setembro 2018.

ERTHAL, V. J. T.; FERREIRA, P. A.; PEREIRA, O. G.; MATOS, A. T. de. Características fisiológicas, nutricionais e rendimento de forrageiras fertirrigação com água residuária de bovinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n.5, p. 458- 466. Campina Grande, 2010.

EUCLIDES FILHO, K. **o enfoque de cadeia produtiva como estratégia para a produção sustentável de carne bovina**. In Medeiros, SR. A produção animal e a segurança alimentar. Campo Grande. 2004

EXAME. Disponível em: < <http://exame.abril.com.br/noticias/agronegocio>> Acesso em: 02 de novembro de 2018.

FAO – **organização das nações unidas para agricultura e alimentação**. Disponível:<http://www.fao.org/documents/card/en/c/6899c8da-af41-4271-aa54-06aa2b602720> Acesso em maio de 2019.

FEPAM - **Fundação Estadual de Proteção Ambiental**. Disponível: www.fepam.rs.gov.br. Acesso em junho de 2019.

GASPAR. A. **Utilidade de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor**: um estudo de caso na região de Toledo-PR, 2003.

FERRAZ, J. M. G., Mariel, I. E. **Biogás uma fonte Alternativa de Energia**. Brasil, 27p., 2009.

FERREIRA, D. F. S. **A computer statistical analysis system**. Ciência e Agrotecnologia, Lavras,2011.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, 2017.

FLORINDO, T. J.; MEDEIROS, G. I. B.; COSTA, J. S.; RUVIARO, C. F. Competitividade dos principais países exportadores de carne bovina no período de 2002 a 2013. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 12, 2015.

GOFFI, G., CUCCULELLI, M., and MASIERO L. 2019. "Fostering tourism destination competitiveness in developing countries: The role of sustainability." **Journal of Cleaner Production**, .2018.

GROPPELLI, A.; NIKBAKHT, E. **Administração financeira**. 2 ed São Paulo, Brasil: Saraiva, 2010.

GULARTE, L. C. P.; LIMA, J. D. de; OLIVEIRA, G. A.; BARICHELLO, R.; PINTO, M. A. N. Modelo de avaliação da viabilidade econômico-financeira da implantação de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil em municípios brasileiros. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 25, p.281-291, 2020.

HALMEMAN, R.J.; RODRIGUES, S.A. Matriz energética brasileira: uma reflexão sobre a situação atual e possíveis riscos de "apagões". **Bioenergia em revista: diálogos**, ano 2, n.1, p.11-26. 2012.

HARDOIM, P.C. Efeito da temperatura de operação e da agitação mecânica na eficiência da biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos. 1999. 88 f. Tese (Doutorado em Produção Animal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1999.

HELLWING, A. L. F.; WEISBJERG, M. R.; MØLLER, H. B. Enteric and manure-derived methane emissions and biogas yield of slurry from dairy cows fed grass silage or maize silage with and without supplementation of rapeseed. **Livestock Science**, v. 165, p. 189-199, 2014.

HOLM-NIELSEN, J.B., OLESKOWICZ-POPIEL, P., AL SEADI, T. Energy crop potentials for the future bioenergy in EU-27. In: **Proceedings of the 15th European Biomass Conference**, 7–11 May 2007.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e estatística**. IBGE Cidades. Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1> Acesso em: 30 out. 2019.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agropecuária**, 2015. Disponível: <http://www.sidra.ibge.gov.br> Acesso em: 23 de janeiro, 2019.

IFCN **International Farm Comparison Network**. Disponível em: <http://www.ifcndairy.org/media/bilder/inhalt/News/DR2012/IFCN-Dairy-Report-2012-press-release-corrected.pdf>. Acesso em 08 de outubro, 2018.

JANGONESE, A. R. CAMPOS, A. T., WELTER, R. “Potencial de redução de emissão de equivalente de carbono de uma unidade suinícola com biodigestor”, 2007.

JUNQUEIRA, B. J. degradação e Compostagem com dejetos de Bovinos Confinados e Aplicação do Biofertilizante e do Composto em Área Cultivada com Panicum Maximum JACQ., CV Tanzânia Jaboticabal SP, 2011.

KUMAR, K.V.; SRIDEVI,RANI, K.; SAKUNTHALA, M.; KUMAR, C.S. A review on production of biogas, fundamentais, applications its recent enhancing techniques. **Chemical Engineering**. 2013

KUNZ, A; HIGARASHI, M. M; OLIVEIRA, P. A. Tecnologias de manejo e tratamento de dejetos de suínos estudadas no Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasil, 2005.

LABATUT, R. A., ANGENENT, L. T. SCOTT, N. R. “Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates”, **Bioresource Technology**, 2011.

LARDIZABAL, C. C. et al. Desenvolvimento de energias renováveis: comparativo dos cenários e das perspectivas de políticas públicas para alguns países da América Latina. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 30, p. 11-30, jul. 2014.

LIMA, J. D. de; TRENTIN, M. G.; OLIVEIRA, G. A.; BATISTUS, D. R.; SETTI. A systematic approach for the analysis of the economic viability of investment projects. **Int. J. Engineering Management and Economics**. Brasil, 2017.

LIMA, J. D. de; TRENTIN, M. G.; OLIVEIRA, G. A.; BATISTUS, D. R.; SETTI, D. Systematic analysis of economic viability with stochastic approach: a proposal for investment. In: AMORIM, M., C. FERREIRA, M. VIEIRA JUNIOR, C. Prado (Orgs). Engineering systems and networks: the way ahead for industrial engineering and operations management (**Switzerland: Springer International Publishing**. 2017a.

LIMA, J. D. de; BENNEMANN, M.; SOUTHER, L. F. P.; BATISTUS, D. R.; OLIVEIRA, G. A. \$AVEPI – Web System to Support the Teaching and Learning Process in Engineering Economics. **Brazilian Journal of Operations and Production Management**, v. 14, p. 469-485, 2017b.

LIMA, J. D. de. **Manual de Análise da Viabilidade Econômica de Projetos de Investimentos** (MAVEPI): abordagem determinística e estocástica, 2017.

LIMA, J. D. DE et al. A systematic approach for the analysis of the economic viability of investment projects. **Int. J. Engineering Management and Economics**, 2015.

LIMA, J. D. de. **Manual de Análise da Viabilidade Econômica de Projetos de Investimentos** (MAVEPI): abordagem determinística. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR – Câmpus Pato Branco), 2016.

LIMA, J. D. de et al. Estudo de viabilidade econômica da expansão e automatização do setor de embalagem em agroindústria avícola. **Custos e @gronegócios**, v. 12, n. 1, p. 89–112, 2016.

MALHOTRA, N. K. **Marketing research: an applied orientation**. New Jersey: Prentice-Hall, 1993.

MALHOTRA, N. **Pesquisa de marketing**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

MATOS, A. T. **Curso sobre tratamento de resíduos agroindustriais**. Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental / UFV. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2005

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**, 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MIGUEL, P. A. C. **Estudo de caso na engenharia de produção**: estruturação e recomendações para sua condução. Brasil, 2007.

MMA, Brasília. **Ministério do Meio Ambiente. Programa Antártico Brasileiro**. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços. Disponível em: Acesso em: 11 dez. 2002.

MINISTÉRIO DE ENERGIA - Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la

Agricultura - FAO, Global Environment Facility - GEF, **Manual de Biogás**. Santiago de Chile: FAO. 120p., 2011.

MIRANDA, A. P.; AMARAL, L. A.; LUCAS JÚNIOR, J. **Influência da temperatura na degradação de dejetos de bovinos**. Paraíba, 2006.

MMA e CNMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE e CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução 430, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646> Acesso em 08 de outubro, 2018.

MONTORO, S. B., SANTOS, D. F. L. & LUCAS JÚNIOR, J. Análise econômica de investimentos que visam à produção de biogás e biofertilizante por meio de biodigestão anaeróbia na bovinocultura de corte. **Revista Eletrônica Mestrado em Administração**, 2013.

NICHOLSON, F. A.; GROVES, S. J.; CHAMBERS, B. J. Pathogen survival during livestock manure storage and following land application. **Bioresource Technology**, 2005.

NZILA, C., DEWULF, J.; SPANJERS, H.; TUIGONG, D.; Kiriamiti, h.; Van Langenhove, H. Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. **Applied Energy**, 2012.

OLIVEIRA, P.A. V.; **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de bovinos**: manual de boas práticas. Concórdia: 2004.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JUNIOR J. **Influência da relação volumoso**: concentrado e do tempo de retenção hidráulica sob degradação de dejetos de bovino. Jaboticabal, 2010.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO A. C. A. LUCAS JÚNIOR, J. de. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Engenharia Agrícola**, v.29, p.474-482. 2009.

PALACIO, J. C. E., OROZCO, D. J. R., LORA, E. S., VENTURINI O. J., BARROS, R. M., **“Procesos biológicos de conversión”**, em **Bioenergía: Fuentes, conversion e sustentabilidad**, 1.a ed., J. M. R. Martínez e E. E. S. Lora, Eds. Bogotá: CYTED. 332p., 2014.

PEREIRA, A. C.; SILVA, G. Z.; CARBONARI, M. E. E. **Sustentabilidade, responsabilidade social e meio ambiente**. São Paulo: Saraiva, 2011.

PIÑAS, J. A. V. “**Avaliação técnico-econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás em sistemas de digestão anaeróbia centralizada e descentralizada no Brasil**”, Itajubá, 2016. 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá, 2016.

POESCHL, Martina; WARD, Shane; OWENDE, Philip. Environmental impacts of biogas deployment–Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. **Journal of cleaner production**, v. 24, p. 184-201, 2012.

PROCHNOW, A., M., HEIERMANN, PLÖCHL, M., AMON, T., HOBBS, P. J., “Bioenergy from permanent grassland - A review: 2. Combustion”, **Bioresource Technology**, 2009.

PROINFA: **caminho limpo para o desenvolvimento**. Disponível em: < www.mme.gov.br/programs_display.do Acesso em 14.jan.2018.

QUADROS, D. G. de; OLIVER, A. de P. M; REGIS, U.; VALLADARES, R.; SOUZA, P. H. F. de; FERREIRA, E. de J. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. v.14, p.326– 332, 2010.

QUIAO, W.; YAN, X.; YE, J.; SUN, Y.; WANG, W.; ZHANG, Z. Evolution of biogás production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. **Renewable Energy**, v.36, p.3313-3318, 2011.

RASOTO, A. et al. **Gestão Financeira: enfoque em inovação**. 1. ed Curitiba, 2002.

REGANOLD JP, DOBERMANN A. AGRICULTURA: COMPARING APPLES WITH ORANGES. Nature MACHADO, Rosane Bueno. **O biodigestor como alternativa tecnológica para o tratamento de dejetos de suínos**: um estudo de caso do sistema integrado de produção na região das missões do estado do Rio Grande do Sul. 2011.

REIS, R. B. Avaliação ambiental e do gradiente social nas infecções por leptospira em uma comunidade de Salvador-Bahia. 82 f. Tese (Doutorado) – Fundação Oswaldo Cruz, Centro de Pesquisas Gonçalo Moniz, Salvador, 2014.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILAN, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation

of biogás to biomethane. **Biomass e Bioenergy**, v.35, p.1633-1645, 2011.

RODRÍGUEZ C. E. C., PALACIO J. C. E., VENTURINI O. J., LORA E. E. S , “Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil”, **Applied Thermal Engineering**, 2013.

RUTZ, D., Sustainable heat use of biogas plants. A handbook, 2.a ed. Munich, Germany: **WIP Renewable Energies**, 2015.

SANTANA, L.E., CINTRA, L.M.L., 2012. A biodigestão como solução para a destinação dos resíduos do setor pecuarista, **Revista da Ciência da Administração**, vol. 6, p. 1-16, 2012.

SANTOS, E. L. B., JUNIOR, G. N. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJEITOS DE ORIGEM ANIMAL. **Tekhne e logos**, Botucatu SP, 2012.

SERAFIN, G. B.; GUIMARÃES FILHO, L. P. **Estudo sobre o reaproveitamento dos dejetos de suínos na bacia do rio Sangão** - Santa Catarina. 2015.

SGANZERLA, E. Biodigestor, uma solução. Porto Alegre: 2013.

SILVA, V.F.L.; PENARIOL, J.L.; DIAS, J.R.; THEODORO, T.R.; CARPEGIANI, J.A.; AGUIAR, L.G. “**Sulfonated Styrene- Dimethacrylate Resins with Improved Catalytic Activity**”. Department of Chemical Engineering, Engineering School of Lorena, University of São Paulo, Lorena, SP, 2019.

SILVA F. M., LUCAS JUNIOR J. BENINCASA M., OLIVEIRA, E. “**Desempenho de um aquecedor de água a biogás** 2005.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos**. São Paulo: Atlas. 2012.

SOUZA, C. F. **Degradação de dejetos de suínos: obtenção de dados e aplicação no desenvolvimento de um modelo dinâmico de simulação da produção de biogás**. Jaboticabal SP, 2017.

\$AVEPI. **Sistema de Análise da Viabilidade Econômica de Projetos de Investimentos**. Pato Branco- PR. 2020.

STEINMETZ, R. L. R., KUNZ, A. AMARAL A. C., H. M. Soares, T. Schmidt, H. Wedwitschka, “Suggested method for mesophilic inoculum acclimation to BMP assay”, **Embrapa**, Concórdia - SC: Embrapa, 2014.

TEIXEIRA, J. C; HESPANOL, A. N. **A trajetória da pecuária bovina brasileira**,

Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n.36, v.1, p.26-38, jan./jul. 2014.

TONIAL, C.H.; RODRIGUES, M.F.F.; BOSSE, M.A.; SOUSA, I.M.O.; LIMA, J.D. de; CUNHA, M.A.A. da; FOGLIO, M.A.; MARQUES, M.O.M.; MARCHESE, J. A.; Technical and economic evaluation of cultivation and obtaining of *Varronia curassavica* Jacq. essential oil. **Industrial Crops and Products**, 154, 1-12. 2020.

UPME Unidad de Planeación Minero Energética -, “Formulacion de un programa basico de normalizacion para aplicaciones de energías alternativas y difusión: Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás”, 2013.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

ZANETTE, A. L., “**Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**”, Rio de Janeiro, Brasil: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 97p., 2009.

ZANETTI, A., ARRIECHE, L., SARTORI D. J. “Estudo da composição ótima de diferentes resíduos orgânicos para a produção de biogás”, **em XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ**, 2014.

ZANATO, J. A. F. **Produção e qualidade do biogás gerado com os dejetos de diferentes espécies animais**. 2014. 112 - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. 2014.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

WALKER, Eliana. Estudo da viabilidade econômica na utilização de Biomassa como fonte de energia renovável na Produção de biogás em propriedades rurais. 2009. Dissertação (Mestre em Modelagem matemática) – Universidade Regional do Noroeste do estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Ijuí, Rio Grande do Sul. 2009.

WANG, X., YANG, G., FENG, Y., RENG., X., “Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw”, **Bioresource Technology**, vol. 120, pp.78–83, Set. 2012.

WANG, X., X. Lu, F. Li, G. Yang, “Effects of Temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) Ratio on the Performance of Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure, Chicken Manure and Rice Straw: Focusing on Ammonia Inhibition”, **PLoS ONE**, Mai. 2014.

WEILAND P., “**Biogas production: current state and perspectives**”, Applied Microbiology and Biotechnology. Brasil,2010.

WOHLIN, C. **Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering**. Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering – EASE, 2014.

Na Tabela a seguir apresenta orçamento do investimento inicial, contemplando os equipamentos juntamente com seus valores, esses os valores foram fornecidos pela empresa Recolast Ambiental que trabalha nesse segmento há 40 anos.



Orçamento para instalação de biodigestor tubular para propriedade rural.

Produção de 100 kWe

Material	Quantidade	Preço	Total
Biodigestor tubular	1	35800	35800
Mão de Obra Instalação	10	550	5500
Manta Geotêxtil	1045	4,5	4702,5
Válvula de Alívio	4	250	1000
Caixa de alvenaria	2	750	1500
Tubulação flexível	80	10	800
Frete do material	3	200	600
Medidor de biogás	1	6500	6500
Flagre	1	6500	6500
Caixa de água	1	1200	1200
Manômetro	1	256	256
Caixa de filtro	3	300	900
Terraplanagem	45	150	6750
Aluguel de maquinas	100	55	5500
Cimento, areia e pedra	1	8974	8974
Quadro de comando	1	5551	5551
Sistema de agitação	1	8500	8500
Sistema de purificação de biogás	1	9500	9500
Tubulação PVC	150	9,5	1425
Total			110033,5



Produção de 200 kWe

Material	Quantidade	Preço	Total
Biodigestor tubular	1	42258	42258
Mão de Obra Instalação	14	550	7700
Manta Geotêxtil	1057	4,5	4756,5
Válvula de Alívio	4	250	1000
Caixa de alvenaria	2	750	1500
Tubulação flexível	85	10	850
Frete do material	3	200	600
Medidor de biogás	1	6500	6500
Flagre	1	6790	6790
Caixa de água	2	1899	3798
Manômetro	1	300	300
Caixa de filtro	3	300	900
Terraplanagem	48	150	7200
Aluguel de maquinas	102	55	5610
Cimento, areia e pedra	1	9800	9800
Quadro de comando	1	5600	5600
Sistema de agitação	1	8500	8500
Sistema de purificação de biogás	1	10500	10500
Tubulação PVC	160	9,5	1520
Total			124162,5

A Figura a seguir apresenta a tela de entrada dos dados (*input*) na ferramenta computacional \$AVEPI®.

Figura: Tela de entrada de dados dos 30 projetos avaliados

Recursos Didáticos Projetos e Informações Módulos - Reportar Erro English Créditos Logout

Abordagem Determinística - N Projetos - Vidas iguais

Quantidade de Projetos
30

Limpar Avançar

Taxa Mínima de Atratividade (TMA, %)
6.5

Horizonte de Planejamento (N)
20

Projeto	Investimento Inicial (FC_0)	Valor Residual ou de Venda (VR)	Fluxo de Caixa (FC_j)	Fluxo de Caixa constante?
Projeto A	107003	0	-2051.02	<input checked="" type="checkbox"/>
Projeto B	159687	0	4619.35	<input checked="" type="checkbox"/>
Projeto C	203339	0	12739.88	<input checked="" type="checkbox"/>
Projeto D	242020	0	21658.56	<input checked="" type="checkbox"/>
Projeto E	277387	0	31109.33	<input checked="" type="checkbox"/>
...				
Projeto l	299468	0	72951.78	<input checked="" type="checkbox"/>
Projeto j	324256	0	84101.1	<input checked="" type="checkbox"/>
Projeto A	348013	0	95415.95	<input checked="" type="checkbox"/>

Voltar Limpar Calcular

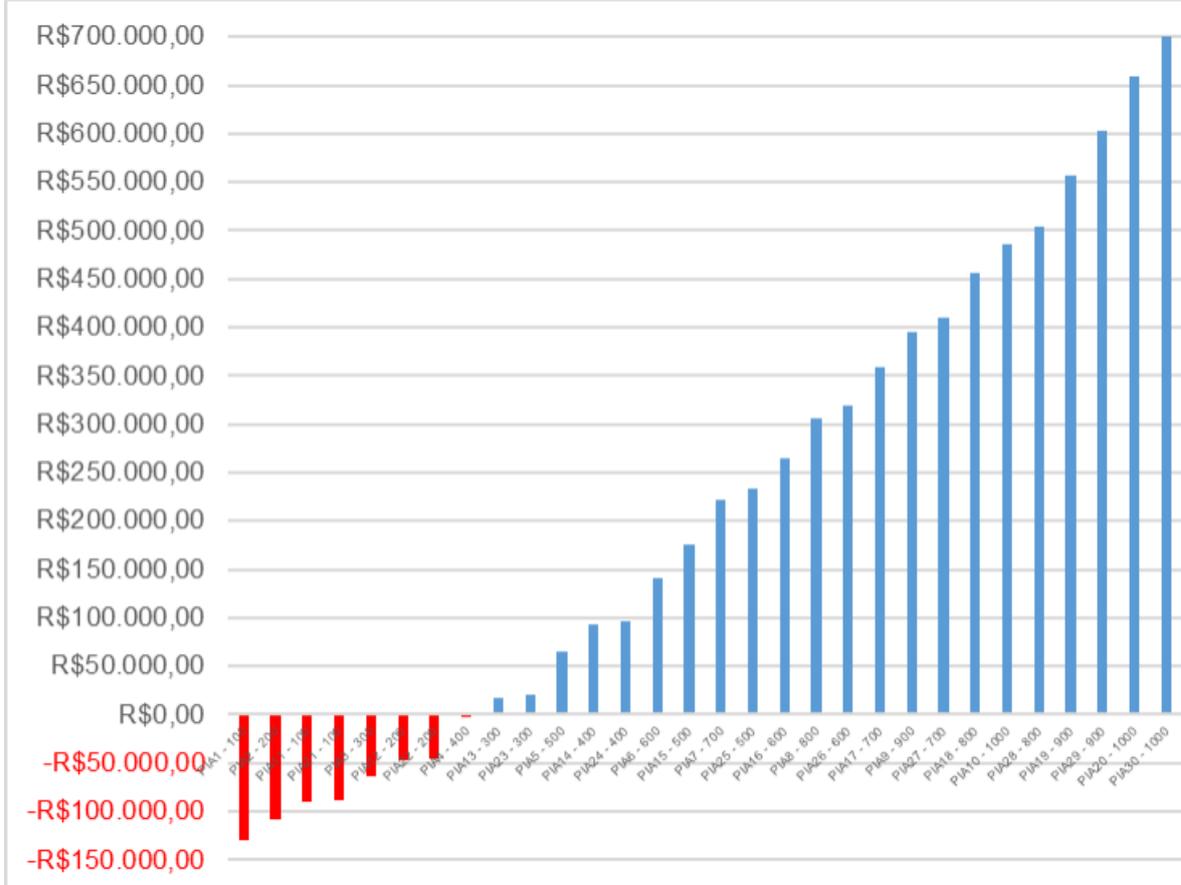
Fonte: Elaborada pela autora no \$AVEPI® (2020).

Na Figura a seguir, os PIs com valores coloridos foram objetos de aplicação e discussão dos resultados observados via MMIA determinística e da SMC, se necessária, ambas geradas pelo \$AVEPI®.

Figura: Planilha com os cálculos intermediários – memória de cálculo

Potência elétrica [kWe]	Investimento inicial [R\$]			Custos de Operação e Manutenção [R\$]			Receita [R\$]			Fluxo de Caixa [R\$]			Valor Presente Líquido (VPL)		
	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C
100	107.003,00	92.717,00	92.150,00	17.206,08	14.908,89	14.817,72	15.155,06	15.151,61	15.151,48	-2051,02	242,72	333,76	-R\$129.602,18	-R\$90.042,59	-R\$88.472,46
200	159.687,00	137.451,00	136.569,00	25.677,67	22.102,12	21.960,30	30.297,02	30.291,65	30.291,44	4619,35	8189,53	8331,15	-R\$108.788,66	-R\$47.214,60	-R\$44.772,16
300	203.339,00	174.528,00	173.386,00	32.696,91	28.064,10	27.880,47	45.436,80	45.429,85	45.429,57	12739,88	17365,74	17549,1	-R\$62.964,54	-R\$16.816,53	-R\$19.978,89
400	242.020,00	207.391,00	206.018,00	38.916,82	33.348,47	33.127,69	60.575,38	60.567,02	60.566,69	21658,56	27218,55	27439	-R\$3.375,00	-R\$92.516,79	-R\$96.318,82
500	277.387,00	237.446,00	216.435,00	44.603,83	38.181,32	34.802,75	75.713,16	75.703,52	75.698,45	31109,33	37522,21	40895,71	-R\$65.391,38	-R\$175.992,74	-R\$234.174,68
600	310.327,00	265.444,00	245.904,00	49.900,58	42.683,40	39.541,36	90.850,35	90.839,53	90.834,81	40949,77	48156,13	51293,45	-R\$140.878,34	-R\$265.164,67	-R\$319.273,25
700	341.378,00	291.842,00	273.442,00	54.893,58	46.928,19	43.969,47	105.987,09	105.975,14	105.970,70	51093,51	59046,95	62001,23	-R\$221.596,21	-R\$358.767,25	-R\$409.719,00
800	370.901,00	316.944,00	299.468,00	59.640,88	50.964,60	48.154,45	121.123,46	121.110,45	121.106,23	61482,58	70145,85	72951,78	-R\$306.545,25	-R\$455.958,56	-R\$504.351,72
900	399.154,00	340.967,00	324.256,00	64.183,96	54.827,49	52.140,36	136.259,53	136.245,49	136.241,46	72075,56	81818	84101,1	-R\$395.011,08	-R\$556.137,82	-R\$602.412,58
1.000	426.316,00	364.071,00	348.013,00	68.551,61	58.542,62	55.960,49	151.395,33	151.380,31	151.376,44	82843,71	92837,7	95415,95	-R\$486.498,02	-R\$658.861,87	-R\$703.328,34

TMA	N	FC ₀	FC ₁	VPL	VPLA	IBC	ROIA	ROA/TMA	TR	TMA/TR	Payback	Payback/ROA	Δ%TMA	Δ%FC ₀	Δ%FC ₁	VL TMA	VL FC0	VL FCj
PIA ₁ - 100	RS107.003,00	-R\$2.051,02	-R\$129.602,18	-R\$11.762,23	-0,21120	#NÚM!	#NÚM!	#NÚM!	#NÚM!	-24	-120,00%	#NÚM!	-121,12%	573,48%	#NÚM!	-R\$22.599,18	-R\$9.711,21	
PIA ₂ - 200	RS159.687,00	RS4.619,35	-R\$108.788,66	-R\$9.873,27	0,31874	-5,56%	-85,49%	-4,73%	-137,49%	#NÚM!	#NÚM!	-172,73%	-68,13%	-213,74%	-4,73%	RS50.898,34	RS14.492,62	
PIA ₃ - 300	RS203.339,00	RS12.739,88	-R\$62.964,54	-R\$5.714,43	0,69035	-1,84%	-28,24%	2,25%	288,65%	#NÚM!	#NÚM!	-65,36%	-30,97%	-44,85%	2,25%	RS140.374,46	RS18.454,31	
PIA ₄ - 400	RS242.020,00	RS21.658,56	-R\$3.375,00	-R\$306,30	0,98605	-0,07%	-1,08%	6,32%	102,78%	21	105,00%	-2,71%	-1,39%	-1,41%	6,32%	RS238.645,00	RS21.964,86	
PIA ₅ - 500	RS277.387,00	RS31.109,33	RS65.391,38	RS5.934,69	1,23574	1,06%	16,37%	9,33%	65,55%	14	70,00%	43,57%	23,57%	19,00%	9,33%	RS342.778,38	RS25.174,64	
PIA ₆ - 600	RS310.327,00	RS40.949,77	RS140.878,34	RS12.785,61	1,45397	1,89%	29,06%	11,77%	55,22%	11	55,00%	81,08%	45,40%	31,22%	11,77%	RS451.205,34	RS28.164,16	
PIA ₇ - 700	RS341.378,00	RS50.1093,51	RS221.596,21	RS20.111,27	1,64912	2,53%	38,97%	13,85%	46,94%	10	50,00%	113,05%	64,91%	39,36%	13,85%	RS562.974,21	RS30.982,24	
PIA ₈ - 800	RS370.901,00	RS61.482,58	RS306.545,25	RS27.820,94	1,82649	3,06%	47,04%	15,68%	41,47%	8	40,00%	141,16%	82,65%	45,25%	15,68%	RS677.446,25	RS33.661,64	
PIA ₉ - 900	RS399.154,00	RS72.075,56	RS395.011,08	RS35.849,78	1,98962	3,50%	53,84%	#NÚM!	#NÚM!	8	40,00%	#NÚM!	98,96%	49,74%	#NÚM!	RS794.165,08	RS36.225,78	
PIA ₁₀ - 1000	RS426.316,00	RS82.843,71	RS486.498,02	RS44.152,81	2,14117	3,88%	59,69%	#NÚM!	#NÚM!	7	35,00%	#NÚM!	114,12%	53,30%	#NÚM!	RS912.814,02	RS38.690,90	
PIA ₁₁ - 100	RS92.717,00	RS242,72	-R\$90.042,59	-R\$8.171,94	0,02884	-16,25%	-249,94%	-19,43%	-33,46%	#NÚM!	#NÚM!	-398,89%	-97,12%	-3366,62%	-19,43%	RS2.674,41	RS8.414,66	
PIA ₁₂ - 200	RS137.451,00	RS8.189,53	-R\$47.214,60	-R\$4.285,03	0,65660	-2,08%	-32,03%	1,73%	375,48%	#NÚM!	#NÚM!	-73,37%	-34,35%	-52,32%	1,73%	RS90.236,40	RS12.474,56	
PIA ₁₃ - 300	RS174.528,00	RS17.365,74	RS16.816,53	RS1.526,21	1,09635	0,46%	7,09%	7,69%	84,54%	17	85,00%	18,28%	9,64%	8,79%	7,69%	RS191.344,53	RS15.839,53	
PIA ₁₄ - 400	RS207.391,00	RS27.218,55	RS92.516,79	RS8.396,49	1,44610	1,86%	28,64%	11,68%	55,63%	11	55,00%	79,77%	44,61%	30,89%	11,68%	RS299.907,79	RS18.822,06	
PIA ₁₅ - 500	RS207.391,00	RS37.522,21	RS175.992,74	RS15.972,47	1,74119	2,81%	43,26%	14,80%	43,91%	9	45,00%	127,74%	74,12%	42,57%	14,80%	RS413.438,74	RS21.549,74	
PIA ₁₆ - 600	RS265.444,00	RS48.156,13	RS265.164,67	RS24.065,39	1,98995	3,52%	54,21%	#NÚM!	#NÚM!	8	40,00%	#NÚM!	99,89%	49,97%	#NÚM!	RS530.608,67	RS24.086,74	
PIA ₁₇ - 700	RS291.842,00	RS59.046,95	RS358.767,25	RS32.560,42	2,22932	4,09%	62,92%	#NÚM!	#NÚM!	7	35,00%	#NÚM!	122,93%	55,14%	#NÚM!	RS650.609,25	RS26.486,53	
PIA ₁₈ - 800	RS316.944,00	RS70.145,85	RS455.958,56	RS41.381,16	2,43861	4,56%	70,12%	#NÚM!	#NÚM!	6	30,00%	#NÚM!	143,86%	58,99%	#NÚM!	RS772.902,56	RS28.764,59	
PIA ₁₉ - 900	RS340.967,00	RS81.418,00	RS556.137,82	RS50.473,06	2,63106	4,96%	76,24%	#NÚM!	#NÚM!	6	30,00%	#NÚM!	163,11%	61,99%	#NÚM!	RS897.104,82	RS30.944,94	
PIA ₂₀ - 1000	RS364.071,00	RS92.837,70	RS658.861,87	RS59.795,93	2,80971	5,30%	81,66%	#NÚM!	#NÚM!	5	25,00%	#NÚM!	180,97%	64,41%	#NÚM!	RS1.022.932,87	RS33.041,77	
PIA ₂₁ - 100	RS92.150,00	RS333,76	-R\$88.472,46	-R\$8.029,44	0,03991	-14,88%	-228,86%	-17,77%	-36,58%	#NÚM!	#NÚM!	-373,41%	-96,01%	-2405,75%	-17,77%	RS3.677,54	RS8.363,20	
PIA ₂₂ - 200	RS136.569,00	RS8.331,15	-R\$44.772,16	-R\$4.063,36	0,67216	-1,97%	-30,26%	1,97%	329,28%	#NÚM!	#NÚM!	-69,63%	-32,78%	-48,77%	1,97%	RS91.796,84	RS12.394,51	
PIA ₂₃ - 300	RS173.386,00	RS17.549,10	RS19.978,89	RS1.813,21	1,11523	0,55%	8,41%	7,92%	82,12%	17	85,00%	21,78%	11,52%	10,33%	7,92%	RS193.364,89	RS15.735,89	
PIA ₂₄ - 400	RS206.018,00	RS27.439,00	RS96.318,82	RS8.741,55	1,46753	1,94%	29,79%	11,92%	54,54%	11	55,00%	83,35%	46,75%	31,86%	11,92%	RS302.336,82	RS18.697,45	
PIA ₂₅ - 500	RS216.435,00	RS40.895,71	RS234.174,68	RS21.252,85	2,08196	3,73%	57,46%	#NÚM!	#NÚM!	7	35,00%	#NÚM!	108,20%	51,97%	#NÚM!	RS460.609,68	RS19.642,86	
PIA ₂₆ - 600	RS245.904,00	RS51.293,45	RS319.273,25	RS28.976,09	2,29837	4,25%	65,37%	#NÚM!	#NÚM!	6	30,00%	#NÚM!	129,84%	56,49%	#NÚM!	RS565.177,25	RS22.317,36	
PIA ₂₇ - 700	RS273.442,00	RS62.001,23	RS409.719,00	RS37.184,62	2,49838	4,68%	72,07%	#NÚM!	#NÚM!	6	30,00%	#NÚM!	149,84%	59,97%	#NÚM!	RS683.161,00	RS24.816,61	
PIA ₂₈ - 800	RS299.468,00	RS72.951,78	RS504.351,72	RS45.773,14	2,68416	5,06%	77,86%	#NÚM!	#NÚM!	5	25,00%	#NÚM!	168,42%	62,74%	#NÚM!	RS803.819,72	RS27.178,64	
PIA ₂₉ - 900	RS324.256,00	RS84.101,10	RS602.412,58	RS54.672,79	2,85783	5,39%	82,93%	#NÚM!	#NÚM!	5	25,00%	#NÚM!	185,78%	65,01%	#NÚM!	RS926.668,58	RS29.428,31	
PIA ₃₀ - 1000	RS348.013,00	RS95.415,95	RS703.328,34	RS63.831,54	3,02098	5,68%	87,44%	#NÚM!	#NÚM!	5	25,00%	#NÚM!	202,10%	66,90%	#NÚM!	RS1.051.341,34	RS31.584,41	



Fonte: Elaborada pela autora no MS-Excel®.