Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Câmpus Goiânia
Mestrado Profissional em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade

Heloene Fernandes Siqueira

SuinoPower: Ferramenta Computacional para Análise Técnica e Econômica da Geração de Energia Elétrica com Sistema Híbrido Solar-Biogás em Suinoculturas

Goiânia, 2024.

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

[ ] Tese
[X] Dissertação
[ ] Monografia – Especialização
[ ] TCC - Graduação
[ ] Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____
[ ] Artigo Científico
[ ] Capítulo de Livro
[ ] Livro
[ ] Trabalho Apresentado em Evento

Nome Completo do Autor: Heloene Fernandes Siqueira
Matrícula: 20222011280045
Título do Trabalho: SuinoPower: Ferramenta Computacional para Análise Técnica e Econômica da Geração de Energia Elétrica com Sistema Híbrido Solar-Biogás em Suinoculturas

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ( ) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ___/___/_____ (Embargo);
3. ( ) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

( ) O documento está sujeito a registro de patente.
( ) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
( ) Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

gov.br Documento assinado digitalmente
HELOENE FERNANDES SIQUEIRA
Data: 13/01/2025 14:44:52-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Goiânia, 13/01/2025.

_____
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Câmpus Goiânia
Mestrado Profissional em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade

Heloene Fernandes Siqueira

SuinoPower: Ferramenta Computacional para Análise Técnica e Econômica da Geração de Energia Elétrica com Sistema Híbrido Solar-Biogás em Suinoculturas

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto

Coorientadora: Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos

Goiânia, 2024.

S618s Siqueira, Heloene Fernandes.
SuinoPower: ferramenta computacional para análise técnica e econômica da geração de energia elétrica com sistema híbrido Solar-Biogás em suinoculturas / Heloene Fernandes Siqueira – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2024.
83 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto.
Coorientadora: Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Energia elétrica – ferramenta computacional. 2. Biogás. 3. Suinocultura. 4. Sistema fotovoltaico. I. Pinheiro Neto, Daywes (orientador). II. Santos, Lidiaine Maria dos (coorientadora). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. IV. Título.

CDD 621.31

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 26/2024 - GYN-CMTGS/GYN-GPPEX/CP-GOIANIA/IFG

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE

HELOENE FERNANDES SIQUEIRA

SUINOPOWER: FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-BIOGÁS EM SUINOCULTURAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa.
Linha de Pesquisa: Energias Renováveis

Aprovada em: 16/12/2024

Banca examinadora:
Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto - Orientador e Presidente - IFG – Câmpus Goiânia
Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos - Coorientadora - IFG - Câmpus Goiânia
Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior - Avaliador – UFG
Prof. Dr. Raphael de Aquino Gomes - Avaliador - IFG – Campus Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:
- **Raphael de Aquino Gomes**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2024 14:43:55.
- **FERNANDO NUNES BELCHIOR**, **FERNANDO NUNES BELCHIOR - Docente - Ufg (01567601000143)**, em 18/12/2024 13:22:46.
- **Lidiaine Maria dos Santos**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2024 13:08:37.
- **Daywes Pinheiro Neto**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2024 12:43:26.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/12/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 600516
Código de Autenticação: 3a08765f30

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e energia que me conduziram até alcançar meu título de mestre. Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Daywes, pela orientação extremamente dedicada, por suas incansáveis horas de orientação e seu comprometimento. A disponibilidade do professor orientador para me atender, mesmo que fosse necessário estender as reuniões até horas da madrugada adentro, realmente fizeram toda a diferença na fase mais importante da finalização do mestrado.

Além da paciência e incentivo ao longo de todo o percurso, sempre demonstrando confiança e acreditando que o projeto seria exitoso, foram fundamentais para a realização deste trabalho.Destaco ainda a sua dedicação em realizar orientações diariamente, com o propósito de me ensinar a programar e compreender, de forma detalhada, o passo a passo de como funciona a criação de uma ferramenta computacional.

Sou grata à minha coorientadora, Profa. Lidiaine, bem como aos membros da banca, Prof. Fernando e Prof. Raphael, pelas valiosas sugestões que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

Aos meus familiares, minha mãe, meu pai, Heloá, Heloisa, Sofia, Samuel e minha avó Antônia, minha eterna gratidão pelo amor, apoio incondicional e compreensão durante todos os desafios enfrentados. Ser a primeira pessoa da minha família a alcançar o título de mestre é uma conquista que compartilho com cada um de vocês, obrigada pelo suporte e os ensinamentos transmitidos ao longo da vida.

Aos amigos, Laercio, Camilla, Thais, Leonardo, Kayque e Pricila, que, de diversas formas, contribuíram para meu crescimento acadêmico e pessoal, deixo meu sincero agradecimento. Cada palavra de incentivo e gesto de apoio foram essenciais para que eu seguisse em frente. Assim, quero agradecer a todos que contribuíram para que esse tão sonhado título fosse conquistado.

Muito obrigada!

Resumo

Título: SuinoPower: Ferramenta Computacional para Análise Técnica e Econômica da Geração de Energia Elétrica com Sistema Híbrido Solar-Biogás em Suinoculturas
Autor: Heloene Fernandes Siqueira
Orientador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto
Coorientadora: Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos

A demanda por energias renováveis e a redução da dependência de fontes fósseis têm impulsionado soluções sustentáveis na agropecuária, embora muitos produtores rurais ainda desconheçam os benefícios econômicos de sistemas híbridos, como o fotovoltaico e o biogás. Este trabalho apresenta o desenvolvimento da ferramenta SuinoPower, uma aplicação *web* interativa que simula a viabilidade técnica e econômica de investimentos em sistemas híbridos fotovoltaico-biogás em suinoculturas, considerando o Sistema de Compensação de Energia Elétrica e as tarifações Convencional e Branca do Grupo B2 - Rural. A ferramenta permite comparar os custos de implementação, operação e manutenção do sistema híbrido, além de estimar a economia gerada com a geração própria de energia e os potenciais benefícios financeiros de cada tarifa. Desenvolvida com linguagem de programação de código aberto, a aplicação oferece uma interface intuitiva que possibilita a simulação de diferentes cenários, apresentando indicadores econômicos como Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno Modificada e *Payback* Descontado, e fornecendo a interpretação dos resultados. A funcionalidade de análise de sensibilidade permite avaliar o impacto de variações nos principais parâmetros do projeto, como a potência e o custo de implantação dos sistemas fotovoltaico e biogás, e a Taxa Mínima de Atratividade. Os estudos de caso demonstram a aplicabilidade da ferramenta, evidenciando a viabilidade econômica dos sistemas híbridos, especialmente com a tarifa Branca, que se mostrou mais vantajosa. Portanto, SuinoPower se apresenta como uma ferramenta importante para promover a adoção de tecnologias sustentáveis na suinocultura, oferecendo uma análise prática e acessível para os produtores rurais.

Palavras–chave

Biogás, Suinocultura, Energia fotovoltaica, Ferramenta computacional, Análise econômica

Abstract

Title: SuinoPower: Computational Tool for Technical and Economic Analysis of Electric Power Generation with a Solar-Biogas Hybrid System in Swine Farming
Author: Heloene Fernandes Siqueira
Advisor: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto
Coadvisor: Prof. Dr. Lidiaine Maria dos Santos

The growing demand for renewable energy and the need to reduce dependence on fossil sources have driven the search for sustainable solutions in agriculture. However, many farmers are still unaware of the economic benefits of adopting hybrid energy generation systems, such as photovoltaic and biogas. This work presents the development of the SuinoPower tool, an interactive web application that simulates the technical and economic feasibility of investments in hybrid photovoltaic-biogas systems for pig farming, considering the Brazilian Net Metering System and the Conventional and White tariffs of Group B2 - Rural. The tool allows for comparing the implementation, operation, and maintenance costs of the hybrid system, in addition to estimating the savings generated by self-generated energy and the potential financial benefits of each tariff. Developed with open-source programming languages, the application provides an intuitive interface that enables the simulation of different scenarios, presenting economic indicators such as Net Present Value, Modified Internal Rate of Return, and Discounted Payback, along with interpreting the results. The sensitivity analysis feature in SuinoPower allows for assessing the impact of variations in key project parameters, such as the power and installation cost of the photovoltaic and biogas systems, and the Minimum Attractive Rate of Return. Case study results demonstrate the tool's applicability, highlighting the economic viability of hybrid systems, especially with the White tariff, which proved to be more advantageous in terms of financial return. Therefore, SuinoPower emerges as an important tool to promote the adoption of sustainable technologies in pig farming, offering a practical and accessible analysis for farmers.

Keywords

Biogas, Pig Farming, Photovoltaic Energy, Computational Tool, Economic Analysis

Lista de Figuras

Figura 1 – Número de plantas de biogás e capacidade instalada. 24
Figura 2 – Sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás de suinocultura conectado à rede (SBCR). 25
Figura 3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR). 26
Figura 4 – Modalidades de participação no SCEE. 28

Figura 5 – Fluxograma da estrutura funcional do SuinoPower. 32
Figura 6 – Exemplo de dia representativo para Tarifa Convencional..... 35
Figura 7 – Exemplo de dia representativo para Tarifa Branca e Tarifa Branca Simplificada. 36
Figura 8 – Fluxo energético entre a rede da concessionária, edificação, sistema fotovoltaico e sistema de biogás de suinocultura. 38

Figura 9 – Fluxo de Processos da Aplicação SuinoPower. 48
Figura 10 – Página Home: Menu e Boas-vindas..... 49
Figura 11 – Página Home: Destaques da ferramenta e botão “Simular”.... 50
Figura 12 – Página Simular: Opções iniciais de simulação. 50
Figura 13 – Página Simular: Dados de fatura convencional. 51
Figura 14 – Página Simular: Dados de fatura branca..... 52
Figura 15 – Página Simular: Dados de fatura branca - simplificado..... 53
Figura 16 – Página Simular: Dados do sistema fotovoltaico..... 54
Figura 17 – Página Simular: Dados do sistema biogás. 55
Figura 18 – Página Simular: Financiamento. 56
Figura 19 – Página Simular: Indicadores econômicos e botão “Simular”. .. 57
Figura 20 – Página Simular: Análise de sensibilidade. 57
Figura 21 – Página de Resultados: Opções de visualização dos resultados e botão “Gerar PDF”. 58
Figura 22 – Página Sobre. 59
Figura 23 – Página Contato. 60

Figura 24 – Análise de sensibilidade da potência do SFCR: Tarifa Convencional. 76
Figura 25 – Análise de sensibilidade da potência do SFCR: Tarifa Branca. 76
Figura 26 – Análise de sensibilidade do custo do SFCR: Tarifa Convencional. 77
Figura 27 – Análise de sensibilidade do custo do SFCR: Tarifa Branca.... 78
Figura 28 – Análise de sensibilidade da potência do SBCR: Tarifa Convencional. 78
Figura 29 – Análise de sensibilidade da potência do SBCR: Tarifa Branca. 79

Figura 30 – Análise de sensibilidade do custo do SBCR: Tarifa Convencional. 80
Figura 31 – Análise de sensibilidade do custo do SBCR: Tarifa Branca. .. 80
Figura 32 – Análise de sensibilidade da TMA: Tarifa Convencional..... 81
Figura 33 – Análise de sensibilidade da TMA: Tarifa Branca..... 81

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de entrada fornecidos pelo usuário. 33
Tabela 2 – Estrutura do Fluxo de Caixa. 43
Tabela 3 – Estrutura de arquivos e pastas do projeto SuinoPower. 47
Tabela 4 – Dados de fatura de energia: Tarifa Convencional B2 - Rural. 62
Tabela 5 – Dados de fatura de energia: Tarifa Branca B2 - Rural. 63
Tabela 6 – Dados do Sistema Fotovoltaico. 64
Tabela 7 – Dados do Sistema Biogás. 65
Tabela 8 – Dados de Financiamento para os Sistemas de Biogás e Fotovoltaico. 65
Tabela 9 – Dados para os indicadores econômicos. 66
Tabela 10 – Resultados de Financiamento do Sistema Biogás. 66
Tabela 11 – Resultados de Financiamento do Sistema Fotovoltaico. 66
Tabela 12 – Fluxo de Energia: Tarifa Convencional. 67
Tabela 13 – Fluxo de Energia: Tarifa Branca. 67
Tabela 14 – Resultado do fluxo de caixa: Tarifa Convencional (Parte 1/2). 70
Tabela 15 – Resultado do fluxo de caixa: Tarifa Convencional (Parte 2/2). 71
Tabela 16 – Resultado do fluxo de caixa: Tarifa Branca (Parte 1/2). 72
Tabela 17 – Resultado do fluxo de caixa: Tarifa Branca (Parte 2/2). 73
Tabela 18 – Indicadores econômicos do Caso Base: Tarifa Convencional. . 74
Tabela 19 – Indicadores econômicos do Caso Base: Tarifa Branca. 74

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CD	custo de disponibilidade
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LCOE	*Levelized Cost of Electricity*
MME	Ministério de Minas e Energia
MVC	*Model-View-Controller*
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
SAC	Sistema de Amortização Constante
SBCR	Sistema Biogás Conectado à Rede
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
TE	tarifas de energia
TIR	Taxa Interna de Retorno
TIRM	Taxa Interna de Retorno Modificada
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UASB	*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*
VPL	Valor Presente Líquido

Lista de Símbolos

I	investimento inicial (R$)
FC_i	fluxo de caixa no período i (R$)
n	vida útil do projeto (anos)
TMA	taxa mínima de atratividade - taxa de desconto (%)
PD	*Payback* Descontado (meses ou anos)
FCP_i	fluxo de caixa positivo no período i (R$)
T_r	taxa de reinvestimento (%)
FCN_i	fluxo de caixa negativo no período i (R$)
T_f	taxa de financiamento (%)
E_{SFCR}	energia média mensal gerada pelo SFCR (kWh)
P_{SF}	potência nominal do SFCR (kW)
I_{painel}	irradiação solar diária média recebida no plano dos painéis fotovoltaicos (kWh/m^2/dia)
I_{ref}	irradiação solar de referência (1 kW/m^2)
PR	*Performance Ratio*
δ_{SF}	fator de degradação diária do SFCR
$Q_{dejetos}$	quantidade total de dejetos suínos (kg/dia)
$N_{animais_i}$	número de animais na categoria i (leitões, porcas, reprodutores)
$P_{dejetos_i}$	produção média de dejetos por animal na categoria i (kg/dia/animal)
n	número de categorias animais
V_{biogas}	volume total de biogás produzido (m^3/dia)
P_{biogas}	produção de biogás por kg de dejetos (m^3/kg)
E_{pot}	potencial máximo de energia com base na quantidade total de biogás (kWh)
$V_{\text{biogás}}$	volume diário de biogás produzido (m^3/dia)
$PCI_{\text{biogás}}$	poder calorífico inferior do biogás (kWh/m^3)
η_{GMG}	eficiência global do grupo motor-gerador (%)
E_{SBCR_j}	energia gerada no mês j (kWh)
P_{GMG}	potência nominal do grupo motor-gerador (kW)
t_{oper}	tempo de operação diário do GMG (h/dia)
η_{gerador}	eficiência do gerador (%)
δ_{SB}	fator de degradação mensal do sistema biogás
E_{SBCR}	energia efetiva gerada pelo SBCR (kWh)
$E^{i \to i}_{COMP_m}$	energia gerada no posto tarifário i e compensada no posto tarifário i no mês m (kWh)

$E^{i}_{INJ-REDE_m}$	energia injetada na rede no posto tarifário i no mês m (kWh)
$E^{i \to j}_{COMP_m}$	energia gerada no posto tarifário i no mês m e compensada no posto tarifário j no mês m (kWh)
$FA^{i \to j}$	fator de ajuste da energia gerada no posto tarifário i e compensada no posto tarifário j (%)
TE^{i}	tarifa de energia no posto tarifário i (R$/kWh)
TE^{j}	tarifa de energia no posto tarifário j (R$/kWh)
$E^{i}_{crédito_m}$	crédito acumulado no posto tarifário i no mês m (kWh)
I	investimento inicial (R$)
FC_i	fluxo de caixa no período i (R$)
n	vida útil do projeto, em meses ou anos
FCP_i	fluxo de caixa positivo no período i (R$)
T_r	taxa mensal de reinvestimento para TIRM (%)
FCN_i	fluxo de caixa negativo no período i (R$)
T_f	taxa mensal de financiamento para TIRM (%)

Sumário

1 Introdução ... 16
1.1 Contextualização ... 16
1.2 Trabalhos correlatos ... 17
1.3 Justificativa ... 19
1.4 Objetivo geral ... 20
1.5 Objetivos Específicos ... 20
1.6 Contribuições ... 21
1.7 Estrutura da dissertação ... 21

2 Referencial Teórico ... 23
2.1 Sistema de geração de energia com biogás de suinocultura ... 23
2.2 Sistemas fotovoltaicos ... 26
2.3 Sistema de Compensação de Energia Elétrica ... 27
2.4 Análise de viabilidade econômica ... 29
2.4.1 Valor Presente Líquido ... 30
2.4.2 Taxa Interna de Retorno ... 30
2.4.3 Taxa Interna de Retorno Modificada ... 30
2.4.4 *Payback* Descontado ... 31
2.4.5 Análise de Sensibilidade ... 31

3 Metodologia ... 32
3.1 Dados de entrada ... 32
3.2 Consumo de Energia da Edificação ... 34
3.3 Geração do sistema fototovoltaico ... 36
3.4 Geração do sistema biogás de suinocultura ... 37
3.5 Fluxo energético ... 38
3.6 Sistema de Compensação de Energia Elétrica ... 39
3.7 Faturamento ... 41
3.8 Financiamento ... 42
3.9 Fluxo de caixa e indicadores econômicos ... 43
3.10 Análise de sensibilidade ... 44

4 Ferramenta Desenvolvida ... 45
4.1 Desenvolvimento ... 45
4.1.1 Arquitetura do Código ... 45
4.1.2 Estrutura de Pastas e Arquivos ... 46
4.1.3 Fluxo de Processos ... 47
4.2 Interface do usuário ... 48

4.2.1 Página Home 48
4.2.2 Página Simular 49
4.2.3 Página de Resultados 57
4.2.4 Página Sobre 58
4.2.5 Página Contato 59

5 Estudo de Caso 61
5.1 Caso Base 61
5.2 Análise de sensibilidade 75
5.2.1 Potência do Sistema Fotovoltaico 75
5.2.2 Custo do Sistema Fotovoltaico 77
5.2.3 Potência do Sistema Biogás 77
5.2.4 Custo do Sistema Biogás 79
5.2.5 Taxa Mínima de Atratividade 80

6 Conclusão 82
6.1 Limitações e melhorias futuras 83

Referências 84

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Contextualização

A crescente demanda por soluções sustentáveis e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm levado a um aumento significativo na inovação no setor de energia. A utilização de sistemas de geração de energia renovável, como a energia fotovoltaica e o biogás, surge como uma solução promissora para enfrentar os desafios ambientais associados ao setor agroindustrial. Em particular, a integração de tecnologias de geração híbrida fotovoltaico-biogás em suinoculturas representa uma oportunidade para contribuir com a transição para uma matriz energética mais limpa e eficiente (Machado *et al.*, 2024).

Embora a energia solar fotovoltaica constitua a principal fonte de Geração Distribuída (GD) no Brasil, representando 19,4% da capacidade instalada (ABSOLAR, 2024), os sistemas baseados em biogás têm ganhado atenção devido ao imenso potencial agrícola do país. No que diz respeito ao uso de biogás em pequena escala, uma das principais fontes de produção de biogás no Brasil provém de granjas de suínos, que possuem um potencial energético de 3759,32 GWh/ano, o que corresponde a aproximadamente 28% de toda a geração de eletricidade a partir de pecuária no Brasil (Bernardes *et al.*, 2022).

A disposição inadequada de resíduos é um problema global com impactos socioambientais significativos. Resíduos orgânicos, como os gerados por suinoculturas, representam uma fonte significativa de biomassa que pode ser utilizada de forma sustentável. A biomassa pode ser convertida em biogás por meio de biodigestores, uma tecnologia que não só trata resíduos orgânicos, mas também produz biogás e biofertilizantes. Estes subprodutos têm o potencial de agregar valor às operações agrícolas e contribuir para a sustentabilidade (Ferreira *et al.*, 2018; Araujo; Oliveira, 2023). Quando combinado com sistemas de geração fotovoltaica, o biogás pode complementar a produção de energia, melhorando a eficiência e reduzindo a dependência de fontes não renováveis (Alvaro *et al.*, 2023).

Para adotar eficientemente sistemas híbridos fotovoltaico-biogás, é essencial fornecer aos proprietários de suinoculturas ferramentas de análise técnica e econômica que avaliem a viabilidade desses projetos. Essas ferramentas devem permitir uma avaliação detalhada dos custos, benefícios e desafios associados à combinação de energia fotovoltaico e biogás. A ausência de tais ferramentas pode restringir a capacidade dos produtores de tomar decisões informadas e de implementar projetos com sucesso. Portanto, desenvolver e disponibilizar ferramentas específicas para a análise de viabilidade técnica e econômica é fundamental para facilitar a adoção de sistemas híbridos, promovendo uma gestão eficiente e uma transição para práticas energéticas mais sustentáveis no setor agroindustrial.

1.2 Trabalhos correlatos

Para contextualizar a importância e os desafios da integração de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás no setor agroindustrial, é fundamental revisar estudos que abordam aspectos técnicos e econômicos relacionados a essas tecnologias. Os trabalhos a seguir fornecem uma base sólida sobre a viabilidade e os benefícios de sistemas de geração de energia renovável, com foco específico em suinoculturas e a combinação de energia fotovoltaica com biogás.

Ferreira *et al.* (2018) apresentam uma revisão detalhada do potencial energético da biomassa residual para geração distribuída no Brasil. O estudo mapeia o potencial de diferentes tipos de resíduos gerados nos setores agrícola, florestal, pecuário, industrial e urbano, com ênfase na produção de biogás e sua utilização para geração de eletricidade. A pesquisa, baseada em levantamento bibliográfico e dados do Parque Tecnológico ITAIPU e SENAI/PR, destaca um cenário favorável para a viabilidade técnica do uso da biomassa para geração de biogás. A geração distribuída de eletricidade a partir da biomassa pode contribuir para a preservação ambiental, diversificação da matriz energética e desenvolvimento econômico, além de ampliar o acesso à energia em comunidades isoladas.

Lima *et al.* (2020) descrevem a modelagem de sistemas de tratamento anaeróbio utilizando reatores de manta de lodo anaeróbio - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), com foco na utilização energética do biogás. O estudo avalia diferentes Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) para efluentes de abatedouros bovinos, suínos e de aves. Quatro cenários foram analisados, combinando valores máximos e mínimos para a instalação do sistema de tratamento e do gerador. Os resultados mostram que a geração de energia é viável para todas as classes de abatedouros bovinos, suínos e de aves quando se utiliza o menor valor unitário para o sistema de tratamento e o gerador, com ganhos significativos para os abatedouros

bovinos, suínos e de aves. No entanto, alguns cenários mostraram inviabilidade econômica, especialmente para tempos de retenção mais longos, devido ao tamanho e custos do sistema.

Bernardes *et al.* (2022) avaliam a eficiência de esquemas de políticas para atrair investimentos em energia renovável, focando em biogás de suinoculturas. O estudo examina os impactos da medição líquida, incentivos fiscais e empréstimos subsidiados na rentabilidade e risco da geração distribuída de eletricidade a partir do biogás de suinoculturas em três locais diferentes no Brasil. Utilizando simulações de Monte Carlo, o estudo demonstra que altos incentivos fiscais e tarifas de energia favorecem maiores retornos e menores riscos. O estudo destaca a importância da combinação de incentivos e subsídios para melhorar a viabilidade econômica dos investimentos.

Oliveira *et al.* (2022) investigam a viabilidade econômica da combinação de tecnologias de biogás e energia solar fotovoltaica em suinoculturas brasileiras de diferentes tamanhos. O estudo considera diferentes tamanhos de propriedades e avalia o custo de investimento, tempo de retorno e lucro associado à geração de energia a partir de biogás e energia fotovoltaico. Os resultados mostram que a geração de eletricidade por biogás é economicamente viável para propriedades de médio e grande porte, enquanto a energia fotovoltaico é viável para todos os tamanhos de propriedades. O estudo sugere que o excedente de energia pode ser injetado na rede de distribuição, gerando créditos para os produtores, conforme a legislação brasileira.

Pinto *et al.* (2023) avaliam a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela co-digestão de esterco bovino e suíno em biodigestores anaeróbios. O estudo utiliza dados teóricos sobre a produção de metano, destacando que a melhor proporção de substrato é de 4 partes de esterco bovino para 1 parte de esterco suíno. A análise técnica e econômica, realizada por meio de ferramentas como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Custo Nivelado de Energia - *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), indica que projetos de plantas de biogás são viáveis com quantidades mínimas de 1410 cabeças de gado e 2350 suínos, oferecendo um potencial energético significativo e contribuindo para a microgeração distribuída.

Araujo e Oliveira (2023) analisam o potencial econômico, ambiental e energético dos resíduos de biomassa suína, considerando seu impacto na matriz energética brasileira e em unidades de criação. O estudo utiliza uma metodologia baseada na análise de viabilidade financeira de unidades de criação de 100 a 500 suínos, com foco na venda de eletricidade e biofertilizantes. Os resultados mostram viabilidade econômica para todas as faixas de tamanho de suínos, especialmente

quando se considera a venda de fertilizantes e eletricidade a preços baixos. A pesquisa também sugere a necessidade de reformas nas políticas de incentivos no Brasil, incluindo a implementação de tarifas de alimentação e a padronização do biometano.

Alvaro *et al.* (2023) propõem um sistema de produção de biogás e biometano com painéis solares híbridos para áreas isoladas com abundância de substratos biodegradáveis. O estudo demonstra que os painéis solares híbridos podem fornecer energia elétrica e térmica suficientes para o digestor e o sistema de aprimoramento de biometano, reduzindo a dependência da rede elétrica e aumentando a autossuficiência energética das atividades agrícolas. A simulação em cinco regiões climáticas com intensa atividade suinícola revela que a tecnologia proposta é competitiva em comparação com outras soluções no setor energético.

Machado *et al.* (2024) realizam uma análise da viabilidade energética e econômica de um sistema híbrido fotovoltaico e biogás para a recuperação de energia de resíduos de mandioca no Estado do Pará, Brasil. O estudo considera dois casos: um sistema híbrido sem e com cogeração de calor e venda de energia excedente. Os resultados indicam que o sistema com cogeração e venda de energia excedente apresenta maior viabilidade técnico-econômica, com um custo de energia nivelado mais baixo e um retorno interno sobre o investimento superior. A análise demonstra que o sistema híbrido oferece uma solução eficiente para a geração de bioenergia a partir de resíduos.

Castro *et al.* (2024) avaliam as externalidades associadas à geração de biogás e energia fotovoltaica no Brasil. O estudo mostra que o valor econômico das externalidades do biogás pode superar em mais de 11 vezes o valor das externalidades dos sistemas fotovoltaicos para o produtor rural e em 1,7 vezes para a sociedade. O estudo conclui que, devido ao maior valor econômico das externalidades do biogás, as políticas públicas brasileiras para planejamento energético deveriam priorizar o biogás em relação aos sistemas de energia fotovoltaica.

1.3 Justificativa

No Brasil, a produção de suínos alcançou um recorde histórico em 2023, totalizando 5,16 milhões de toneladas e posicionando o país como o quarto maior produtor mundial (ABCS, 2023; ABCS, 2024). Nesse contexto, o uso do biogás proveniente de dejetos da suinocultura, combinado com sistemas fotovoltaicos, oferece grande potencial para aumentar a eficiência energética e impulsionar a sustentabilidade no setor agropecuário.

Apesar do crescimento do uso de energias renováveis no país, ainda existem lacunas no que diz respeito a ferramentas que ofereçam uma análise detalhada

da viabilidade técnica e econômica de sistemas híbridos aplicados a suinoculturas. Uma revisão do estado da arte e consulta ao banco de patentes e *softwares* do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) evidenciam a ausência de soluções computacionais adaptadas às particularidades do contexto brasileiro, como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e as tarifações Convencional e Branca do Grupo B2 - Rural.

Diante dessa lacuna, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que permita avaliar a viabilidade técnica e econômica de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás é essencial. Tal ferramenta poderá auxiliar proprietários de suinoculturas e investidores a tomarem decisões embasadas, promovendo o aproveitamento de recursos renováveis e a ampliação da geração descentralizada.

Além disso, a ferramenta proposta alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao incentivar soluções tecnológicas que promovem a eficiência energética, a sustentabilidade e a transição para uma matriz energética mais limpa e diversificada.

1.4 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para análise técnica e econômica da geração de energia elétrica por meio de sistema híbrido fotovoltaico-biogás em suinoculturas, considerando as especificidades do SCEE e as tarifações Convencional e Branca do Grupo B2 - Rural.

1.5 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma modelagem matemática para dimensionar o sistema híbrido fotovoltaico-biogás em suinoculturas, considerando o fluxo energético entre as fontes de geração e a demanda, com base nas regras do SCEE e nas tarifações Convencional e Branca do Grupo B2 - Rural.
- Estabelecer uma metodologia de análise econômica para avaliação da viabilidade de investimentos em sistemas híbridos fotovoltaico-biogás, contemplando as características das suinoculturas, as regras do SCEE e as tarifações aplicáveis.
- Implementar a modelagem desenvolvida em uma linguagem de programação de código aberto, criando uma ferramenta computacional que permita simular

o desempenho técnico e econômico de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás em conformidade com o SCEE e com as tarifas do Grupo B2 - Rural.

- Desenvolver uma aplicação *web* com uma interface gráfica intuitiva, que facilite a inserção de dados relacionados às características das suinoculturas e às configurações do sistema híbrido, bem como a visualização dos resultados técnicos e econômicos.
- Validar a ferramenta por meio de estudos de caso em suinoculturas, demonstrando sua aplicabilidade na análise da viabilidade técnica e econômica de projetos híbridos fotovoltaico-biogás.

1.6 Contribuições

As contribuições deste trabalho incluem:

- Proposta de uma metodologia detalhada para análise técnica e econômica de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás, considerando as especificidades das suinoculturas, as regras do SCEE e as tarifações Convencional e Branca do Grupo B2 - Rural.
- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional de código aberto, integrada a uma aplicação *web* com interface gráfica intuitiva, capaz de simular o desempenho técnico e econômico de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás, auxiliando na tomada de decisão sobre investimentos em suinoculturas.

1.7 Estrutura da dissertação

A estrutura restante desta dissertação está organizada da seguinte forma:

O **Capítulo 2** apresenta as bases teóricas necessárias para a compreensão dos modelos e análises realizadas ao longo da dissertação. São discutidos os conceitos fundamentais relacionados a sistemas híbridos fotovoltaico-biogás, o SCEE, e as especificidades das tarifações Convencional e Branca do Grupo B2 - Rural. O capítulo também aborda os métodos de análise de viabilidade econômica, incluindo o VPL, TIR, Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM), *Payback* Descontado e análise de sensibilidade.

O **Capítulo 3** descreve a metodologia desenvolvida para a análise técnica e econômica, implementada na ferramenta computacional proposta. São apresentados os critérios para definição dos dados de entrada, o dimensionamento do sistema híbrido fotovoltaico-biogás e os métodos de cálculo do fluxo energético e da geração de energia elétrica. Também são abordados os aspectos financeiros, incluindo

faturamento, financiamento, fluxo de caixa e indicadores econômicos, bem como os métodos de análise de sensibilidade aplicados.

O **Capítulo 4** detalha a ferramenta computacional desenvolvida, abordando seus aspectos técnicos e operacionais. São descritas as tecnologias utilizadas, a arquitetura da aplicação e as funcionalidades implementadas para atender aos objetivos do estudo. Também são discutidos os principais processos de interação do usuário com a ferramenta, destacando sua interface gráfica e as possibilidades de simulação.

O **Capítulo 5** apresenta estudos de caso que demonstram a aplicabilidade prática da ferramenta no contexto de suinoculturas. Os estudos incluem análises de viabilidade técnica e econômica realizadas com base nos indicadores VPL, TIR, TIRM e *Payback* Descontado. Adicionalmente, o capítulo explora a análise de sensibilidade em diferentes cenários e variáveis, ampliando a compreensão sobre os fatores que impactam a viabilidade dos sistemas híbridos fotovoltaico-biogás.

O **Capítulo 6** conclui o trabalho, destacando as principais contribuições, resultados e implicações das análises realizadas. O capítulo enfatiza a aplicabilidade e os benefícios da ferramenta desenvolvida no contexto das suinoculturas, abordando também as limitações do estudo e possíveis melhorias futuras para ampliar seu escopo e versatilidade.

CAPÍTULO 2

Referencial Teórico

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos fundamentais para a compreensão dos tópicos abordados neste estudo. Inicialmente, é fornecida uma visão geral sobre os sistemas de geração de energia a partir do biogás da suinocultura, os sistemas fotovoltaicos, o sistema de compensação de energia elétrica e os métodos de tarifação. Em seguida, o capítulo trata da avaliação da viabilidade econômica, discutindo métricas como VPL, TIR, TIRM, *Payback* Descontado e a técnica de análise de sensibilidade, para examinar os limites da viabilidade econômica dos sistemas propostos.

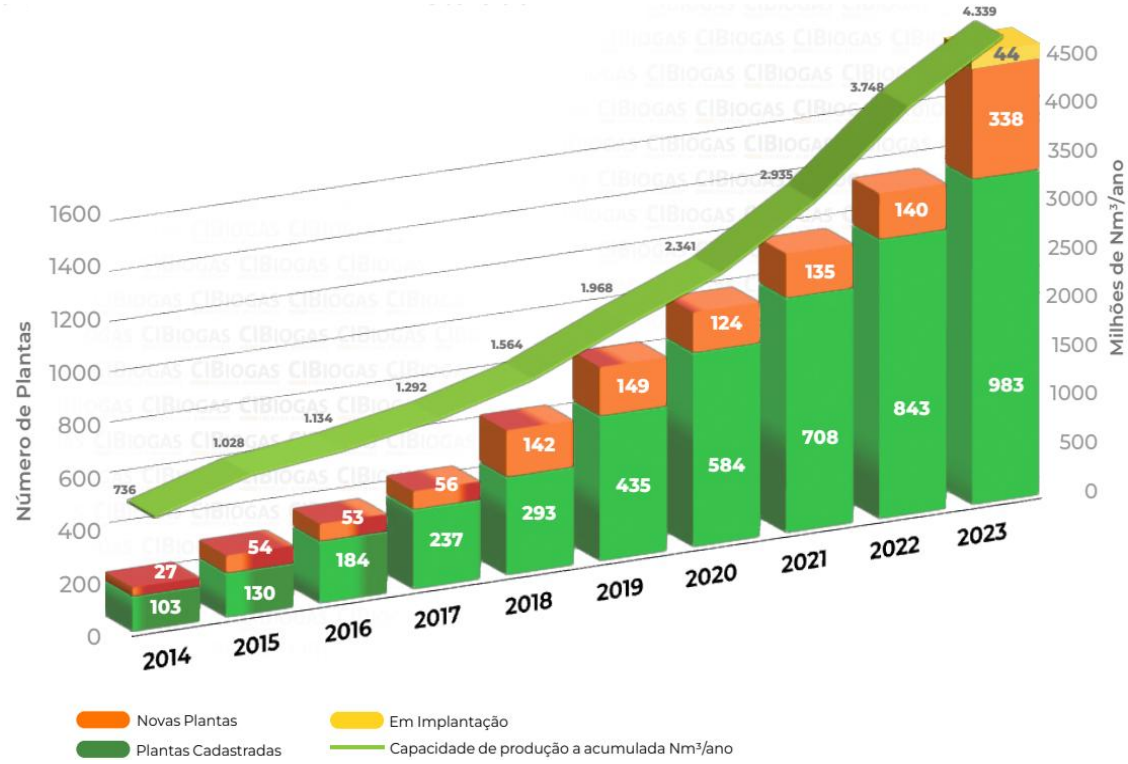
2.1 Sistema de geração de energia com biogás de suinocultura

Na última década, o comportamento do setor de biogás no Brasil teve crescimento exponencial em relação ao número de plantas e capacidade instalada, conforme Figura 1. No ano de 2014, o total de plantas cadastradas era de 103, atualmente, em 2023, esse número ampliou para 1.365. A capacidade de produção acumulada também acompanhou essa evolução, passando de 736 milhões de Nm^3/ano em 2014 para 4.339 milhões de Nm^3/ano em 2023. Para os último cinco anos, até 2023, a taxa média de crescimento anual foi de 21%, o que evidencia que há o desenvolvimento gradativo da produção de biogás no país (CIBiogas, 2024).

De acordo com o CIBiogas (2025), o estado de Goiás possui 77 plantas de produção de biogás, com uma produção anual total de 49,66 milhões de Nm^3. Desse total, 74 plantas são destinadas à geração de energia elétrica, correspondendo a uma produção de 43,17 milhões de Nm^3 por ano.

Grande parte das plantas de biogás em Goiás e em outras regiões do Brasil está relacionada a atividades agroindustriais, em especial à produção animal, destacando-se a suinocultura. Essa atividade gera resíduos orgânicos em grande volume, os quais podem ser aproveitados para a produção de biogás por meio de

Figura 1 – *Número de plantas de biogás e capacidade instalada.*



Fonte: (CIBiogas, 2024).

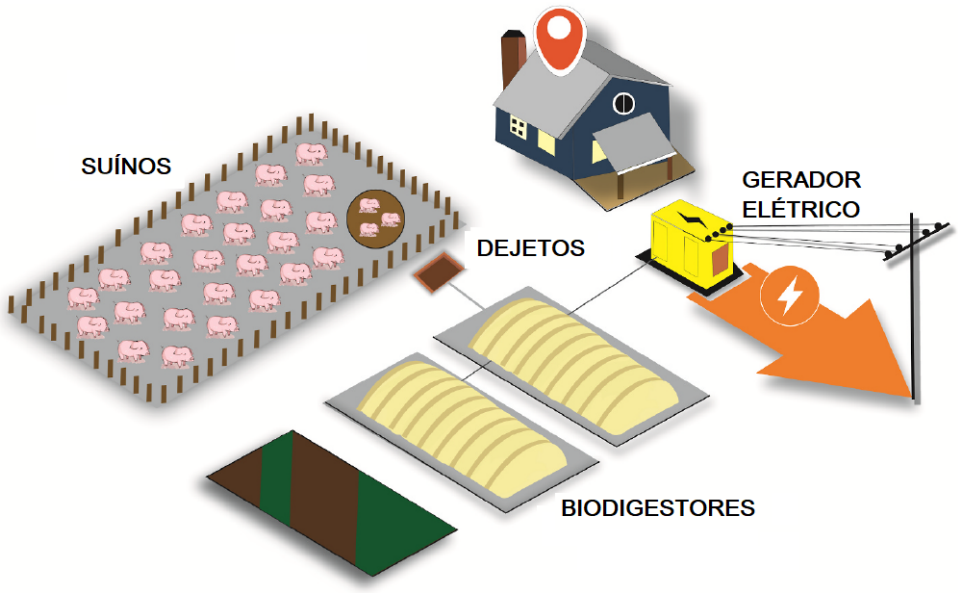
biodigestores. Assim, a integração entre a produção de biogás e a suinocultura apresenta-se como uma solução sustentável para o manejo de dejetos suínos e para a geração de energia renovável.

Neste contexto, a suinocultura brasileira atingiu um novo patamar em 2023, com produção recorde de 5,16 milhões de toneladas, consolidando o país como o quarto maior produtor mundial. Quase três quartos dessa produção são consumidos internamente, enquanto o restante impulsiona as exportações, nas quais o Brasil ocupa a quarta posição global. A região Sul concentra a maior parte das exportações, com Santa Catarina à frente. O setor gera um Valor Bruto da Produção de R$ 34,2 bilhões, demonstrando sua importância para a economia nacional (ABCS, 2023; ABCS, 2024).

Os desafios associados ao manejo de resíduos e à sustentabilidade ambiental são questões presentes no setor de suinocultura. A quantidade considerável de dejetos suínos gerados pode causar contaminação do solo e dos recursos hídricos (Ferreira *et al.*, 2018). Nesse cenário, a adoção de tecnologias para o tratamento desses resíduos é uma abordagem considerada, sendo o sistema de biogás um exemplo. Como apresentado na Figura 2, o Sistema Biogás Conectado à Rede (SBCR) transforma os dejetos em biogás, uma fonte renovável de energia, e biofertilizantes, contribuindo

para a mitigação dos impactos ambientais da suinocultura e para a promoção de uma economia circular (Ferreira *et al.*, 2018; Bernardes *et al.*, 2022).

Figura 2 – *Sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás de suinocultura conectado à rede (SBCR).*



Fonte: (Bernardes *et al.*, 2022).

Um sistema de geração de biogás na suinocultura envolve diversos componentes que operam de forma integrada para converter dejetos suínos em biogás e biofertilizantes. O sistema começa com a coleta dos dejetos, que são captados diretamente das instalações de criação por meio de canais de escoamento e transferidos para o biodigestor com o auxílio de bombas de transferência. Esses dejetos geralmente passam por um pré-tratamento que inclui separadores de sólidos-líquidos, misturadores e peneiras rotativas, com o objetivo de remover sólidos maiores e ajustar o teor de umidade da mistura, tornando-a mais adequada para o processo de digestão anaeróbica (Oliveira; Higarashi, 2006).

O núcleo do sistema é o biodigestor anaeróbico, um reator fechado onde a digestão anaeróbica ocorre. Nesse reator, a matéria orgânica presente nos dejetos é degradada por microrganismos, resultando na produção de biogás, composto principalmente de metano e dióxido de carbono. O biodigestor pode ser construído de diferentes materiais, como concreto, aço ou plástico, e varia em formato e tamanho de acordo com o projeto. Para garantir a eficiência do processo, o biodigestor é equipado com sistemas de aquecimento que mantêm a temperatura ideal para a atividade microbiana, bem como sistemas de agitação que asseguram a homogeneidade da mistura (Oliveira; Higarashi, 2006).

O biogás produzido é então armazenado em tanques com sistemas de controle de pressão e ventilação de emergência para garantir a segurança operacional.

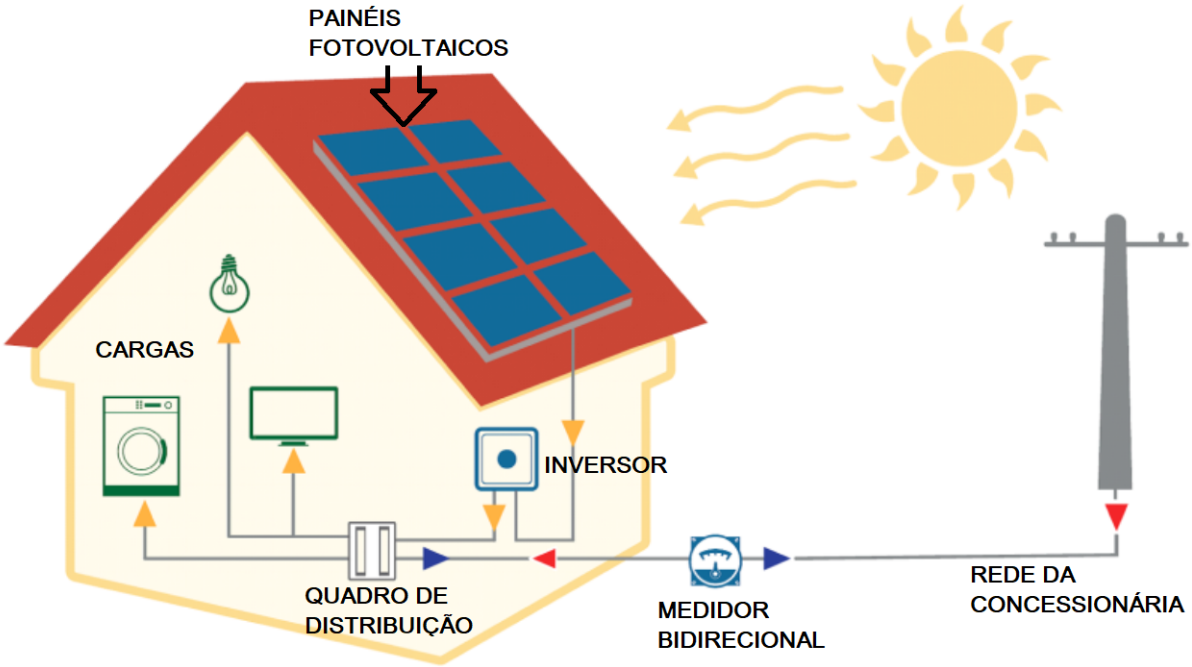
Antes de ser utilizado, o biogás passa por uma unidade de purificação que remove impurezas, como sulfeto de hidrogênio e água, melhorando sua qualidade. Esse biogás purificado pode ser utilizado em motores de combustão interna para geração de eletricidade ou em caldeiras para a produção de calor, dependendo da demanda energética da instalação (Oliveira; Higarashi, 2006).

Além da geração de energia, o sistema de biogás também produz biofertilizantes, conhecidos como digestato. O digestato é o resíduo sólido-líquido remanescente após a digestão anaeróbica e pode ser tratado para uso agrícola. Esse material é frequentemente submetido a processos adicionais, como desidratação ou compostagem, para melhorar sua aplicação como fertilizante, proporcionando uma solução sustentável para a gestão de resíduos na suinocultura (Oliveira; Higarashi, 2006).

2.2 Sistemas fotovoltaicos

Um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) é composto por três componentes principais: painéis, inversor e medidor bidirecional. Este tipo de sistema não armazena energia, de modo que, durante uma falha na rede elétrica, a edificação também ficará sem eletricidade. A Figura 3 ilustra a configuração típica de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

Figura 3 – *Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR).*



Fonte: (ABSOLAR, 2024).

Os painéis fotovoltaicos contêm células que realizam o efeito fotovoltaico, convertendo a luz solar em eletricidade de corrente contínua. Existem vários tipos

de módulos disponíveis no mercado, como os de silício monocristalino, silício policristalino e filmes finos, cada um com características e eficiências distintas (Kumar; Subathra; Moses, 2018).

Os inversores são responsáveis por converter a eletricidade de corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada, tornando-a adequada para o uso na edificação. O número de inversores necessários depende da capacidade do equipamento e do tamanho do sistema, podendo variar de um a vários inversores (Kumar; Subathra; Moses, 2018).

O quadro de distribuição organiza a distribuição de energia elétrica para diferentes circuitos em uma edificação. Inclui disjuntores para proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos, além de dispositivos de controle e proteção. Sua função é gerenciar a distribuição de energia e assegurar a proteção dos circuitos elétricos (Kumar; Subathra; Moses, 2018).

O medidor bidirecional é um equipamento utilizado em sistemas de geração distribuída, como os fotovoltaicos. Ele mede o fluxo de energia elétrica tanto da rede para o consumidor quanto do consumidor para a rede. Assim, permite a medição precisa da energia consumida e da energia injetada, possibilitando a aplicação de mecanismos de compensação energética (Kumar; Subathra; Moses, 2018).

2.3 Sistema de Compensação de Energia Elétrica

A geração distribuída de energia no Brasil, iniciada em 2012 com a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, tem experimentado uma evolução constante. Essa modalidade permite que consumidores gerem sua própria energia a partir de fontes renováveis e injetem o excedente na rede, recebendo créditos por essa energia. Desde a sua criação, o marco regulatório da geração distribuída passou por diversas atualizações, com o objetivo de aprimorar as regras e estimular o crescimento do setor. A última grande revisão ocorreu em 2023, com a publicação da Resolução Normativa ANEEL nº 1.059, que consolidou as normas e adaptou a legislação à nova Lei nº 14.300/2022.

Microgeração e minigeração distribuída são sistemas de geração de energia elétrica com características distintas. A microgeração refere-se a sistemas com potência instalada de até 75 kW, enquanto a minigeração abrange sistemas com potência superior a 75 kW e até 3 MW, podendo chegar a 5 MW em casos específicos. O Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) funciona como um "banco de energia", permitindo que a energia excedente gerada seja armazenada na rede e utilizada pelo consumidor em outro momento. Os créditos obtidos com essa energia excedente têm validade de 60 meses (ANEEL, 2024a).

Existem diferentes modalidades de participação no SCEE, conforme apresentado na Figura 4. No autoconsumo local, a energia gerada é consumida no mesmo local onde foi produzida. O autoconsumo remoto permite que a energia gerada em um local seja consumida em outro, desde que ambos pertençam ao mesmo titular. Em empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, como prédios, a energia gerada pode ser compartilhada entre os condôminos. A geração compartilhada envolve a união de vários consumidores para instalar um sistema de geração e dividir a energia produzida.

Figura 4 – *Modalidades de participação no SCEE.*

Fonte: (Ciser, 2024).

A microgeração e minigeração distribuída oferecem diversos benefícios, incluindo a redução de custos com energia elétrica, o aumento da sustentabilidade, a independência energética, além de gerar empregos e impulsionar o desenvolvimento tecnológico.

As modalidades tarifárias estão diretamente relacionadas ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), pois a tarifa escolhida influencia como a energia gerada por sistemas de micro ou minigeração distribuída será compensada. Essas tarifas são oferecidas pelas empresas distribuidoras e variam conforme o tipo de instalação elétrica (residencial, comercial, industrial) e o perfil de consumo de cada cliente.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece as regras para essas tarifas, detalhadas na Resolução Normativa nº 1.000/2021 (ANEEL, 2021) e no Módulo 7 dos Procedimentos de Regulação Tarifária - Proret (ANEEL, 2025). As tarifas são divididas em dois grupos principais: o Grupo A, que abrange unidades consumidoras de alta e média tensão, e o Grupo B, que inclui unidades de baixa tensão, como residências e comércios de pequeno porte (ANEEL, 2024b).

Os consumidores do Grupo A podem optar por duas modalidades principais: a tarifa horária azul e a tarifa horária verde. Ambas as modalidades oferecem preços diferenciados para o consumo de energia elétrica em diferentes horários do dia, incentivando o uso da energia em períodos de menor demanda. A principal diferença entre as duas modalidades está na cobrança da demanda de potência: na tarifa

horária azul, a demanda de potência também é cobrada por horários, enquanto na tarifa horária verde há uma única tarifa de demanda para todo o período (ANEEL, 2024b).

Os consumidores do Grupo B, por sua vez, podem optar pela tarifa convencional monômia ou pela tarifa horária branca. A tarifa convencional monômia é a mais simples, com um preço único por quilowatt-hora consumido, independentemente do horário. Já a tarifa horária branca oferece preços diferenciados para o consumo de energia elétrica em diferentes horários do dia, mas não possui cobrança por demanda de potência (ANEEL, 2024b).

A definição dos postos tarifários é necessária para a aplicação das modalidades tarifárias horárias. No Grupo A, os períodos tarifários são classificados em horário de ponta e fora de ponta. No Grupo B, sob a Tarifa Branca, há três períodos: ponta, intermediário e fora de ponta (ANEEL, 2024b).

Esses períodos são estabelecidos pelas distribuidoras durante as revisões tarifárias periódicas, realizadas a cada 4 ou 5 anos, conforme as orientações da Resolução Normativa nº 1.000/2021 (ANEEL, 2021) e dos Procedimentos de Regulação Tarifária – Proret (ANEEL, 2025). O horário de ponta é definido como um período diário de 3 horas consecutivas, excluindo sábados, domingos e feriados nacionais. O horário intermediário, aplicável apenas à Tarifa Branca, ocorre próximo ao horário de ponta, podendo variar de 1 a 2h antes e 1h depois. O horário fora de ponta inclui todas as horas que não estão no horário de ponta ou intermediário.

Os períodos tarifários são definidos para cada área de concessão ou permissão, com algumas exceções específicas para certas distribuidoras, conforme detalhado na Resolução que aprova a revisão tarifária. Nos dias úteis, esses períodos são aplicados conforme estabelecido, enquanto nos fins de semana e feriados nacionais, todas as horas são tratadas como fora de ponta.

2.4 Análise de viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica é fundamental para a avaliação de projetos de investimento, fornecendo métricas essenciais para a tomada de decisão. Esta seção aborda os principais indicadores econômicos utilizados para determinar a viabilidade de projetos, como o VPL, a TIR e o *Payback* Descontado. Cada um desses indicadores oferece uma perspectiva única sobre a atratividade financeira do projeto, considerando o retorno do investimento, o fluxo de caixa gerado e o tempo necessário para recuperar o capital investido. A seguir, são discutidas as metodologias de cálculo e interpretação desses indicadores, além da análise de sensibilidade que permite avaliar a robustez das projeções financeiras em diferentes cenários.

2.4.1 Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma métrica amplamente utilizada para avaliar a viabilidade econômica de um projeto, sendo calculado por meio da Equação (1), onde I é o investimento inicial, em R$, FC_i é o fluxo de caixa no período i, em R$, n é a vida útil do projeto, em meses ou anos, e Taxa Mínima de Atratividade (TMA) é a taxa mensal (ou anual) de desconto, em %. O projeto é considerado economicamente viável se o VPL for igual ou superior a zero (Neto *et al.*, 2017; Nicita *et al.*, 2020).

$$\text{VPL} = -I + \sum_{i=1}^{n} \frac{FC_i}{(1+\text{TMA})^i} \tag{1}$$

2.4.2 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) mede a atratividade financeira de um investimento, identificando a taxa de desconto que faz com que o VPL seja zero. Em outras palavras, a TIR é a taxa que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros ao investimento inicial (Neto, 2017). A TIR é calculada pela Equação (2).

$$-I + \sum_{i=1}^{n} \frac{FC_i}{(1+\text{TIR})^i} = 0 \tag{2}$$

2.4.3 Taxa Interna de Retorno Modificada

A Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM) é particularmente útil em projetos que envolvem fluxos de caixa irregulares, como os investimentos em sistemas híbridos fotovoltaico-biogás. Esses projetos geralmente têm um alto custo inicial, o que resulta em um fluxo de caixa negativo no início da operação. Ao longo do tempo, com a geração de energia renovável, os fluxos de caixa tornam-se positivos. No entanto, à medida que o sistema envelhece, pode ser necessário reinvestir em componentes, como os inversores do sistema fotovoltaico ou os geradores do sistema de biogás, o que pode gerar novos fluxos de caixa negativos e inverter o sinal do fluxo.

A TIRM resolve esse problema ao aplicar uma taxa de financiamento para os fluxos de caixa negativos (como o custo inicial do sistema fotovoltaico e biogás e o custo de substituição de componentes), e uma taxa de reinvestimento para os fluxos positivos (como as receitas geradas pela economia da fatura de energia). Esse tratamento permite que a ferramenta evite a multiplicidade de soluções que poderia ocorrer com a TIR tradicional, fornecendo uma taxa única que reflete de forma mais

realista a viabilidade financeira do projeto, mesmo com as flutuações nos fluxos de caixa ao longo de sua vida útil (Neto, 2017).

A TIRM é calculada pela Equação (3), onde FCP_i é o fluxo de caixa positivo no período i, em R$, T_r é a taxa mensal de reinvestimento, em %, FCN_i é o fluxo de caixa negativo no período i, em R$, T_f é a taxa mensal de financiamento, em %.

$$\text{TIRM} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} FCP_i (1+T_r)^{n-i}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{|FCN_i|}{(1+T_f)^i}} \right]^{\frac{1}{n}} - 1 \tag{3}$$

2.4.4 *Payback* Descontado

O *Payback* Descontado indica o tempo necessário para que o VPL acumulado dos fluxos de caixa atinja zero, o que significa que o valor investido inicialmente foi recuperado considerando o valor do dinheiro no tempo (Allouhi *et al.*, 2019). Este indicador é calculado utilizando a Equação (4).

$$\sum_{i=1}^{\text{PD}} \frac{FC_i}{(1+\text{TMA})^i} = 0 \tag{4}$$

2.4.5 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é uma técnica tradicional utilizada na avaliação de projetos que busca identificar os parâmetros mais influentes e que requerem estimativas mais precisas (Salles, 2004). No que se refere aos indicadores econômicos, como o VPL, é essencial entender como as variações nos parâmetros que afetam o fluxo de caixa impactam os resultados do projeto (Neto, 2017).

A abordagem mais adotada para essa análise é a univariada, na qual cada parâmetro é modificado isoladamente enquanto os demais são mantidos constantes. Isso possibilita a avaliação do efeito individual de cada variável sobre os indicadores econômicos (Neto, 2017). Com base nos resultados, é possível determinar a faixa de valores que confirma a viabilidade do projeto.

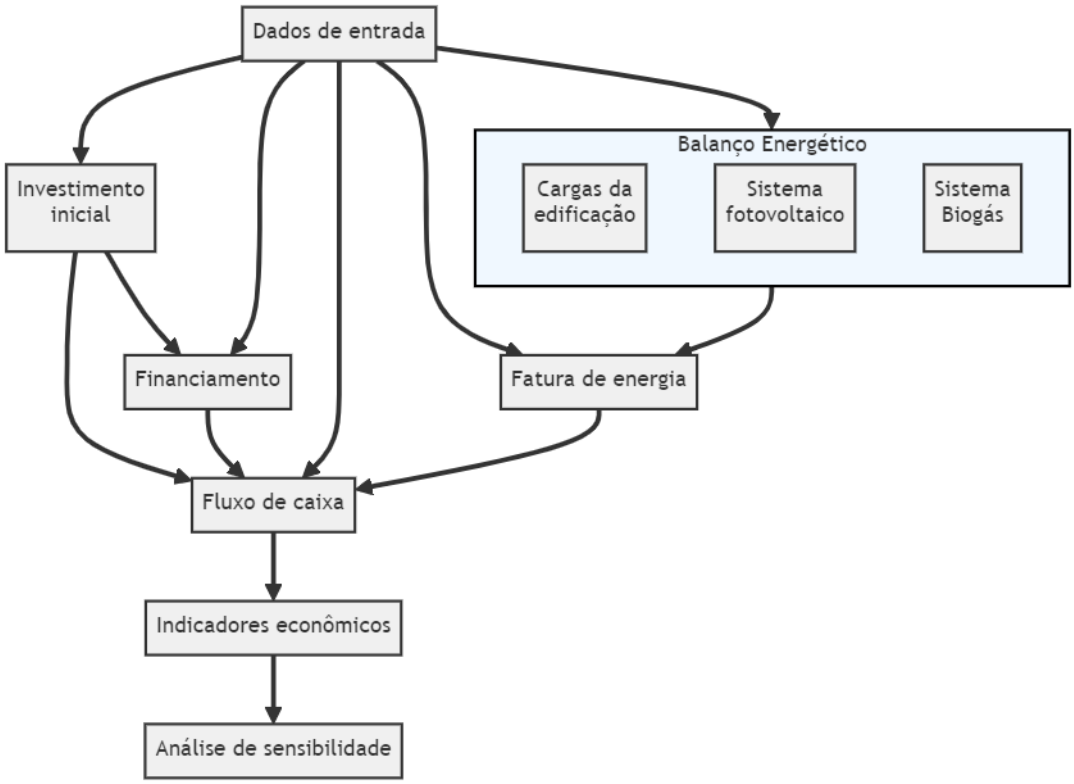
Outra abordagem importante é a análise de limite de viabilidade econômica, que se configura como uma extensão da análise univariada. Esse método visa identificar o ponto de transição em que a viabilidade de um projeto muda, ou seja, o limite em que a decisão se torna economicamente vantajosa (Walker; Fox-Rushby, 2001). Essa abordagem é útil em avaliações econômicas, como análises de investimentos, para definir o ponto de equilíbrio em termos de viabilidade econômica.

CAPÍTULO 3

Metodologia

Neste capítulo, a metodologia de análise técnica e econômica, desenvolvida e implementada na ferramenta computacional SuinoPower, é apresentada. A organização dos blocos de cálculo da SuinoPower está ilustrada na Figura 5, com explicações detalhadas de cada bloco nas seções subsequentes.

Figura 5 – *Fluxograma da estrutura funcional do SuinoPower.*



3.1 Dados de entrada

Inicialmente, o SuinoPower requer a inserção de alguns parâmetros de entrada. A Tabela 1 apresenta os dados que o usuário deve fornecer para iniciar

a simulação na ferramenta.

Tabela 1 – *Parâmetros de entrada fornecidos pelo usuário.*

	Parâmetros	**Unidades**
Edificação	Valor da fatura de energia	R$
	Consumo mensal - convencional	kWh
	Consumo mensal fora ponta, intermediário e ponta	kWh
	Tipo de conexão (mono, bi ou trifásico)	-
	Tipo de tarifação (Convencional ou Branca)	-
Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR)	Cidade	-
	Irradiação solar diária média	kWh/m²/dia
	Potência nominal do SFCR	kWp
	Performance Ratio	%
	Fator de degradação do SFCR	%/ano
	Vida útil do SFCR	anos
	Vida útil do inversor	anos
	Custo do SFCR	R$/kWp
	Custo de troca dos inversores	R$/kWp
	Operação e Manutenção do SFCR	R$/ano
	Tipo de financiamento do SFCR	SAC ou Price
	Percentual financiado do SFCR	%
	Taxa de juros do financiamento do SFCR	% a.a.
	Nº de prestações do financiamento do SFCR	meses
Sistema Biogás Conectado à Rede (SBCR)	Número de animais	-
	Produção média de dejeto	kg/dia/animal
	Produção de biogás	m³/kg
	Poder calorífico do biogás	kWh/m³
	Potência nominal do GMG	kW
	Eficiência do GMG	%
	Eficiência do gerador	%
	Tempo de operação do GMG	h/dia
	Fator de degradação anual do SBCR	%
	Vida útil do SBCR	ano
	Custo do biodigestor	R$/m³
	Custo do GMG	R$/kW
	Operação e Manutenção do SBCR	R$/kW
	Tipo de financiamento do SBCR	SAC ou Price
	Percentual financiado do SBCR	%
	Taxa de juros do financiamento do SBCR	% a.a.
	Nº de prestações do financiamento do SBCR	meses
Tarifação	Tarifa convencional	R$/kWh[a]
	Tarifa fora ponta	R$/kWh[a]
	Tarifa intermediário	R$/kWh[a]
	Tarifa ponta	R$/kWh[a]
	Horários: fora-ponta, intermediário e ponta	h
	TUSD convencional	R$/kWh
	TUSD horária: fora-ponta, intermediário e ponta	R$/kWh
Outros	Taxa Mínima de Atratividade	% a.a.
	Taxa de Financiamento para TIRM	% a.a.

[a] Com impostos.

3.2 Consumo de Energia da Edificação

O cálculo do fluxo de energia é realizado de maneira diária, considerando as interações entre os diferentes elementos do sistema ao longo de cada hora do dia. No entanto, como os dados de fatura de energia geralmente fornecem apenas o consumo total mensal, é necessário adotar o conceito de "dia representativo" para cada mês, uma vez que o consumo diário não é detalhado nas faturas. Assim, apesar de termos a soma total do consumo mensal, o fluxo de energia precisa ser ajustado para refletir o consumo diário, usando esse dia representativo.

Esse procedimento não apenas facilita a adaptação dos dados para o cálculo diário, mas também simplifica o processo, já que permite o cálculo de um único fluxo de energia mensal, baseado no dia representativo. Posteriormente, o fluxo de energia, que inclui tanto a energia consumida da rede quanto a injetada de volta na rede, normalmente registrado pelo medidor bidirecional, é multiplicado por 30,42, fator que ajusta para o valor mensal, seguindo o modelo de faturamento utilizado pelas distribuidoras de energia.

O SuinoPower disponibiliza três modalidades para a inserção dos dados de consumo de energia: Tarifa Convencional, Tarifa Branca e Tarifa Branca Simplificada. Para cada uma dessas opções, é necessário um cálculo específico do dia representativo, variando conforme o tipo de tarifação e as particularidades de consumo associadas a cada modelo.

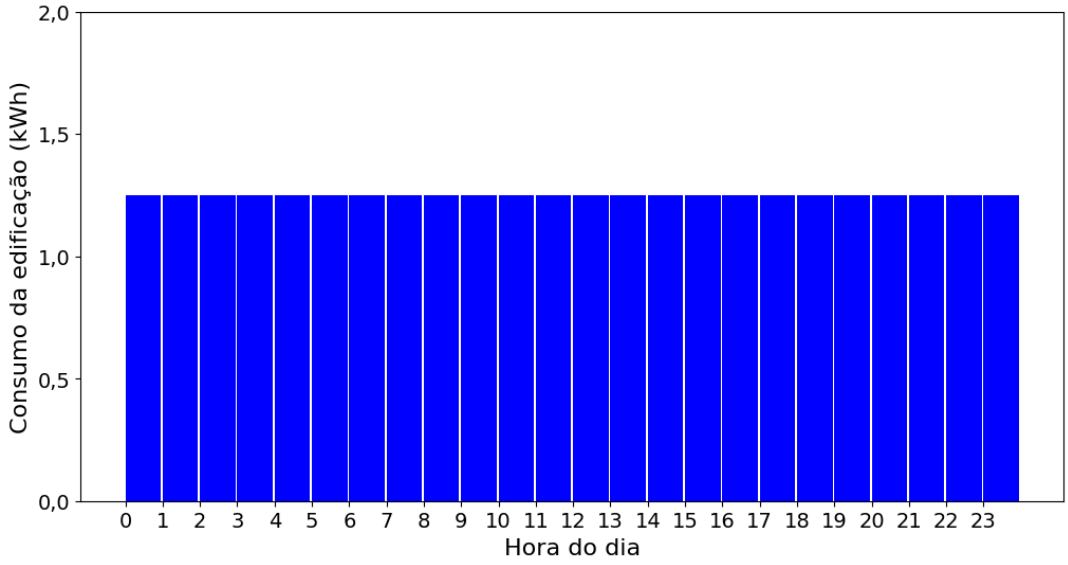
No caso da Tarifa Convencional, o usuário deve inserir o consumo de energia mensal para todos os 12 meses do ano. A partir dessa informação, calcula-se a média diária de consumo, dividindo-se o valor de cada mês por 30,42. Em seguida, essa média diária é distribuída uniformemente pelas 24 horas do dia, gerando um padrão de consumo representativo para o mês. Ou seja, o "dia representativo" corresponde ao consumo diário que seria registrado em todos os dias daquele mês específico.

Esse método torna o cálculo do fluxo de energia mais eficiente, pois utiliza apenas um "dia representativo" para cada mês, em vez de calcular o fluxo para todos os dias. Ao distribuir o consumo mensal de maneira uniforme ao longo das 24 horas do dia e aplicar o fator de conversão (divisão por 30,42), simplifica-se o processamento, mantendo a precisão necessária para a simulação. Isso resulta em um total de 12 fluxos de energia a serem calculados (um para cada mês), reduzindo a complexidade do processo.

A Figura 6 apresenta o resultado da aplicação da metodologia de cálculo para o dia representativo de um mês dentro da Tarifa Convencional.

Para a Tarifa Branca, o consumo diário representativo é calculado com base nos valores mensais fornecidos pelo usuário para cada faixa tarifária (fora ponta,

Figura 6 – *Exemplo de dia representativo para Tarifa Convencional.*



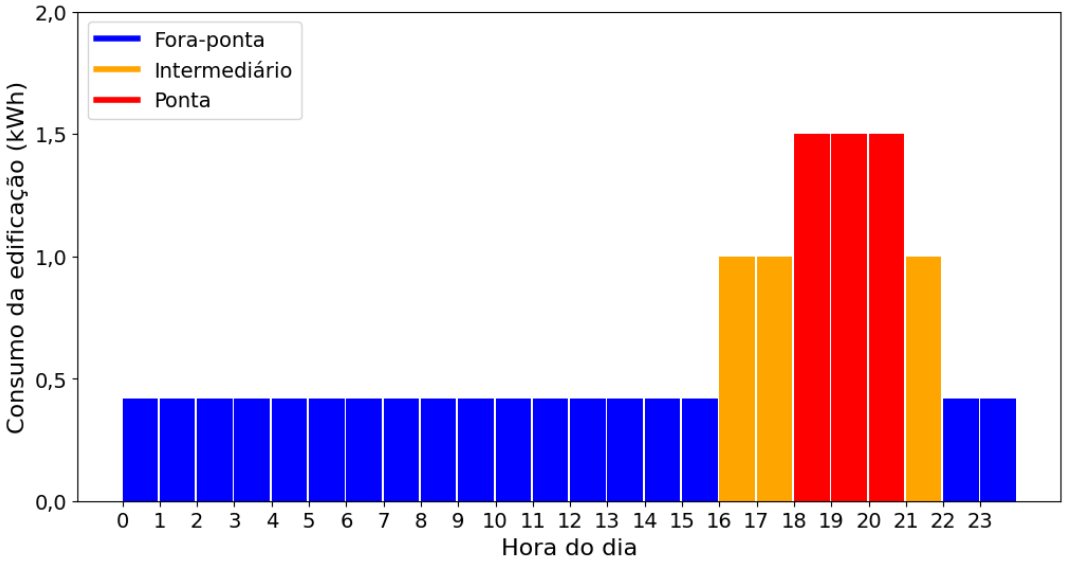
intermediário e ponta) ao longo dos 12 meses do ano. A princípio, o consumo é ajustado para refletir as características dessa tarifação: um mês possui, em média, 9,33 dias não úteis, onde o consumo é totalmente classificado como fora ponta, e os 21,08 dias úteis distribuem-se entre as faixas tarifárias conforme os horários definidos. Para tanto, o consumo fora ponta de cada mês é ajustado, subtraindo a parte correspondente aos períodos de intermediário e ponta, enquanto esses consumos são ajustados de forma proporcional, redistribuindo-se para os dias úteis.

Após esse ajuste, os consumos mensais são convertidos para valores diários, dividindo-se cada valor por 30,42 (média de dias por mês). Esses valores diários ajustados são então aplicados ao longo da vida útil do sistema, gerando uma lista representativa do consumo diário para cada faixa tarifária (fora ponta, intermediário e ponta). Finalmente, a distribuição é refinada para refletir os intervalos de tempo de cada faixa tarifária, o que permite calcular o consumo por hora de cada mês durante a vida útil do sistema. Este processo assegura que o consumo ajustado esteja em conformidade com as regras da Tarifa Branca e seja preciso para análises posteriores.

Na Tarifa Branca Simplificada, a definição do dia representativo segue a mesma lógica da Tarifa Branca, porém com uma importante diferença: o usuário informa um único consumo médio mensal para cada faixa tarifária (ponta, intermediário e fora ponta) para representar o consumo médio anual, sem a necessidade de especificar os valores para todos os 12 meses.

A Figura 7 exemplifica o resultado obtido ao aplicar a metodologia para calcular o dia representativo para ambos os modelos, Tarifa Branca e Tarifa Branca Simplificada.

Figura 7 – *Exemplo de dia representativo para Tarifa Branca e Tarifa Branca Simplificada.*



3.3 Geração do sistema fototovoltaico

O SuinoPower oferece uma funcionalidade que permite ao usuário optar por integrar ou não um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) para gerar parte ou toda a energia elétrica consumida. A energia gerada diariamente pelo SFCR é calculada conforme a Equação (5).

$$E_{SFCR_j} = P_{SF} \cdot \left(\frac{I_{painel}}{I_{ref}} \right) \cdot PR \cdot (1 - \delta_{SF})^{j-1} \tag{5}$$

Em (5), E_{SFCR} é a energia gerada pelo SFCR no mês j (kWh), P_{SF} é a potência nominal do SFCR (kW), I_{painel} é a irradiação solar diária média recebida no plano dos painéis fotovoltaicos (kWh/m²/dia), I_{ref} é a irradiação solar de referência (1 kW/m²), PR é o *Performance Ratio* e δ_{SF} é o fator de degradação mensal do SFCR.

O *Performance Ratio* é um indicador que mede a eficiência global do SFCR, representando a proporção entre a energia elétrica efetivamente gerada pelo sistema e a energia teórica esperada sob condições ideais. O PR considera perdas associadas à eficiência dos componentes, condições ambientais, e outros fatores, normalmente variando entre 0,75 e 0,85, dependendo da qualidade do sistema e das condições de instalação (Jesus; Neto; Domingues, 2023; Zomer, 2014).

O fator de degradação diário do SFCR (δ_{SF}) refere-se à taxa de declínio diário na eficiência do sistema, causada por fatores como desgaste dos materiais, degradação dos componentes e exposição prolongada a condições climáticas adversas. Essa degradação é normalmente expressa como uma porcentagem anual da eficiência

inicial do sistema, podendo ser convertida em uma taxa diária. Isso é fundamental para estimar a produção de energia ao longo da vida útil do sistema e para realizar projeções precisas de retorno sobre o investimento (Jesus; Neto; Domingues, 2023).

3.4 Geração do sistema biogás de suinocultura

Para calcular a energia elétrica produzida a partir do biogás gerado pelos dejetos de suínos, inicialmente, é necessário calcular a quantidade de dejetos suínos conforme a Equação (6).

$$Q_{dejetos} = \sum_{i=1}^{n} N_{animais_i} \cdot P_{dejetos_i} \tag{6}$$

Na Equação (6), $Q_{dejetos}$ é a quantidade total de dejetos suínos, em kg/dia, $N_{animais_i}$ é o número de animais na categoria i (leitões, porcas, reprodutores), $P_{dejetos_i}$ é a produção média de dejetos por animal na categoria i, em kg/dia/animal, e n é o número de categorias animais.

O volume diário de biogás produzido no reator é calculado conforme a Equação (7), onde V_{biogas} é o volume total de biogás produzido, em m^3/dia, e P_{biogas} é a produção de biogás por kg de dejetos, em m^3/kg.

$$V_{biogas} = Q_{dejetos} \cdot P_{biogas} \tag{7}$$

Com base no volume diário de biogás produzido, é possível calcular o potencial mensal de geração de energia elétrica. O potencial E_{pot_j} representa a quantidade máxima de energia que pode ser gerada a partir da produção total de biogás da suinocultura no mês j, conforme a Equação (8).

$$E_{pot_j} = V_{biogas} \cdot PCI_{biogas} \cdot \eta_{GMG} \cdot 30 \tag{8}$$

Na Equação (8), $V_{\text{biogás}}$ representa o volume diário de biogás produzido em m^3/dia, $PCI_{\text{biogás}}$ é o poder calorífico inferior do biogás em kWh/m^3, η_{GMG} é a eficiência global do grupo motor-gerador, e o fator 30 corresponde ao número de dias no mês.

A energia elétrica efetivamente gerada pelo SBCR pode ser calculada pela Equação (9), onde E_{SBCR_j} é a energia gerada no mês j (kWh), P_{GMG} representa a potência nominal do grupo motor-gerador (kW), t_{oper} é o tempo de operação diário do GMG (h/dia), η_{gerador} é a eficiência do gerador (%), e δ_{SB} é o fator de degradação mensal do SBCR.

$$E_{SBCR_j} = P_{GMG} \cdot t_{oper} \cdot \eta_{gerador} \cdot (1 - \delta_{SB})^{j-1} \cdot 30 \tag{9}$$

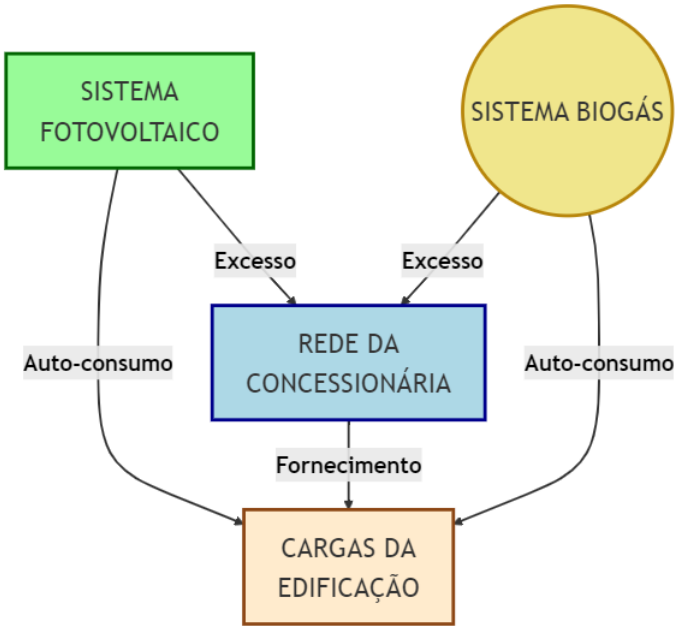
É importante destacar que a energia efetiva gerada pelo SBCR (E_{SBCR}) deve ser menor ou igual ao potencial de geração de energia (E_{pot}). Essa condição é expressa na Equação (10), e a não conformidade com essa relação indicaria que o sistema excederia sua capacidade teórica.

$$E_{SBCR_j} \leq E_{pot_j} \tag{10}$$

3.5 Fluxo energético

A Figura 8 ilustra o fluxo energético entre a rede da concessionária, a edificação, o sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) e o sistema de geração com biogás de suinocultura conectado à rede (SBCR).

Figura 8 – *Fluxo energético entre a rede da concessionária, edificação, sistema fotovoltaico e sistema de biogás de suinocultura.*



A energia gerada pelos sistemas SFCR e SBCR é primeiramente utilizada para suprir as necessidades energéticas da edificação. Caso a geração conjunta de energia dos dois sistemas exceda o consumo da edificação, o excedente é injetado na rede da concessionária. Em caso de déficit de geração, a rede da concessionária complementa o suprimento de energia da edificação.

O fluxo de energia entre os componentes do sistema pode ser resumido como segue: i) Energia combinada do SFCR e do SBCR para a edificação (auto-consumo),

ii) Energia excedente do SFCR e do SBCR injetada na rede da concessionária, e iii) Energia da rede da concessionária para a edificação.

Nesse contexto, o medidor bidirecional da concessionária registra a energia total injetada na rede e a energia total consumida da rede em um determinado intervalo de tempo. Essa medição é necessária para fins de faturamento e para a contabilização do balanço energético.

3.6 Sistema de Compensação de Energia Elétrica

O SuinoPower possibilita a análise para consumidores do Grupo B e do Grupo A, permitindo ao usuário escolher o tipo de sistema de geração distribuída a ser implantado: i) SFCR, ii) SBCR, e iii) Híbrido (SFCR + SBCR).

Quando o usuário decide incluir um ou mais sistemas de geração distribuída, o cálculo da fatura de energia elétrica é realizado de acordo com as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), conforme definido pela Lei n.º 14.300 de 6 de janeiro de 2022 (Brasil, 2022a). Nessa configuração, o SuinoPower adota o SCEE, permitindo que o investidor gere créditos pela energia excedente que é injetada na rede elétrica.

O SCEE funciona como um mecanismo de dedução na fatura de energia, em que os créditos gerados pela energia excedente são utilizados para compensar o consumo de energia em períodos futuros. A energia injetada na rede é monitorada e gerida pela concessionária de energia elétrica, que atribui os créditos correspondentes ao prosumidor, válidos por um período de até 60 meses. Após esse período, os créditos não utilizados expiram. Dessa forma, o SuinoPower é programado para remover automaticamente os créditos não utilizados após 60 meses.

Mais especificamente, para os casos em que a geração está instalada no mesmo local de consumo, a metodologia de cálculo da fatura de energia elétrica para consumidores com sistemas de geração distribuída é estabelecida pela Resolução Normativa nº 1.000/2021 (alterada pela Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023), nos artigos 655-G a 655-S.

A energia elétrica gerada em um determinado posto tarifário (ponta, fora de ponta ou intermediário) é primeiramente utilizada para compensar o consumo de energia elétrica nesse mesmo período. Caso haja excedentes de energia após a compensação interna, esses podem ser utilizados para compensar o consumo em outros períodos tarifários dentro do mesmo ciclo de faturamento. No entanto, essa compensação está sujeita à relação entre as tarifas de energia (TE) de cada período.

O valor da fatura é calculado com base na diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede, levando em conta os créditos acumulados

de meses anteriores, os custos de transporte da energia compensada (quando aplicável), e a parcela referente à injeção no sistema de distribuição. Para consumidores do Grupo B, é aplicado um valor mínimo correspondente ao custo de disponibilidade (CD), que se refere ao uso da rede elétrica. O valor dessa taxa varia de acordo com o tipo de conexão: para redes monofásicas, bifásicas ou trifásicas, equivalendo ao consumo estimado de 30 kWh, 50 kWh e 100 kWh, respectivamente. O custo de disponibilidade, tanto na Tarifa Convencional quanto na Tarifa Branca, é determinado com base nos valores estabelecidos pela tarifa convencional.

A seguir, apresenta-se o equacionamento matemático desenvolvido para a contabilização energética, em conformidade com as diretrizes do SCEE. O modelo proposto é aplicável às modalidades tarifárias Convencional e Branca, sendo importante destacar que a Tarifa Convencional adota um único posto tarifário.

Prioritariamente, a compensação de energia ocorre no mesmo posto tarifário em que foi gerada, conforme a Equação (11), onde $E^{i\to i}_{COMP_m}$ é a energia gerada no posto tarifário i e compensada no posto tarifário i no mês m, $E^{i}_{INJ-REDE_m}$ é a energia injetada na rede no posto tarifário i no mês m.

$$E^{i\to i}_{COMP_m} = \min(E^{i}_{INJ-REDE_m}, E^{i}_{CONS-REDE_m}) \tag{11}$$

Se houver energia excedente após a compensação no mesmo posto tarifário, a energia é compensada em posto tarifário diferente, conforme a Equação (12), onde $E^{i\to j}_{COMP_m}$ é a energia gerada no posto tarifário i no mês m e compensada no posto tarifário j no mês m e $FA^{i\to j}$ é o fator de ajuste da energia gerada no posto tarifário i e compensada no posto tarifário j.

$$E^{i\to j}_{COMP_m} = \min((E^{i}_{INJ-REDE_m} - E^{i\to i}_{COMP_m}) \cdot FA^{i\to j}, E^{j}_{CONS-REDE_m} - E^{j\to j}_{COMP_m}) \tag{12}$$

O fator de ajuste é calculado conforme Equação (13), onde TE^i é a tarifa de energia no posto tarifário i e TE^j é a tarifa de energia no posto tarifário j.

$$FA^{i\to j} = \frac{TE^i}{TE^j} \tag{13}$$

Caso ainda haja energia injetada na rede que não foi totalmente compensada, o saldo remanescente de energia é convertido em crédito de energia para ser utilizado em faturas futuras. O crédito acumulado no posto tarifário i no mês m é dado conforme Equação (14).

$$E^{i}_{crédito_m} = E^{i}_{INJ-REDE_m} - E^{i\to i}_{COMP_m} - E^{i\to j}_{COMP_m} - E^{i\to k}_{COMP_m} \tag{14}$$

3.7 Faturamento

A Lei 14.300/2022 (Brasil, 2022a) define as regras para o faturamento de energia das unidades participantes do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), abrangendo a aplicação da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) Fio B. Essa tarifa incide sobre a energia injetada na rede, com percentuais progressivos que começam em 15% em 2023 e aumentam gradativamente até alcançarem 90% em 2028. Em 2029, caberá à ANEEL estabelecer as novas regras e definir a taxa da TUSD Fio B para os períodos subsequentes.

No entanto, para simplificar e evitar a necessidade de atualização constante do SuinoPower, bem como para eliminar a solicitação de valores anuais da TUSD Fio B ao usuário, considera-se um valor constante de 100% desta tarifa aplicada a toda a vida útil financeira da análise.

Para consumidores enquadrados na Tarifa Convencional, o cálculo da fatura de energia no SuinoPower segue a Equação (15), onde FAT^{Conv}_m é o valor da fatura Convencional, em R$, no mês m, $E^{Conv}_{CONS-REDE_m}$ é a energia consumida da rede, para a Tarifa Convencional, no mês m, em kWh, $E^{Conv}_{COMP_m}$ é a energia compensada, para a Tarifa Convencional, no mês m, em kWh, TAR^{Conv} é a tarifa completa de consumo (TE + TUSD)[1], com impostos, para a Tarifa Convencional, em R$/kWh, e $TUSD^{Conv}_{fioB}$ é a parcela Fio B da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição da Tarifa Convencional, com impostos, em R$/kWh.

$$\begin{aligned} FAT^{Conv}_m = &\left(E^{Conv}_{CONS-REDE_m} - E^{Conv}_{COMP_m}\right) \cdot TAR^{Conv} \\ &+ E^{Conv}_{COMP_m} \cdot TUSD^{Conv}_{fioB} \end{aligned} \tag{15}$$

Para consumidores que optam pela Tarifa Branca, o SuinoPower determina a fatura de energia com base nas Equações (16) e (17), onde FAT^{Branca}_m é o valor da fatura Branca com SFCR e/ou VE, em R$, no mês m, V^{i}_m representa o valor a ser pago, em reais (R$), pelo consumo em kWh no mês m e posto tarifário i, ponta, intermediário e fora de ponta, TAR^i é a tarifa (TE + TUSD), com impostos, no

[1] A tarifa completa de consumo de energia é composta por dois elementos principais: a Tarifa de Energia (TE), que corresponde ao custo da geração da energia elétrica, e a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), que refere-se ao custo pela utilização da infraestrutura de distribuição.

posto tarifário i, em R$/kWh, e $TUSD^{i}_{fioB}$ é a parcela Fio B da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição no período tarifário i, com impostos, em R$/kWh.

$$FAT_{m}^{Branca} = \sum_{i=1}^{M} V_{m}^{i} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} V_{m}^{i} = & \left(E^{i}_{CONS-REDE_m} - E^{i\to i}_{COMP_m} - E^{j\to i}_{COMP_m} - E^{k\to i}_{COMP_m}\right) \cdot TAR^{i} \\ & + \left(E^{i\to i}_{COMP_m} + E^{j\to i}_{COMP_m} + E^{k\to i}_{COMP_m}\right) \cdot TUSD^{i}_{fioB} \end{aligned} \tag{17}$$

Os valores das tarifas de energia e das tarifas $TUSD_{\text{fioB}}$, aplicáveis a todas as concessionárias do Brasil, podem ser acessados de forma pública no site oficial da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL): `https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/tarifa/`.

3.8 Financiamento

Para avaliar a viabilidade financeira da implantação de sistemas de GD, é essencial considerar diferentes métodos de financiamento amplamente utilizados por instituições bancárias. Nesse contexto, são considerados o Sistema de Amortização Constante (SAC) e a Tabela Price.

O sistema Price é caracterizado por prestações fixas durante todo o período de pagamento do empréstimo, o que facilita o planejamento financeiro. No entanto, nos primeiros anos, uma parte significativa da prestação é destinada ao pagamento de juros, resultando em um custo total de empréstimo potencialmente mais elevado. Com o tempo, a parcela dedicada à amortização da dívida aumenta gradualmente, o que reduz o saldo devedor.

Em contraste, o sistema SAC mantém a parcela de amortização constante em todas as prestações, com os juros diminuindo ao longo do tempo. Isso permite uma redução mais rápida do saldo devedor em comparação ao sistema Price. No entanto, as prestações mensais começam mais altas e diminuem gradualmente conforme os juros são reduzidos.

O SuinoPower oferece aos usuários a flexibilidade de escolher entre os sistemas de financiamento Price e SAC. Ademais, permite uma análise detalhada do custo total do empréstimo, das prestações e do planejamento de fluxo de caixa. Essa funcionalidade auxilia os usuários a tomarem decisões informadas sobre o sistema de financiamento mais adequado para a implantação dos sistemas de GD e seu impacto na viabilidade econômica.

3.9 Fluxo de caixa e indicadores econômicos

O fluxo de caixa proporciona uma visão detalhada das entradas e saídas de recursos ao longo do tempo. Considerando uma ampla variedade de parâmetros, como receita bruta, custos operacionais, custos de manutenção, investimentos iniciais e outras despesas, é possível calcular o saldo líquido para cada período. A estrutura do fluxo de caixa é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – *Estrutura do Fluxo de Caixa.*

(+) Receita Bruta
Economia da fatura de energia
(-) Custos Operacionais
Manutenção e Operação
Financiamento
(=) Lucro Operacional Líquido
(-) Custos de Investimento Inicial
Equipamentos e Instalações
(=) Fluxo de caixa líquido

A Receita Bruta do fluxo de caixa gerada pelo investimento nos sistemas de GD é originada pela economia na fatura de energia elétrica, sendo calculada pela diferença entre o valor da fatura sem GD e o valor da fatura com GD.

O investimento inicial engloba todos os custos relacionados à aquisição e instalação dos sistemas de geração fotovoltaica e de biogás de suinocultura, além de outras despesas associadas à implantação do projeto, como equipamentos acessórios, instalação elétrica, licenciamento, permissões, mão de obra, entre outros.

É importante destacar que é necessário realizar reinvestimentos devido à substituição dos inversores do sistema fotovoltaico ao longo da vida útil do SFCR, uma vez que os inversores têm uma vida útil menor do que a do SFCR.

O financiamento é uma das funcionalidades chave do SuinoPower. A captação de recursos financeiros para cobrir os investimentos iniciais pode afetar de maneira significativa as finanças do projeto. Durante o período de pagamento, as parcelas do financiamento são contabilizadas como despesas, impactando o saldo líquido disponível ao longo do tempo.

O fluxo de caixa líquido é calculado subtraindo as despesas das receitas em cada período analisado. Esse cálculo permite identificar se o projeto está gerando um saldo positivo ou negativo ao longo do tempo, sendo essencial para avaliar sua viabilidade financeira e orientar decisões de investimento.

Com base no fluxo de caixa líquido gerado, são utilizados indicadores econômicos como o VPL, a TIR e o *Payback* Descontado. O VPL é utilizado

para calcular o valor presente dos fluxos de caixa futuros do projeto, levando em consideração a taxa mínima de atratividade do investimento. A TIR indica a taxa de retorno esperada do investimento, enquanto o *Payback* Descontado calcula o tempo necessário para recuperar o capital investido inicialmente.

3.10 Análise de sensibilidade

A funcionalidade de análise de sensibilidade presente no SuinoPower possibilita a avaliação de como as variações em parâmetros incertos podem influenciar os resultados financeiros. No contexto da implantação de SFCR e SBCR, alguns parâmetros essenciais se destacam: o custo do SFCR (R$/kWp), o custo do SBCR (R$/kW), a potência nominal do SFCR (kWp), a potência nominal do SBCR (kW) e a TMA.

A análise de sensibilidade é realizada por meio de um método univariado, no qual cada parâmetro é examinado individualmente em relação ao VPL (Valor Presente Líquido) do projeto. Os parâmetros são ajustados dentro de intervalos específicos, estabelecidos pelo usuário, e os resultados são analisados para verificar como cada variação afeta a viabilidade econômica do projeto, especialmente no que se refere ao VPL.

Vale destacar que a análise de sensibilidade da potência do SFCR e do SBCR apresenta uma característica única. Ela permite identificar o dimensionamento ideal sob o ponto de vista econômico, determinando a potência dos sistemas que maximiza o VPL do projeto. Dessa forma, é possível garantir uma alocação eficiente dos recursos e alcançar uma maior rentabilidade ao longo do tempo.

Além disso, a análise de sensibilidade ajuda a identificar os limites de viabilidade do projeto, indicando os valores dos parâmetros que o tornam viável ou inviável. Compreender como cada variável afeta a viabilidade econômica possibilita a escolha de valores apropriados que assegurem a sustentabilidade econômica a longo prazo.

CAPÍTULO 4

Ferramenta Desenvolvida

Este capítulo descreve a implementação da ferramenta SuinoPower e suas principais funcionalidades. O conteúdo inicia com uma visão geral sobre o processo de desenvolvimento, seguido pela apresentação das páginas da aplicação, que foi concebida como uma interface *web*. A opção por esse formato busca proporcionar praticidade aos usuários, evitando a necessidade de instalação de *software* específico em cada dispositivo, o que facilita o acesso e a manutenção.

Outra vantagem importante é a centralização das atualizações, permitindo que quaisquer modificações realizadas no servidor estejam automaticamente disponíveis para todos os usuários. Além disso, a aplicação oferece maior escalabilidade, interoperabilidade aprimorada e uma experiência de uso mais coesa. O acesso à ferramenta pode ser realizado através do link: `https://suinopower-9ace13768be6.herokuapp.com/`

4.1 Desenvolvimento

O SuinoPower foi desenvolvido em Python, utilizando o *framework Flask* para construção de aplicações *web*, o que possibilitou uma rápida prototipagem e a implementação eficiente de funcionalidades dinâmicas, facilitando a interação dos usuários com os dados e análises que a aplicação fornece.

4.1.1 Arquitetura do Código

A estrutura da aplicação segue o padrão *Model-View-Controller* (MVC), que separa a lógica de negócios, a interface do usuário e a manipulação de dados. O projeto está organizado da seguinte forma:

- **Modelo (*Model*)**: Responsável pelo processamento dos dados, incluindo cálculos técnicos e econômicos, além da geração de gráficos e relatórios. Os módulos de cálculo são organizados para permitir reutilização e facilitar a manutenção do código.

- **Visão (*View*)**: Consiste em templates HTML criados com o Jinja2, o que permite a inclusão de variáveis e renderização dinâmica de elementos, como gráficos e relatórios em PDF. Os templates estão organizados em uma estrutura de pastas que facilita a navegação e manutenção.
- **Controle (*Controller*)**: Gerencia as requisições HTTP, processa dados e decide a resposta a ser enviada ao usuário. As rotas da aplicação são configuradas com decorators do *Flask*, o que facilita a adição e modificação de funcionalidades.

4.1.2 Estrutura de Pastas e Arquivos

A estrutura de pastas do projeto SuinoPower segue o padrão comum de aplicações *Flask*, conforme ilustrado abaixo:

```
suinopower/
|__ app.py
|__ requirements.txt
|__ data/
|   |__ irradiancia.xlsx
|__ config.py
|__ static/
|   |__ css/
|   |__ js/
|   |__ img/
|__ templates/
|   |__ contato.html
|   |__ home.html
|   |__ resultado.html
|   |__ resultado_pdf.html
|   |__ simular.html
|   |__ sobre.html
|__ graficos.py
|__ fotovoltaico.py
|__ biogas.py
|__ fluxo_energia.py
|__ fotovoltaico_diario.py
|__ separar_fluxos.py
|__ fatura_convencional.py
|__ fatura_branca.py
|__ financiamento.py
|__ fluxo_caixa.py
```

A Tabela 3 apresenta a estrutura de arquivos e pastas do projeto SuinoPower, com descrições sucintas que destacam as funções e responsabilidades de cada componente. Essa organização inclui desde os arquivos principais de configuração

e inicialização da aplicação até módulos especializados, responsáveis por cálculos técnicos, criação de gráficos e geração de relatórios.

Tabela 3 – *Estrutura de arquivos e pastas do projeto Suino-Power.*

Arquivo/Pasta	**Descrição**
`app.py`	Ponto de entrada da aplicação, onde a instância do *Flask* é criada e as rotas são registradas.
`requirements.txt`	Lista as bibliotecas e suas versões necessárias para o projeto, facilitando a instalação com `pip`.
`data/irradiancia.xlsx`	Arquivo Excel com dados de irradiância por cidade, utilizado para preencher automaticamente o campo de irradiância solar no formulário.
`config.py`	Define configurações da aplicação, incluindo variáveis de ambiente e detalhes de um banco de dados baseado em arquivo Excel.
`static/`	Armazena arquivos estáticos usados na aplicação, como folhas de estilo (CSS), scripts (JavaScript) e imagens.
`templates/`	Contém os arquivos HTML que são renderizados para a interface do usuário.
Módulos Especiais	
`graficos.py`	Para gerar os gráficos de consumo.
`fotovoltaico.py`	Para calcular a geração fotovoltaica.
`biogas.py`	Para calcular a geração de energia com biogás.
`fluxo_energia.py`	Para calcular o fluxo de energia.
`fotovoltaico_diario.py`	Para calcular a geração horária.
`separar_fluxos.py`	Para separar o consumo por posto tarifário.
`fatura_convencional.py`	Para calcular a fatura Convencional.
`fatura_branca.py`	Para calcular a fatura da Tarifa Branca.
`financiamento.py`	Para calcular o financiamento dos sistemas fotovoltaico e biogás.
`fluxo_caixa.py`	Para calcular o fluxo de caixa e os indicadores econômicos.

4.1.3 Fluxo de Processos

A Figura 9 mostra o fluxo de processos da aplicação. O processo começa com o **Início**, representando o ponto de partida. Em seguida, ocorre a etapa de **Iniciar Servidor *Flask***, onde a aplicação *Flask* é ativada para aceitar requisições. O próximo passo é **Receber Requisição HTTP**, onde o servidor recebe uma requisição HTTP de um cliente. Depois disso, a aplicação identifica qual rota foi solicitada.

Em seguida, a etapa de **Executar Função Controladora** é realizada, executando a função controladora correspondente à rota. A próxima etapa é **Interagir com Módulos de Cálculo**, onde a função controladora interage com os módulos de cálculo para processar os dados. Após o processamento, a aplicação passa para a etapa de **Renderizar Template**, onde renderiza o template HTML apropriado com os dados resultantes. Finalmente, a etapa de **Enviar Resposta HTTP** representa o envio da resposta final ao cliente, encerrando o processo na etapa de **Fim**.

Figura 9 – *Fluxo de Processos da Aplicação SuinoPower.*

```
Início
  ↓
[Iniciar Servidor \textit{Flask}]
  ↓
[Receber Requisição HTTP]
  ↓
[Identificar Rota]
  ↓
[Executar Função Controladora]
  ↓
[Interagir com Módulos de Cálculo]
  ↓
[Renderizar Template]
  ↓
[Enviar Resposta HTTP]
  ↓
Fim
```

4.2 Interface do usuário

A interface da aplicação é estruturada em quatro páginas principais: i) Home, ii) Simular, iii) Sobre e iv) Contato. Cada uma dessas páginas desempenha funções específicas, que serão detalhadas nas seções subsequentes, destacando suas características e funcionalidades.

4.2.1 Página Home

A página inicial da ferramenta "SuinoPower", intitulada "Home", apresenta no topo um menu com os botões "Home", "Simular", "Sobre" e "Contato". Logo abaixo, uma seção de boas-vindas introduz o SuinoPower como uma solução para análise técnica e econômica de sistemas híbridos de geração de energia (biogás e solar fotovoltaico) voltados à suinocultura. O texto destaca funcionalidades como financiamento, fluxo de caixa, indicadores econômicos, relatórios detalhados e análise de sensibilidade, auxiliando na tomada de decisões para uma gestão eficiente dos recursos, conforme ilustrado na Figura 10.

Ainda na página "Home", a seção "Destaques da Ferramenta", ilustrada na Figura 11, apresenta breves descrições das principais funcionalidades do SuinoPower, organizadas em itens como Biogás de Suinocultura, Sistema Fotovoltaico, Sistema de Compensação de Energia, Financiamento, Indicadores Econômicos, Análise de Sensibilidade e Relatório Detalhado. Ao final da página, o botão Simular permite ao

Figura 10 – *Página Home: Menu e Boas-vindas.*

usuário acessar os formulários para inserir os dados necessários e iniciar as análises da ferramenta.

4.2.2 Página Simular

A página Simular apresenta um menu de opções de simulação e formulários dinâmicos que são exibidos automaticamente conforme o usuário seleciona as opções desejadas. Nela, é possível inserir dados de entrada, como parâmetros técnicos e econômicos, e ajustar as configurações para personalizar a análise de acordo com o projeto.

Como ilustrado na Figura 12, o menu de simulação oferece as seguintes opções iniciais: Incluir Sistema Biogás, para adicionar a geração de energia a partir de biogás; Incluir Sistema Fotovoltaico, para incluir a análise do sistema solar; Incluir Financiamento do Sistema Biogás e Incluir Financiamento do Sistema Fotovoltaico, permitindo configurar as condições financeiras específicas de cada tecnologia. Essa estrutura permite ao usuário personalizar a simulação de acordo com as especificidades do projeto, ajustando parâmetros técnicos e financeiros para refletir as condições reais de cada sistema de energia.

A seção de entrada de dados sobre o consumo de energia elétrica é estruturada para refletir a apresentação das informações conforme exibidas nas faturas recebidas pelos usuários das concessionárias de energia. Isso inclui campos específicos para preenchimento de dados como consumo em kWh, tarifas aplicadas em cada

Figura 11 – *Página Home: Destaques da ferramenta e botão "Simular".*

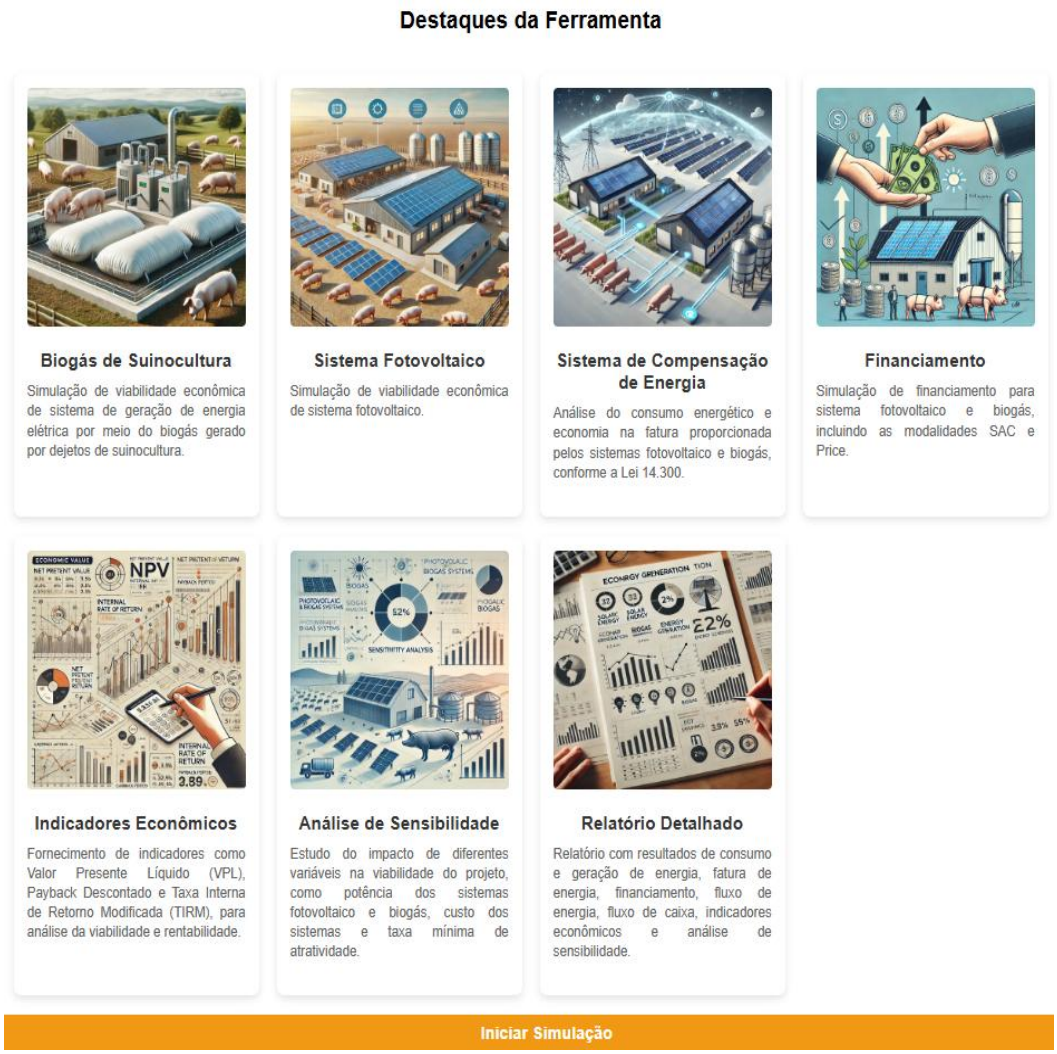


Figura 12 – *Página Simular: Opções iniciais de simulação.*

posto tarifário e outras informações pertinentes, facilitando a inserção precisa dos dados pelo usuário. Essa abordagem visa atender a uma necessidade específica do mercado nacional, já que, enquanto muitas ferramentas computacionais disponíveis são de origem internacional, a SuinoPower é personalizada para os tarifários e as normas brasileiras, garantindo a precisão no cálculo dos custos energéticos.

O primeiro formulário, intitulado “Dados da Fatura de Energia”, é visível independentemente das opções de simulação escolhidas, pois qualquer análise requer esses dados de fatura. Neste formulário, estão disponíveis as opções “Tipo de Instalação”, “Tipo de Tarifação” e os campos para a inserção dos Dados da Fatura. O usuário deve fornecer informações sobre o tipo de instalação elétrica, a modalidade tarifária utilizada e o consumo mensal de energia. As opções de tipo de instalação incluem conexões “Monofásica”, “Bifásica” e “Trifásica”, enquanto a tarifação permite escolher entre “Convencional”, “Tarifa Branca - Fatura” e “Tarifa Branca - Simplificado”, conforme ilustra a Figura 13.

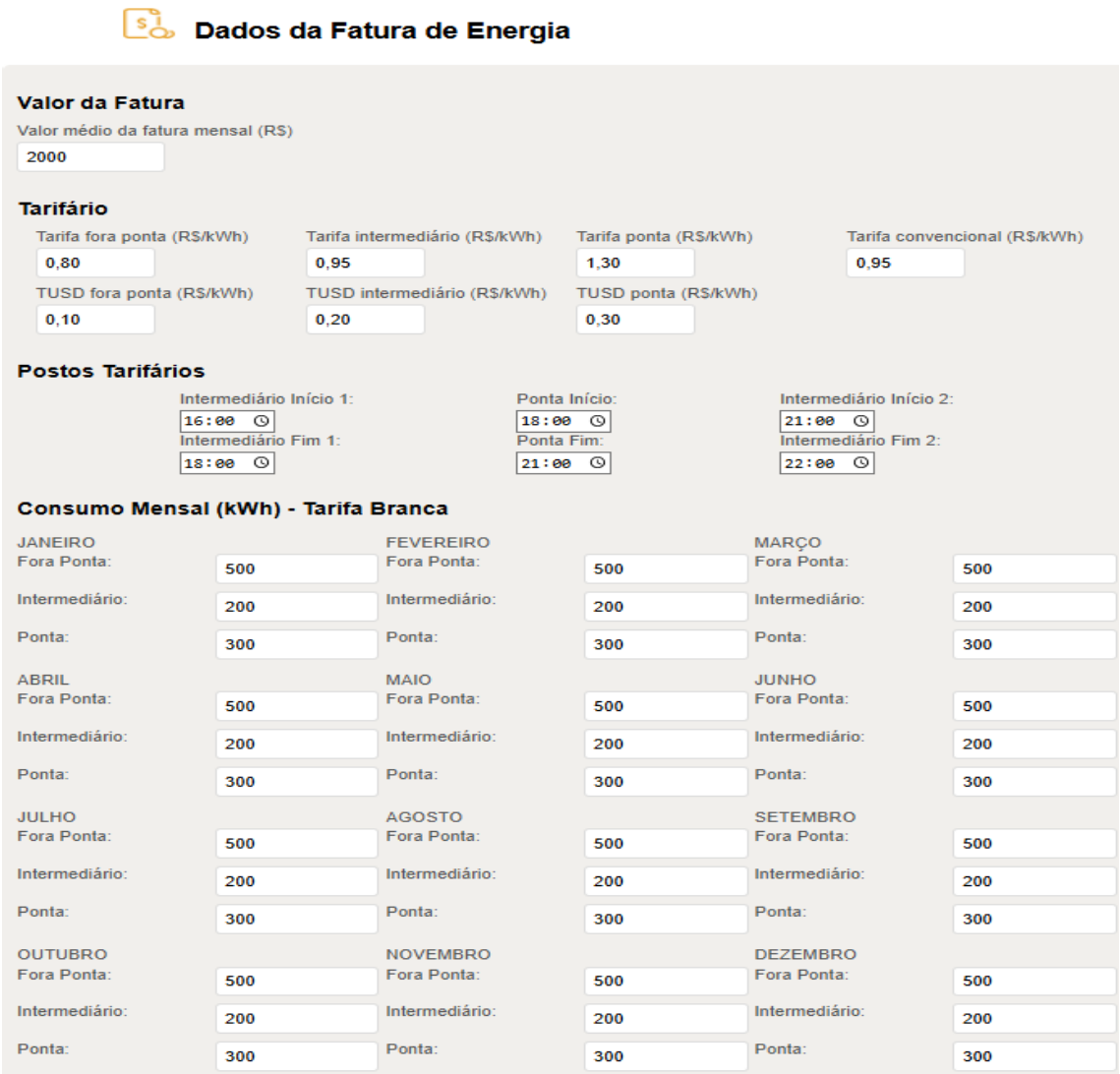
Figura 13 – *Página Simular: Dados de fatura convencional.*

Os campos para a inserção dos Dados da Fatura se alteram conforme a opção de tarifação escolhida. No caso de tarifação “Convencional”, conforme ilustra a Figura 13, são apresentados os campos “Valor da Fatura”, para inserção do valor médio mensal que o usuário paga com base em uma média anual; “Tarifário”, que contém os campos para inserção do valor da tarifa de energia, já com impostos inclusos; "TUSD", que se refere à Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição, a ser aplicada à energia injetada na rede e posteriormente aproveitada como crédito de

energia na fatura; e “Consumo Mensal”, com 12 campos de preenchimento, sendo um para cada mês do ano.

No caso da “Tarifa Branca - Fatura”, conforme ilustra a Figura 14, o campo “Valor da Fatura” é apresentado de forma semelhante ao da tarifa convencional. Na seção “Tarifário”, são exibidos os campos para inserção da tarifa de energia para os horários “fora ponta”, “intermediário”, “ponta” e a tarifa convencional, utilizada no caso de faturamento mínimo (custo de disponibilidade). Também estão presentes os campos para “TUSD”, aplicados nos períodos “fora ponta”, “intermediário” e “ponta”. Além disso, na seção “Postos Tarifários”, o usuário deve definir os horários correspondentes ao início e fim dos períodos intermediários, bem como o horário de ponta. Na seção “Consumo Mensal (kWh)”, o usuário insere o consumo mensal de energia, distribuindo-o entre os diferentes períodos tarifários (“fora ponta”, “intermediário” e “ponta”), com um campo disponível para cada mês do ano.

Figura 14 – *Página Simular: Dados de fatura branca.*



No caso da “Tarifa Branca - Simplificado”, conforme ilustra a Figura 15, a estrutura é similar à da “Tarifa Branca - Fatura”, com os mesmos campos para inserção do “Valor da Fatura”, “Tarifário” e horários dos postos tarifários. A principal diferença está na seção “Consumo Mensal (kWh)”, onde, em vez de exigir o preenchimento dos consumos mensais para cada um dos 12 meses do ano, o usuário deve inserir o consumo médio mensal para cada posto tarifário, calculado com base na média anual. Essa abordagem simplificada visa facilitar o preenchimento, mantendo a precisão nos cálculos de consumo e custos energéticos.

Figura 15 – *Página Simular: Dados de fatura branca - simplificado.*

O formulário de dados para o sistema fotovoltaico é ilustrado na Figura 16, sendo dividido em duas seções: “Dados Técnicos” e “Dados Econômicos”. Na seção “Dados Técnicos”, o usuário começa preenchendo o campo “Cidade”, onde pode selecionar a cidade de instalação do sistema fotovoltaico, com todas as cidades brasileiras cadastradas. Ao escolher a cidade, o campo “Irradiação Solar Diária Média” é automaticamente preenchido com os dados específicos dessa localidade, com base no banco de dados de irradiância do SuinoPower. Em seguida, o usuário deve informar a “Potência Nominal” do sistema fotovoltaico. Ainda na seção de “Dados Técnicos”, existe o botão “Dados Avançados”, que ao ser acionado expande o formulário, permitindo ao usuário ajustar parâmetros adicionais, como o “Performance Ratio”, o “Fator de Degradação Anual”, a “Vida Útil do Sistema Fotovoltaico” e a “Vida Útil do Inversor”. Esses dados avançados são importantes

para refinar a simulação de desempenho do sistema fotovoltaico, considerando variáveis específicas de cada projeto, como a eficiência ao longo do tempo e a durabilidade do sistema e dos componentes.

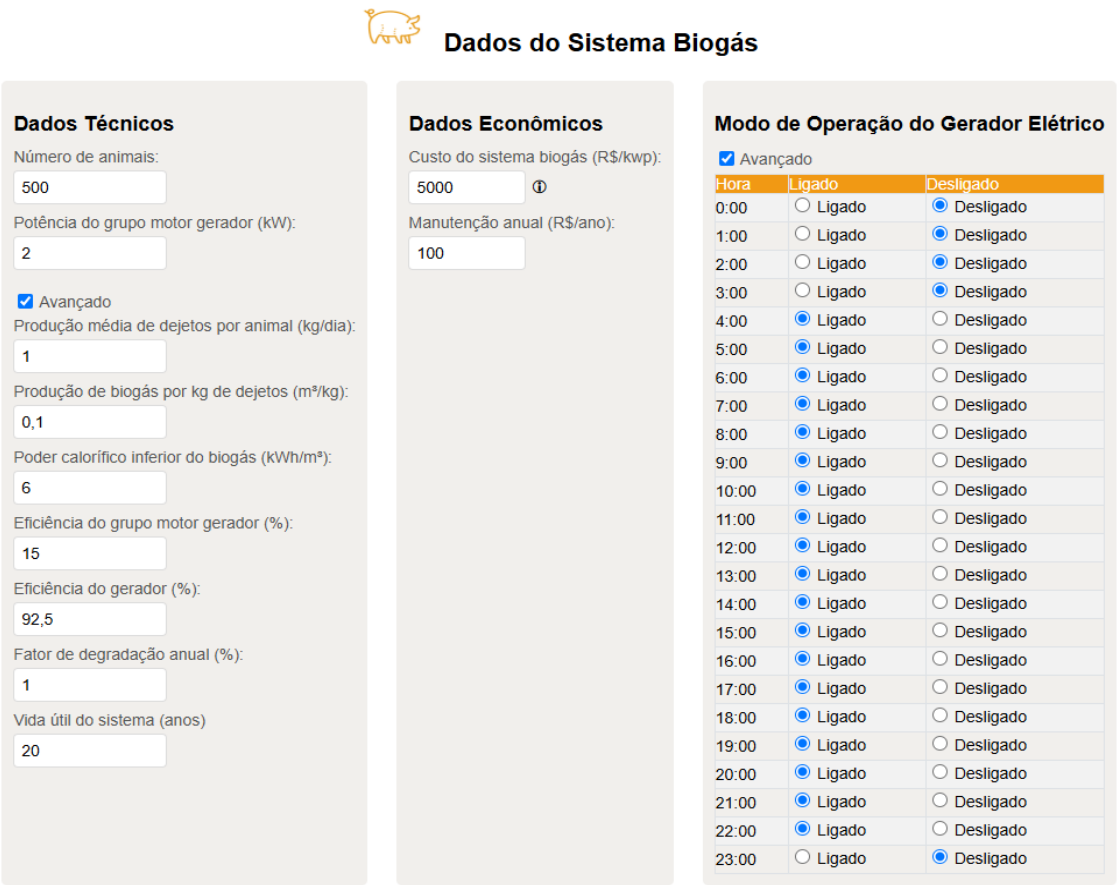
Já na seção "Dados Econômicos", são fornecidos campos para o preenchimento de informações relacionadas aos custos do sistema fotovoltaico, incluindo o "Custo do Sistema Fotovoltaico", o "Custo de Substituição dos Inversores" e o "Custo Anual de Manutenção". Esses dados possibilitam a análise econômica da inclusão do sistema fotovoltaico no projeto, permitindo calcular os custos de investimento e manutenção ao longo da vida útil da planta.

Figura 16 – *Página Simular: Dados do sistema fotovoltaico.*

O formulário de "Dados do Sistema Biogás", ilustrado na Figura 17, permite ao usuário inserir informações sobre a configuração técnica e a análise econômica do sistema, divididas em duas seções principais: "Dados Técnicos" e "Dados Econômicos".

Na seção "Dados Técnicos", o formulário solicita o número de animais e a potência do grupo motor gerador, que são usados para calcular a capacidade de geração de energia do sistema. Além disso, existe a opção de expandir as configurações por meio do botão "Avançado", que revela parâmetros adicionais. Esses parâmetros incluem a produção média de dejetos por animal, a quantidade de biogás gerado por cada quilograma de dejeto, e o poder calorífico inferior do biogás, que influenciam a quantidade de energia gerada a partir do biogás. Também podem ser ajustadas as eficiências do grupo motor gerador e do gerador elétrico, permitindo

Figura 17 – *Página Simular: Dados do sistema biogás.*



um cálculo mais preciso do desempenho do sistema. O fator de degradação anual e a vida útil do sistema são configuráveis para ajustar a análise ao longo do tempo.

Na seção "Dados Econômicos", o usuário deve informar o custo do sistema biogás, que inclui todos os equipamentos e custos de instalação, bem como o custo anual de manutenção. Esses dados são necessários para calcular o retorno sobre o investimento e estimar os custos operacionais durante a vida útil do sistema.

Por fim, o formulário inclui uma seção para configurar o "Modo de Operação do Gerador Elétrico". Ao clicar no botão "Avançado", aparece um formulário que permite ao usuário definir, para cada hora do dia, se o gerador estará ligado ou desligado, ajustando a operação conforme a demanda e maximizando a eficiência do sistema de biogás.

O formulário de financiamento, conforme ilustra a Figura 18, permite ao usuário configurar os parâmetros de financiamento tanto para sistemas fotovoltaicos quanto para sistemas de biogás. Para cada tipo de sistema, o usuário pode escolher entre os modelos de financiamento "SAC" ou "Price", e inserir informações sobre o percentual do investimento a ser financiado, que pode variar de 0% a 100%. Além disso, é necessário informar a taxa anual de juros, ajustando o valor conforme

necessário, e o número de prestações, oferecendo flexibilidade quanto à duração do pagamento. O formulário é dividido em duas seções, uma para o sistema "Biogás" e outra para o "Fotovoltaico", permitindo ao usuário configurar cada sistema de maneira independente e personalizada.

Figura 18 – *Página Simular: Financiamento.*

A Figura 19 ilustra o formulário "Análise Econômica" que oferece duas abordagens distintas: uma análise padrão e uma análise de sensibilidade. Na análise padrão, o usuário pode escolher entre três indicadores econômicos: Valor Presente Líquido (VPL), Payback Descontado e Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM). O VPL e o Payback Descontado requerem a definição de uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA), enquanto o TIRM exige também a inserção de taxas de reinvestimento e financiamento. Esses indicadores fornecem uma visão clara da viabilidade econômica do projeto, considerando valores fixos para os parâmetros inseridos.

A opção "Análise de sensibilidade", conforme ilustra a Figura 20, permite avaliar como variações em parâmetros específicos afetam a viabilidade econômica do projeto, particularmente o VPL. As opções de parâmetros incluem a potência e o custo do sistema fotovoltaico, a potência e o custo do sistema biogás, além da TMA. Variações na potência dos sistemas fotovoltaico e biogás impactam diretamente a geração de energia e, consequentemente, a receita e o VPL. Já as alterações nos custos de instalação desses sistemas influenciam o investimento inicial e podem afetar o retorno financeiro do projeto. A TMA, que é usada para descontar os fluxos de caixa, também pode ser ajustada para ver como mudanças nas expectativas de rentabilidade alteram os resultados. Esse tipo de análise oferece uma visão mais detalhada sobre os riscos financeiros do projeto, considerando diferentes cenários técnicos e econômicos.

Figura 19 – *Página Simular: Indicadores econômicos e botão "Simular".*

Figura 20 – *Página Simular: Análise de sensibilidade.*

Por fim, o botão "Simular", ilustrado na Figura 19, tem a função de submeter os dados preenchidos no formulário para o processamento, iniciando o cálculo com as informações fornecidas pelo usuário. Ao ser clicado, ele envia os dados para a próxima etapa do sistema, permitindo que os resultados sejam gerados com base nas escolhas realizadas.

4.2.3 Página de Resultados

A seção de resultados, conforme ilustra a Figura 21, oferece ao usuário diversas opções de visualização dos dados gerados durante a simulação. Através de uma interface interativa, é possível acessar resultados relacionados ao Consumo de

Energia, Geração de Energia dos sistemas de Biogás e Fotovoltaico, Fluxo de Energia e Fluxo de Caixa. Adicionalmente, são disponibilizados relatórios sobre o Financiamento dos sistemas e Indicadores Econômicos. Para facilitar o armazenamento e compartilhamento das informações, a página também inclui uma opção de exportação dos resultados em formato PDF, que pode ser acionada através do botão "Gerar PDF" ao final da seção. Essa funcionalidade oferece uma forma prática e acessível para que o usuário salve e compartilhe os resultados da simulação.

Figura 21 – *Página de Resultados: Opções de visualização dos resultados e botão "Gerar PDF".*

4.2.4 Página Sobre

A página "Sobre", ilustrada na Figura 22, apresenta informações fundamentais sobre a origem e o desenvolvimento da ferramenta. Nela, o usuário pode conhecer o contexto acadêmico em que o SuinoPower foi criado, incluindo o vínculo com o Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade (PPGTGS) do Instituto Federal de Goiás (IFG). A seção também destaca o trabalho de pesquisa realizado por Heloene Fernandes Siqueira, que desenvolveu a ferramenta como parte de seu projeto de mestrado, sob a orientação do Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto e a coorientação da Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos. O objetivo dessa seção é

fornecer ao usuário um entendimento sobre as bases acadêmicas e institucionais do SuinoPower, reforçando sua credibilidade e contexto de desenvolvimento.

Figura 22 – *Página Sobre.*

4.2.5 Página Contato

A seção "Contato", ilustrada na Figura 23, oferece aos usuários uma maneira direta de entrar em contato com a equipe de desenvolvimento do SuinoPower. Caso haja dúvidas ou sugestões, é possível enviar um e-mail para os responsáveis pelo projeto. As informações de contato estão organizadas com os nomes dos envolvidos no desenvolvimento da ferramenta, juntamente com seus respectivos endereços de e-mail. Dessa forma, o usuário pode facilmente alcançar a equipe para obter suporte ou mais informações sobre o SuinoPower.

Figura 23 – *Página Contato.*

CAPÍTULO 5

Estudo de Caso

Este capítulo apresenta os resultados da análise econômica realizada com a ferramenta SuinoPower, destacando sua aplicabilidade prática no contexto de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás em suinoculturas no Brasil. As simulações abrangem todas as funcionalidades da ferramenta: a inclusão de sistema de biogás, a implementação de sistema fotovoltaico e o financiamento de ambos. Inicialmente, os resultados do caso base são apresentados, com uma análise econômica fundamentada nos indicadores VPL, *Payback* Descontado e TIRM. Em seguida, a análise de sensibilidade é explorada, aplicada a parâmetros críticos do projeto. Por fim, são apresentados os resultados de simulações adicionais, considerando diferentes cenários, com o objetivo de ampliar a compreensão sobre as variáveis que influenciam a viabilidade econômica dos projetos.

5.1 Caso Base

O caso base, que trata de uma suinocultura hipotética localizada na cidade de Aparecida de Goiânia, no estado de Goiás, tem como um de seus objetivos demonstrar a aplicabilidade da ferramenta SuinoPower. Os dados de entrada adotados, ou seja, as premissas do projeto, baseiam-se em valores consistentes com os encontrados em estudos semelhantes, garantindo a representatividade dos cálculos realizados.

Neste contexto, o objetivo é realizar uma comparação entre as modalidades tarifárias Convencional e Branca para consumidores do Grupo B2 - Rural. Para isso, são alterados exclusivamente os dados relacionados à fatura de energia, como consumo e tarifação, enquanto os demais parâmetros técnicos e econômicos permanecem inalterados. Essa abordagem possibilita uma análise objetiva sobre o impacto de cada modalidade tarifária na viabilidade econômica do projeto.

Os dados técnicos e econômicos do caso base estão organizados em tabelas que abrangem as categorias: fatura de energia, sistema fotovoltaico, sistema de biogás e análise econômica. Essas tabelas detalham os parâmetros de entrada utilizados para calcular o consumo de energia da suinocultura existente, os dados relativos

ao sistema fotovoltaico e ao sistema de biogás a serem instalados, refletindo a personalização das condições específicas de cada usuário. Os dados fornecem informações sobre o consumo energético atual da instalação e os parâmetros necessários para estimar os custos e benefícios da implementação das tecnologias fotovoltaica e de biogás.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os dados de fatura de energia utilizados como base para a análise comparativa entre as modalidades tarifárias Convencional e Branca. Esses dados incluem informações gerais, como características da instalação, detalhes sobre o consumo mensal e tarifas com impostos inclusos. No caso da tarifa Branca, são apresentados adicionalmente os valores correspondentes aos diferentes postos tarifários: ponta, intermediário e fora de ponta.

Tabela 4 – *Dados de fatura de energia: Tarifa Convencional B2 - Rural.*

Dados Gerais	
Tipo de Instalação	Trifásico
Tipo de Tarifação	Convencional
Valor Médio da Fatura (R$)	4.400,00[a]
Tarifa de Energia (R$/kWh)	1,01
$TUSD_{fioB}$ (R$/kWh)	0,37
Dados de Consumo Mensal (kWh)	
Janeiro	4405
Fevereiro	4387
Março	4366
Abril	4423
Maio	4275
Junho	4393
Julho	4366
Agosto	4462
Setembro	4280
Outubro	4260
Novembro	4205
Dezembro	4450

[a] Este valor corresponde a uma estimativa aproximada da fatura, utilizada exclusivamente para fins de comparação entre a tarifa convencional e a tarifa branca, garantindo que ambas apresentem valores equivalentes. Ressalta-se que o valor da fatura é uma entrada fornecida pelo usuário e pode incluir outros itens de despesa além do consumo de energia, como taxa de iluminação pública, descontos ou incentivos, e bandeiras tarifárias.

As tarifas apresentadas foram obtidas conforme a Resolução Homologatória ANEEL Nº 3.407, de 15 de Outubro de 2024, e aplicadas pela concessionária Equatorial Goiás. Para o cálculo das tarifas, foram considerados os impostos previstos pela legislação vigente, sendo o ICMS com alíquota de 19%, o PIS/PASEP de 1,6% e a COFINS de 7,4%. Esses valores refletem os valores médios praticados pela Equatorial Goiás, considerando as condições tributárias que incidem sobre as

Tabela 5 – *Dados de fatura de energia: Tarifa Branca B2 - Rural.*

Dados Gerais	
Tipo de Instalação	Trifásico
Tipo de Tarifação	Branca
Valor Médio da Fatura (R$)	4.400,00[a]
Tarifa fora ponta (R$/kWh)	0,82
$TUSD_{fioB}$ fora ponta (R$/kWh)	0,23
Tarifa intermediário (R$/kWh)	1,37
$TUSD_{fioB}$ intermediário (R$/kWh)	0,68
Tarifa ponta (R$/kWh)	2,13
$TUSD_{fioB}$ ponta (R$/kWh)	1,13
Tarifa Convencional (R$/kWh)	1,01

Postos Tarifários	
Intermediário 1	16:00 - 18:00
Ponta	18:00 - 21:00
Intermediário 2	21:00 - 22:00

Dados de Consumo Mensal (kWh)			
Mês	**Fora Ponta**	**Intermediário**	**Ponta**
Janeiro	3370	900	220
Fevereiro	3100	950	240
Março	3150	980	250
Abril	3300	880	280
Maio	3100	890	310
Junho	3350	880	280
Julho	3300	900	290
Agosto	3400	940	270
Setembro	3250	830	290
Outubro	3220	950	200
Novembro	2800	990	190
Dezembro	3050	800	180

[a] Este valor corresponde a uma estimativa aproximada da fatura, utilizada exclusivamente para fins de comparação entre a tarifa convencional e a tarifa branca, garantindo que ambas apresentem valores equivalentes. Ressalta-se que o valor da fatura é uma entrada fornecida pelo usuário e pode incluir outros itens de despesa além do consumo de energia, como taxa de iluminação pública, descontos ou incentivos, e bandeiras tarifárias.

tarifas de energia elétrica, conforme regulamentado pela ANEEL e adotados pela concessionária

O valor adotado de R$ 4.400,00 para a fatura mensal foi calculado considerando as tarifas atuais, Convencional e Branca, da concessionária Equatorial Goiás e um plantel de 2.200 animais. Com base no consumo típico de suinoculturas, que é em média de 1,98 kWh/animal/mês (Silva *et al.*, 2018), o consumo total estimado para o plantel é de aproximadamente 4.356 kWh/mês. Esse consumo pode variar em função do uso de equipamentos como ventiladores, sistemas de climatização, ilu-

minação e bombas d'água, além de variações climáticas e no nível de automação das instalações (Silva *et al.*, 2018). Os valores de consumo para cada mês e para cada posto tarifário, tanto na tarifa Convencional quanto na tarifa Branca, foram definidos aleatoriamente, de forma a manter a média anual de 4.356 kWh/mês.

Na Tabela 6, são apresentados os dados do sistema fotovoltaico projetado para uma suinocultura hipotética localizada em Aparecida de Goiânia - GO, incluindo suas principais características técnicas e econômicas. Os valores econômicos foram determinados com base em uma pesquisa de mercado, garantindo que os custos representem as condições práticas e atuais do setor. O custo unitário do sistema abrange tanto os equipamentos quanto a instalação.

Tabela 6 – *Dados do Sistema Fotovoltaico.*

Dados Técnicos	
Cidade	Aparecida de Goiânia
Irradiação Solar Média (kWh/m²/dia)	5,256
Potência Nominal (kWp)	10
Performance Ratio (%)	80
Fator de Degradação Anual (%)	1
Vida Útil do Sistema (anos)	25
Vida Útil do Inversor (anos)	15

Dados Econômicos	
Custo Total do Sistema (R$/kWp)	5.000
Custo de Substituição dos Inversores (R$/kWp)	800
Custo Anual de Manutenção (R$/kW/ano)	100

A Tabela 7 apresenta os dados referentes ao sistema de biogás para uma suinocultura hipotética localizada em Aparecida de Goiânia - GO, detalhando suas principais características técnicas e econômicas. Os parâmetros técnicos de produção de biogás e conversão em energia elétrica são condizentes com os valores utilizados no estado da arte (Bernardes *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022; Araujo; Oliveira, 2023; Pinto *et al.*, 2023).

O modo de operação do gerador elétrico pode ser configurado pelo usuário para alternar entre os estados ligado e desligado ao longo das 24 horas do dia, conforme as necessidades energéticas e a disponibilidade de biogás. Essa configuração flexível permite otimizar o uso do combustível e maximizar a eficiência do sistema.

Os valores atribuídos ao Custo do Sistema Biogás e à Manutenção Anual do Sistema Biogás foram obtidos no relatório técnico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2022 (Brasil, 2022b). O documento apresenta informações detalhadas sobre os custos associados a diferentes sistemas de geração de energia, incluindo tecnologias baseadas em biogás. De acordo com o relatório, os valores de custo de implantação para esses

Tabela 7 – *Dados do Sistema Biogás.*

Dados Técnicos	
Número de Animais	2200
Potência do Grupo Motor Gerador (kW)	10
Produção Média de Dejetos por Animal (kg/dia)	1
Produção de Biogás por kg de Dejetos (m^3/kg)	0,1
Poder Calorífico Inferior do Biogás (kWh/m^3)	6
Eficiência do Grupo Motor Gerador (%)	15
Eficiência do Gerador (%)	92,5
Fator de Degradação Anual (%)	1
Vida Útil do Sistema (anos)	20
Dados Econômicos	
Custo do Sistema Biogás (R$/kW)	10.000
Manutenção Anual (R$/kW/ano)	500
Modo de Operação do Gerador Elétrico	
Ver Tabela 12	

sistemas variam entre 7.500 e 23.000 R$/kW, enquanto o custo de manutenção é estimado em 500 R$/kW por ano, sendo utilizado como referência para análises de viabilidade econômica no setor energético brasileiro.

Os formulários de entrada referentes ao financiamento utilizam os principais parâmetros financeiros aplicáveis a esses sistemas. Para ambos os sistemas, fotovoltaico e biogás, o financiamento considerado cobre 80% do investimento total, assegurando que a maior parte dos custos de implantação será financiada, enquanto os 20% restantes serão custeados com recursos próprios. A modalidade adotada para ambos é o Sistema de Amortização Constante (SAC), que se caracteriza por prestações decrescentes ao longo do período de pagamento, proporcionando maior previsibilidade e controle financeiro (Tabela 8).

Tabela 8 – *Dados de Financiamento para os Sistemas de Biogás e Fotovoltaico.*

Parâmetros	**Sistema Biogás**	**Sistema Fotovoltaico**
Tipo de Financiamento	SAC	SAC
Percentual do Investimento Financiado (%)	80%	80%
Taxa Anual de Juros (%)	15%	15%
Número de Prestações	36	24

A Tabela 9 apresenta os dados referentes às taxas de desconto utilizadas no cálculo dos indicadores econômicos. Esses valores incluem a TMA para o cálculo do VPL e do *Payback* Descontado, além das taxas de reinvestimento e financiamento, empregadas na determinação da TIRM.

Tabela 9 – *Dados para os indicadores econômicos.*

TMA para o VPL (% a.a.)	12
TMA para o *Payback* Descontado (% a.a.)	12
Taxa de Reinvestimento (TIRM) (% a.a.)	12
Taxa de Financiamento (TIRM) (% a.a.)	15

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados dos financiamentos dos sistemas de biogás e fotovoltaico, respectivamente. Os financiamentos foram estruturados pelo SAC, caracterizado por prestações decrescentes ao longo do período de pagamento. Em ambos os casos, o valor total a ser pago contempla os encargos financeiros incidentes sobre o montante financiado, com prestações iniciais e finais calculadas de acordo com as condições estabelecidas para cada financiamento.

Tabela 10 – *Resultados de Financiamento do Sistema Biogás.*

Informação de Financiamento	**Valor**
Tipo de financiamento	SAC
Valor total financiado (R$)	80.000,00
Taxa anual de juros (%)	15,00
Número de prestações	36
Prestação inicial (R$)	3.159,42
Prestação final (R$)	2.248,26
Montante total a ser pago (R$)	97.338,08

Tabela 11 – *Resultados de Financiamento do Sistema Fotovoltaico.*

Informação de Financiamento	**Valor**
Tipo de financiamento	SAC
Valor total financiado (R$)	40.000,00
Taxa anual de juros (%)	15,00
Número de prestações	24
Prestação inicial (R$)	2.135,26
Prestação final (R$)	1.686,19
Montante total a ser pago (R$)	45.857,46

As Tabelas 12 e 13 apresentam os fluxos de energia para as tarifações Convencional e Branca, respectivamente. Para cada hora do dia, são mostrados os fluxos entre o sistema de biogás, o sistema fotovoltaico, as cargas da suinocultura e a rede elétrica da concessionária, considerando um único dia representativo de um mês, com fins ilustrativos.

No caso da tarifa Convencional (Tabela 12), o consumo diário foi distribuído de maneira uniforme ao longo das horas, uma vez que essa tarifa é monômia ou *flat*, ou seja, não há variação no preço da energia conforme o horário. No caso da tarifa Branca, o consumo foi distribuido conforme os horários dos postos tarifários.

Tabela 12 – *Fluxo de Energia: Tarifa Convencional.*

Hora	Modo Biogás	Geração Fotovoltaica (kWh)	Geração Biogás (kWh)	Consumo Edificação (kWh)	Autoconsumo (kWh)	Energia Consumida da Rede (kWh)	Energia Injetada na Rede (kWh)
0	Desligado	0,0	0	5,97	0,0	5,97	0
1	Desligado	0,0	0	5,97	0,0	5,97	0
2	Desligado	0,0	0	5,97	0,0	5,97	0
3	Desligado	0,0	0	5,97	0,0	5,97	0
4	Desligado	0,0	0	5,97	0,0	5,97	0
5	Desligado	0,0	0	5,97	0,0	5,97	0
6	Desligado	0,82	0	5,97	0,82	5,15	0
7	Desligado	2,28	0	5,97	2,28	3,69	0
8	Desligado	3,45	0	5,97	3,45	2,51	0
9	Desligado	4,33	0	5,97	4,33	1,64	0
10	Desligado	4,92	0	5,97	4,92	1,05	0
11	Desligado	5,21	0	5,97	5,21	0,76	0
12	Desligado	5,21	0	5,97	5,21	0,76	0
13	Desligado	4,92	0	5,97	4,92	1,05	0
14	Desligado	4,33	0	5,97	4,33	1,64	0
15	Desligado	3,45	0	5,97	3,45	2,51	0
16	Ligado	2,28	9,24	5,97	5,97	0,0	5,56
17	Ligado	0,82	9,24	5,97	5,97	0,0	4,09
18	Ligado	0,0	9,24	5,97	5,97	0,0	3,28
19	Ligado	0,0	9,24	5,97	5,97	0,0	3,28
20	Ligado	0,0	9,24	5,97	5,97	0,0	3,28
21	Ligado	0,0	9,24	5,97	5,97	0,0	3,28
22	Desligado	0,0	0	5,97	0,0	5,97	0
23	Desligado	0,0	0	5,97	0,0	5,97	0

Tabela 13 – *Fluxo de Energia: Tarifa Branca.*

Hora	Modo Biogás	Geração Fotovoltaica (kWh)	Geração Biogás (kWh)	Consumo Edificação (kWh)	Autoconsumo (kWh)	Energia Consumida da Rede (kWh)	Energia Injetada na Rede (kWh)
0	Desligado	0,0	0	4,7	0,0	4,7	0
1	Desligado	0,0	0	4,7	0,0	4,7	0
2	Desligado	0,0	0	4,7	0,0	4,7	0
3	Desligado	0,0	0	4,7	0,0	4,7	0
4	Desligado	0,0	0	4,7	0,0	4,7	0
5	Desligado	0,0	0	4,7	0,0	4,7	0
6	Desligado	0,82	0	4,7	0,82	3,88	0
7	Desligado	2,28	0	4,7	2,28	2,42	0
8	Desligado	3,45	0	4,7	3,45	1,25	0
9	Desligado	4,33	0	4,7	4,33	0,37	0
10	Desligado	4,92	0	4,7	4,7	0,0	0,22
11	Desligado	5,21	0	4,7	4,7	0,0	0,51
12	Desligado	5,21	0	4,7	4,7	0,0	0,51
13	Desligado	4,92	0	4,7	4,7	0,0	0,22
14	Desligado	4,33	0	4,7	4,33	0,37	0
15	Desligado	3,45	0	4,7	3,45	1,25	0
16	Ligado	2,28	9,24	15,02	11,52	3,49	0
17	Ligado	0,82	9,24	15,02	10,06	4,96	0
18	Ligado	0,0	9,24	3,79	3,79	0,0	5,45
19	Ligado	0,0	9,24	3,79	3,79	0,0	5,45
20	Ligado	0,0	9,24	3,79	3,79	0,0	5,45
21	Ligado	0,0	9,24	15,02	9,24	5,77	0
22	Desligado	0,0	0	4,7	0,0	4,7	0
23	Desligado	0,0	0	4,7	0,0	4,7	0

A geração de energia fotovoltaica ocorre entre as 6h e as 18h, com pico de geração às 12h, período em que o sistema fotovoltaico atende às cargas da

suinocultura, com o excedente sendo injetado na rede elétrica. O fluxo de energia do sistema biogás é condicionado ao seu modo de operação, configurado pelo usuário no início da simulação. O modo ligado resulta na soma da geração de energia do sistema de biogás com a geração fotovoltaica para suprir as cargas e injetar o excesso na rede elétrica. As colunas que indicam a energia injetada na rede e a energia consumida da rede representam as trocas de energia com a rede elétrica, sendo usadas para o cálculo do faturamento no SCEE, impactando o saldo de créditos e débitos.

O sistema de biogás apresenta uma importância similar nas duas tarifas ao garantir o fornecimento de energia nas horas de pico e durante a noite, mas sua contribuição é mais estratégica na tarifa Branca, já que essa tarifa permite uma gestão mais eficiente do consumo, favorecendo a geração própria e a minimização de custos com energia da rede em horários de alta demanda e custo elevado.

As Tabelas de 14 a 17 apresentam os fluxos de caixa para os casos das tarifas Convencional e Branca, respectivamente, destacando as principais fontes de receita e custos ao longo de 20 anos. A principal fonte de receita é a economia gerada na fatura de energia elétrica, resultante da instalação dos sistemas fotovoltaico e biogás. O fluxo de caixa líquido, calculado ao longo de cada ano, reflete o impacto dessa economia, juntamente com outros custos operacionais. A última linha de cada tabela representa o fluxo de caixa líquido, que é utilizado para calcular os indicadores econômicos do investimento.

O investimento inicial no ano zero é líquido, pois inclui o valor recebido por meio do financiamento dos sistemas fotovoltaico e biogás, refletindo o desembolso realizado com recursos próprios. Até o terceiro ano, observa-se um fluxo de caixa negativo devido aos pagamentos das prestações do financiamento, com o sistema fotovoltaico (24 meses) e o sistema biogás (36 meses). A partir do quarto ano para a tarifa Convencional e terceiro ano para a tarifa Branca , o fluxo de caixa líquido se torna positivo, com as economias na fatura de energia superando os custos operacionais. Entretanto, vale destacar que o valor positivo apresentado não representa o *Payback*, pois ele se refere ao fluxo de caixa do ano específico e não ao saldo acumulado. O *Payback* ocorre quando os fluxos líquidos, descontados pela TMA e acumulados, igualam-se ao investimento inicial.

Observa-se, no último ano do fluxo de caixa líquido, um aumento considerável em seu valor devido à inserção do valor residual do sistema fotovoltaico, uma vez que sua vida útil é de 25 anos, superior à do sistema biogás, que é de 20 anos. Assim, ao final do ciclo de vida do sistema biogás, o valor residual do sistema fotovoltaico é incluído no fluxo de caixa, refletindo a sua vida útil restante. Esse ajuste resulta em um aumento no fluxo de caixa líquido no último ano, o que contribui para a valorização do projeto, já que o sistema fotovoltaico ainda mantém valor após o

término do ciclo de vida do biogás.

Tabela 14 – *Resultado do fluxo de caixa: Tarifa Convencional (Parte 1/2).*

Descrição	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
(+) Receita Bruta											
Economia da fatura de energia	0,00	32.762,07	32.482,86	32.206,43	31.932,77	31.661,85	31.393,64	31.128,10	30.865,23	30.604,98	30.347,33
Valor residual do SFCR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Custos Operacionais											
Manutenção do Sistema Biogás	0,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Manutenção do Sistema Fotovoltaico	0,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Prestações Financiamento Biogás	0,00	36.194,80	32.446,03	28.697,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Prestações Financiamento Fotovoltaico	0,00	24.334,52	21.522,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(+) Financiamento											
Valor Financiado Biogás	80.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Financiado Fotovoltaico	40.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Custos de Investimento											
Custo do Sistema Biogás	100.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo do Sistema Fotovoltaico	50.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Troca de inversor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(=) Fluxo de caixa líquido	-30.000,00	-33.767,25	-27.486,11	-2.490,82	25.932,77	25.661,85	25.393,64	25.128,10	24.865,23	24.604,98	24.347,33

Tabela 15 – *Resultado do fluxo de caixa: Tarifa Convencional (Parte 2/2).*

Descrição	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
(+) Receita Bruta										
Economia da fatura de energia	30.092,26	29.839,75	29.589,75	29.342,26	29.097,24	28.854,67	28.614,53	28.376,79	28.141,43	27.908,42
Valor residual do SFCR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10.000,00
(-) Custos Operacionais										
Manutenção do Sistema Biogás	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Manutenção do Sistema Fotovoltaico	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Prestações Financiamento Biogás	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Prestações Financiamento Fotovoltaico	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(+) Financiamento										
Valor Financiado Biogás	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Financiado Fotovoltaico	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Custos de Investimento										
Custo do Sistema Biogás	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo do Sistema Fotovoltaico	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Troca de inversor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(=) Fluxo de caixa líquido	24.092,26	23.839,75	23.589,75	23.342,26	23.097,24	22.854,67	22.614,53	22.376,79	22.141,43	31.908,42

Tabela 16 – *Resultado do fluxo de caixa: Tarifa Branca (Parte 1/2).*

Descrição	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
(+) **Receita Bruta**											
Economia da fatura de energia	0,00	40.121,06	39.765,04	39.412,43	39.061,76	38.712,74	38.365,94	38.021,79	37.681,09	37.343,66	37.009,09
Valor residual do SFCR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) **Custos Operacionais**											
Manutenção do Sistema Biogás	0,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Manutenção do Sistema Fotovoltaico	0,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Prestações Financiamento Biogás	0,00	36.194,80	32.446,03	28.697,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Prestações Financiamento Fotovoltaico	0,00	24.334,52	21.522,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(+) Financiamento											
Valor Financiado Biogás	80.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Financiado Fotovoltaico	40.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) **Custos de Investimento**											
Custo do Sistema Biogás	100.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo do Sistema Fotovoltaico	50.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Troca de inversor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(=) Fluxo de caixa líquido	-30.000,00	-26.408,26	-20.203,92	4.715,18	33.061,76	32.712,74	32.365,94	32.021,79	31.681,09	31.343,66	31.009,09

Tabela 17 – *Resultado do fluxo de caixa: Tarifa Branca (Parte 2/2).*

Descrição	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
(+) Receita Bruta										
Economia da fatura de energia	36.677,30	36.347,89	36.021,51	35.698,39	35.378,51	35.061,82	34.748,25	34.437,33	34.129,53	33.824,80
Valor residual do SFCR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10.000,00
(-) Custos Operacionais										
Manutenção do Sistema Biogás	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Manutenção do Sistema Fotovoltaico	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Prestações Financiamento Biogás	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Prestações Financiamento Fotovoltaico	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(+) Financiamento										
Valor Financiado Biogás	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Financiado Fotovoltaico	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Custos de Investimento										
Custo do Sistema Biogás	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo do Sistema Fotovoltaico	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Troca de inversor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(=) Fluxo de caixa líquido	30.677,30	30.347,89	30.021,51	29.698,39	29.378,51	29.061,82	28.748,25	28.437,33	28.129,53	37.824,80

O fluxo de caixa da tarifa Branca se destaca por proporcionar uma maior economia ao longo do tempo, quando comparado à tarifa Convencional, devido à maior redução na fatura de energia. Os custos de manutenção e as prestações do financiamento são semelhantes em ambos os cenários, mas a tarifa Branca oferece uma recuperação financeira mais rápida, com saldos positivos mais cedo. Em ambos os casos, a quitação dos financiamentos no início do período resulta em um aumento substancial do fluxo de caixa líquido nos anos subsequentes, tornando os sistemas de energia híbridos (solar + biogás) financeiramente viáveis e sustentáveis no longo prazo.

As Tabelas 18 e 19 apresentam os indicadores econômicos calculados para o caso base, considerando as tarifas Convencional e Branca, respectivamente. Em ambos os cenários, os resultados evidenciam a viabilidade econômica do projeto, demonstrando que a instalação do sistema híbrido fotovoltaico-biogás é um investimento financeiramente viável, conforme as premissas adotadas para os dados de entrada.

Tabela 18 – *Indicadores econômicos do Caso Base: Tarifa Convencional.*

Indicador Econômico	**Valor**	**Interpretação**
VPL (R$)	45.129,20	Projeto viável (VPL $\geq$ 0)
Payback Descontado (anos)	10,08	Projeto viável (*Payback* $\leq$ Vida útil)
TIRM Anual (%)	14,46	Projeto viável (TIRM $\geq$ TMA)

Tabela 19 – *Indicadores econômicos do Caso Base: Tarifa Branca.*

Indicador Econômico	**Valor**	**Interpretação**
VPL (R$)	99150,63	Projeto viável (VPL $\geq$ 0)
Payback Descontado (anos)	6,67	Projeto viável (*Payback* $\leq$ Vida útil)
TIRM Anual (%)	17,04	Projeto viável (TIRM $\geq$ TMA)

No cenário da tarifa Convencional, o VPL alcançou R$ 45.129,20, indicando que o projeto gera valor adicional superior ao custo do capital e, portanto, é viável. O *Payback* Descontado, com um valor de 10,08 anos, está dentro de um intervalo razoável considerando a vida útil dos sistemas (20 anos), o que reforça a viabilidade do investimento. A TTIRM anual de 14,46% também está acima da TMA de 12%, indicando um retorno superior ao mínimo exigido para o projeto ser considerado financeiramente atrativo.

No cenário da tarifa Branca, os indicadores apresentam valores mais favoráveis, refletindo uma melhoria no desempenho econômico do projeto. O VPL foi de

R$ 99.150,63, substancialmente superior ao valor obtido no cenário da tarifa Convencional, o que demonstra um incremento significativo na rentabilidade. O *Payback* Descontado foi reduzido para 6,67 anos, indicando que o retorno do investimento ocorre de forma mais rápida, o que é um indicativo de maior atratividade financeira. A TIRM anual alcançou 17,04%, também superior à TMA de 12%, o que sugere que o projeto oferece um retorno ainda mais atrativo sob essa modalidade tarifária.

Além disso, no cenário da tarifa Branca, o sistema biogás foi programado para operar apenas durante os períodos de tarifa intermediária e ponta, totalizando 6 horas diárias de funcionamento. Essa estratégia contribui para uma significativa economia na fatura de energia, aproveitando os horários de maior custo de eletricidade. Adicionalmente, a operação do sistema biogás em horários específicos reduz o desgaste do grupo motor gerador, o que, por sua vez, diminui os custos com manutenção e prolonga a vida útil do equipamento. Esses fatores combinados tornam o projeto mais eficiente, tanto do ponto de vista econômico quanto operacional, evidenciando o potencial de otimização de custos no longo prazo.

5.2 Análise de sensibilidade

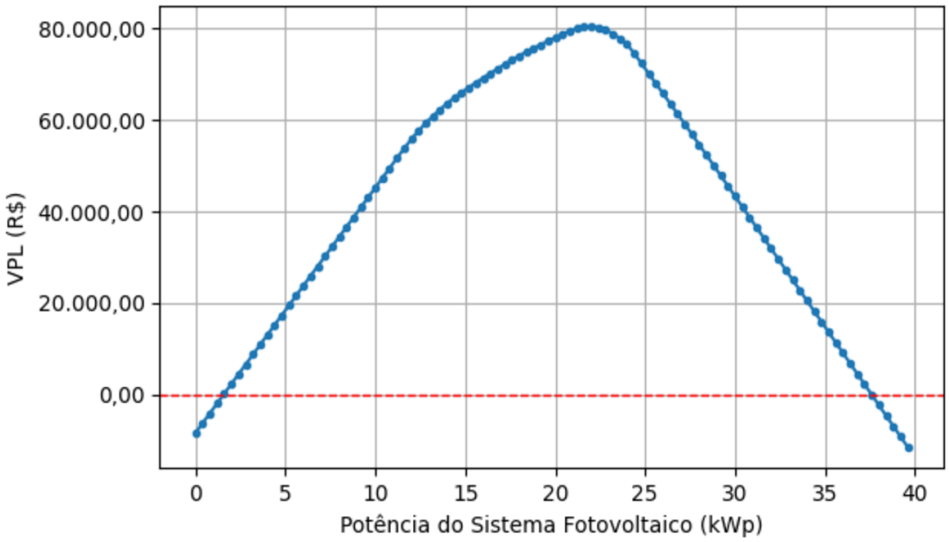
Esta seção de análise de sensibilidade tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaico e biogás sob diferentes condições, como potência, custo e TMA, em dois regimes tarifários: a tarifa Convencional e a tarifa Branca. A sensibilidade desses parâmetros permite identificar os limites e as faixas dentro das quais o projeto continua sendo economicamente viável, oferecendo uma visão detalhada sobre como as variáveis impactam o retorno financeiro do investimento.

5.2.1 Potência do Sistema Fotovoltaico

A análise de sensibilidade da potência do sistema fotovoltaico para a tarifa Convencional, ilustrada na Figura 24, mostra que a potência ótima é de 22,0 kW, com um VPL de R$ 80.381,65. A faixa de potências viáveis para o projeto é determinada entre 1,6 kW (potência mínima viável) e 37,6 kW (potência máxima viável). Isso indica que o projeto pode ser implementado com diferentes configurações de potência, desde que esteja dentro dessa faixa. Essa flexibilidade permite que o projeto seja adaptado a diferentes necessidades e condições de mercado, mantendo sua viabilidade econômica.

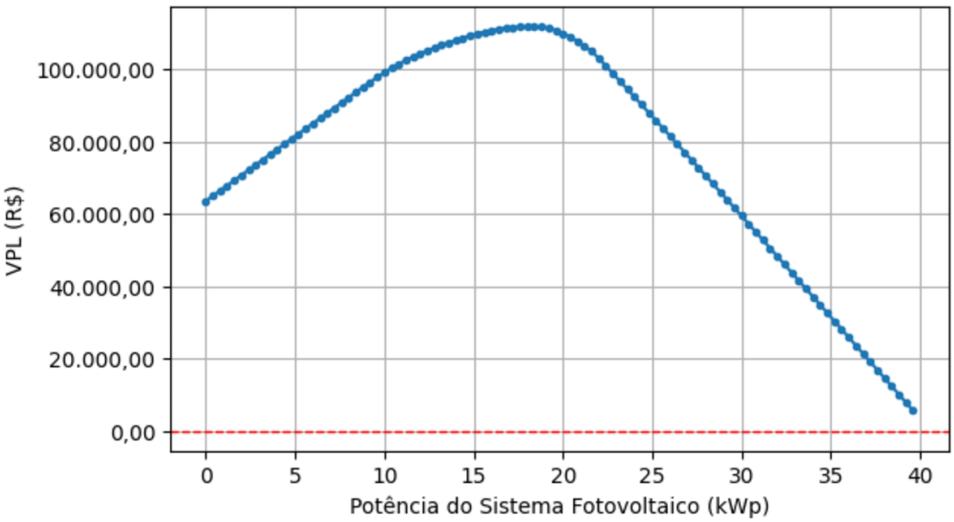
Por outro lado, para a tarifa Branca, conforme ilustra a Figura 25 a potência ótima é de 18,4 kW, com um VPL significativamente maior, de R$ 111.955,16. Ao contrário da tarifa Convencional, a faixa de potência viável não é limitada por

Figura 24 – *Análise de sensibilidade da potência do SFCR: Tarifa Convencional.*



um valor mínimo ou máximo, o que implica que o projeto é viável para qualquer potência dentro do intervalo considerado. Isso sugere que, sob a tarifa Branca, o sistema fotovoltaico pode ser ajustado para uma maior flexibilidade em termos de dimensionamento, e a maior rentabilidade é obtida com uma potência de 18,4 kW. A comparação entre as duas tarifas indica que, enquanto a tarifa Convencional oferece um intervalo mais restrito de potências viáveis, a tarifa Branca permite uma maior liberdade no dimensionamento do sistema, com um retorno financeiro superior.

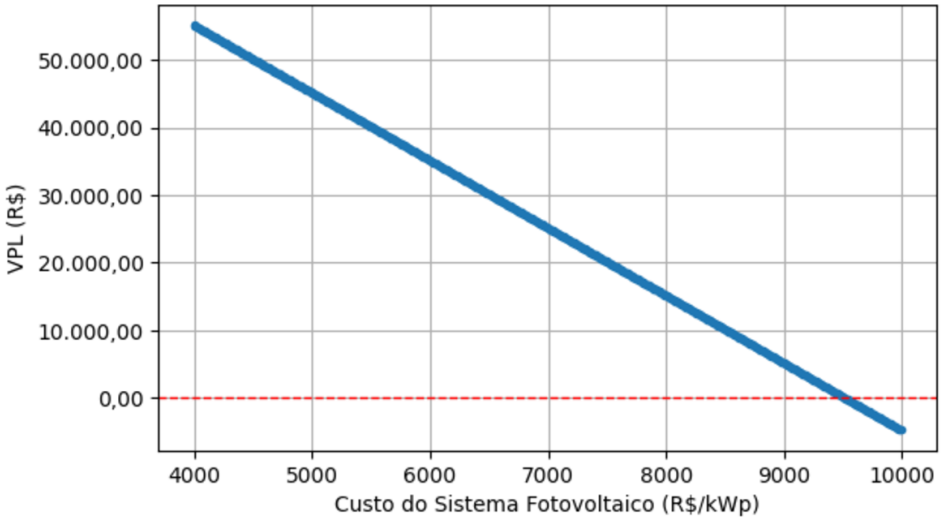
Figura 25 – *Análise de sensibilidade da potência do SFCR: Tarifa Branca.*



5.2.2 Custo do Sistema Fotovoltaico

A análises de sensibilidade do custo do sistema fotovoltaico indica que para a tarifa Convencional, conforme ilustrado na Figura 26, o projeto é viável para custos abaixo de R$ 9.510,00 por kWp. Isso significa que, enquanto o custo do sistema fotovoltaico se mantiver abaixo desse limite, o projeto mantém-se economicamente atraente. Contudo, com o aumento do custo por kWp, o VPL diminui significativamente, o que reduz a rentabilidade do investimento.

Figura 26 – *Análise de sensibilidade do custo do SFCR: Tarifa Convencional.*

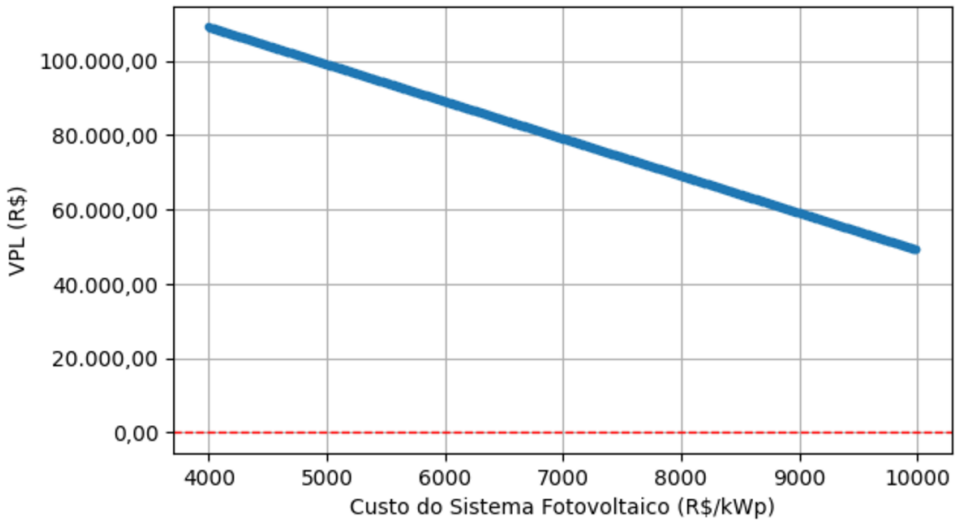


Para a tarifa Branca, conforme a Figura 27, o projeto é viável para todos os valores dentro da faixa de custo de R$ 4.000,00 a R$ 10.000,00 por kWp. Isso indica uma maior flexibilidade em relação ao custo do sistema fotovoltaico em comparação com a tarifa Convencional, com o VPL permanecendo positivo dentro de uma faixa mais ampla de custos. A comparação entre as duas tarifas demonstra que, sob a tarifa Branca, o projeto fotovoltaico pode ser implementado com custos maiores sem comprometer a viabilidade econômica, o que é uma vantagem significativa para os investidores.

5.2.3 Potência do Sistema Biogás

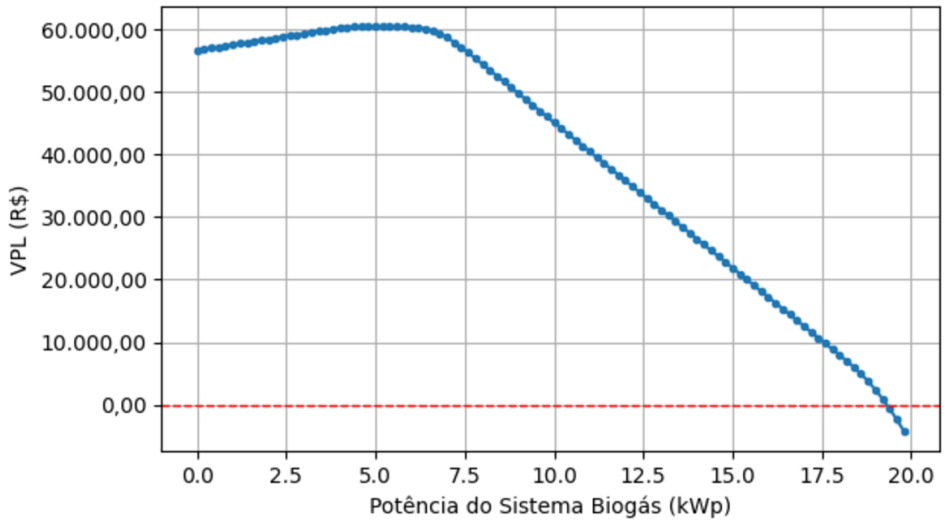
As análises de sensibilidade da potência do sistema biogás, tanto para a tarifa Convencional quanto para a tarifa Branca, revelam diferentes faixas de potência viável para a implementação do projeto. Para a tarifa Convencional, conforme apresentado na Figura 28, o projeto é viável para potências entre 0,0 kW e 19,4 kW, com a potência ótima estimada em 5,2 kW, resultando em um VPL de R$ 60.545,09. Isso indica que o projeto pode ser adaptado a uma variedade de

Figura 27 – *Análise de sensibilidade do custo do SFCR: Tarifa Branca.*



potências, proporcionando flexibilidade no dimensionamento do sistema biogás, de acordo com a demanda de energia e os custos envolvidos.

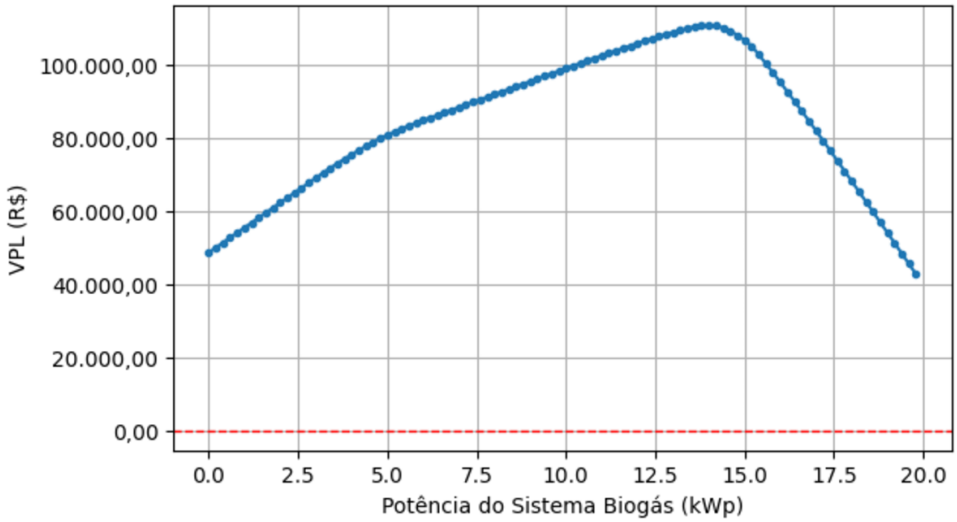
Figura 28 – *Análise de sensibilidade da potência do SBCR: Tarifa Convencional.*



No caso da tarifa Branca, a Figura 29 revela uma potência ótima maior, de 14,0 kW, com um VPL de R$ 111.017,66. A diferença no valor da potência ótima pode ser explicada pela estrutura de preços da tarifa Branca, que apresenta tarifas mais altas durante os horários de ponta e intermediário. Com esses horários de maior custo, a produção de energia durante esses períodos traz benefícios econômicos adicionais, o que torna vantajoso aumentar a potência do sistema biogás. O maior VPL e a potência ótima superior indicam que, sob a tarifa Branca, o sistema

biogás se torna mais rentável à medida que a potência aumenta, aproveitando as tarifas elevadas e maximizando o retorno econômico do projeto. Isso explica a maior atratividade da tarifa Branca, em comparação com a tarifa Convencional, para o projeto de biogás.

Figura 29 – *Análise de sensibilidade da potência do SBCR: Tarifa Branca.*



5.2.4 Custo do Sistema Biogás

As análises de sensibilidade do custo do sistema biogás, tanto para a tarifa Convencional quanto para a tarifa Branca, evidenciam as faixas de custo dentro das quais o projeto permanece viável. Para a tarifa Convencional, conforme apresentado na Figura 30, o custo limite do sistema biogás foi determinado em R$ 14.400,00 por kW. Isso significa que o projeto permanece viável para custos abaixo desse valor. A sensibilidade do sistema mostra que, à medida que o custo por kW aumenta, o VPL do projeto diminui, indicando uma relação inversamente proporcional entre o custo do sistema e a viabilidade econômica.

Por outro lado, para a tarifa Branca, a Figura 31 indica que o projeto é viável para todos os valores dentro da faixa de custo definida, sem um limite superior claro. Isso sugere que o sistema biogás, sob a tarifa Branca, apresenta uma maior flexibilidade em termos de custos, permitindo que o projeto seja viável em uma ampla gama de valores. A estrutura de tarifas mais altas durante os períodos de ponta e intermediário, típica da tarifa Branca, pode justificar a maior faixa de viabilidade do custo, permitindo que custos mais elevados ainda resultem em um VPL positivo. Dessa forma, a tarifa Branca oferece maior viabilidade para a implementação do sistema biogás em comparação com a tarifa Convencional.

Figura 30 – *Análise de sensibilidade do custo do SBCR: Tarifa Convencional.*

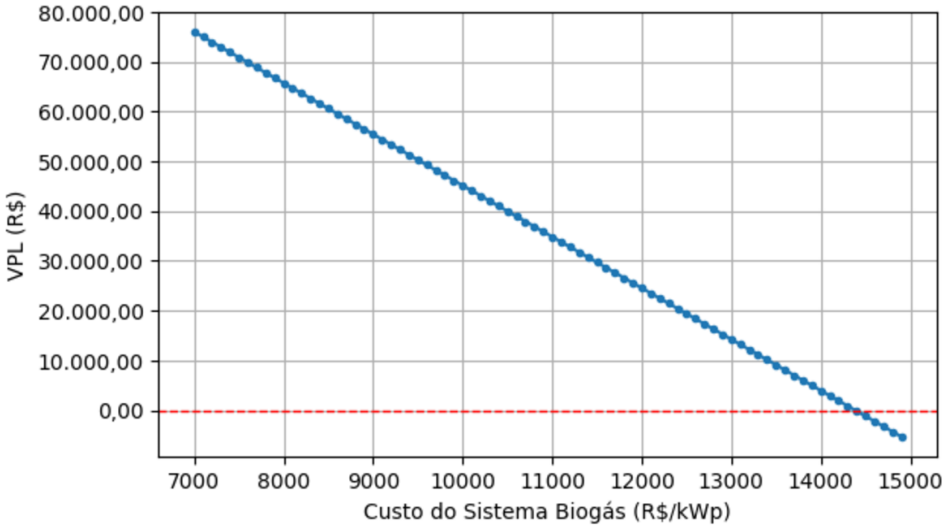
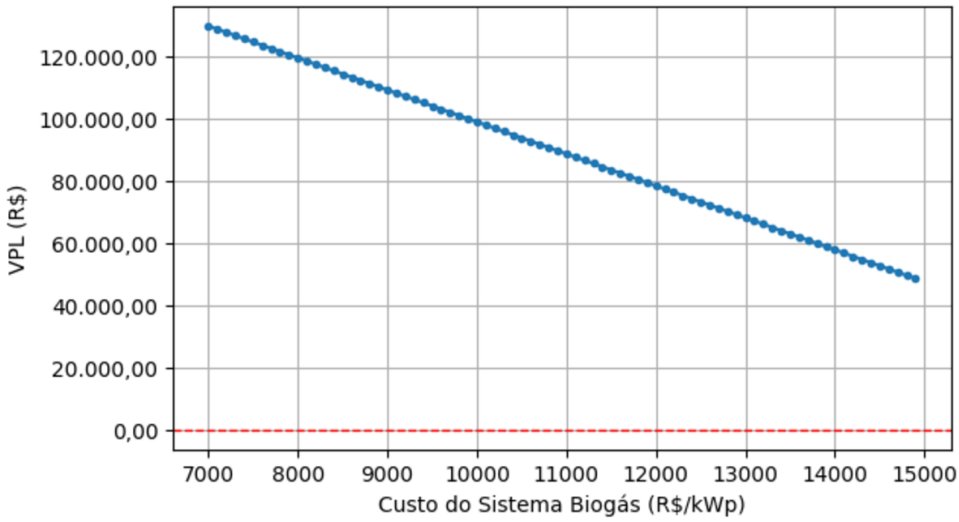


Figura 31 – *Análise de sensibilidade do custo do SBCR: Tarifa Branca.*



5.2.5 Taxa Mínima de Atratividade

A análise de sensibilidade da TMA mostra que o projeto é viável para valores de TMA entre 8% e 15% ao ano, tanto para a tarifa Convencional quanto para a tarifa Branca, com VPL positivo dentro dessa faixa.

A Figura 33 revela que, sob a tarifa Branca, os valores de VPL são superiores aos da tarifa Convencional, conforme indicado na Figura 32. Esse resultado reforça as conclusões anteriores, mostrando que a tarifa Branca, com custos mais elevados nos horários de ponta e intermediário, proporciona maior rentabilidade ao projeto.

Figura 32 – *Análise de sensibilidade da TMA: Tarifa Convencional.*

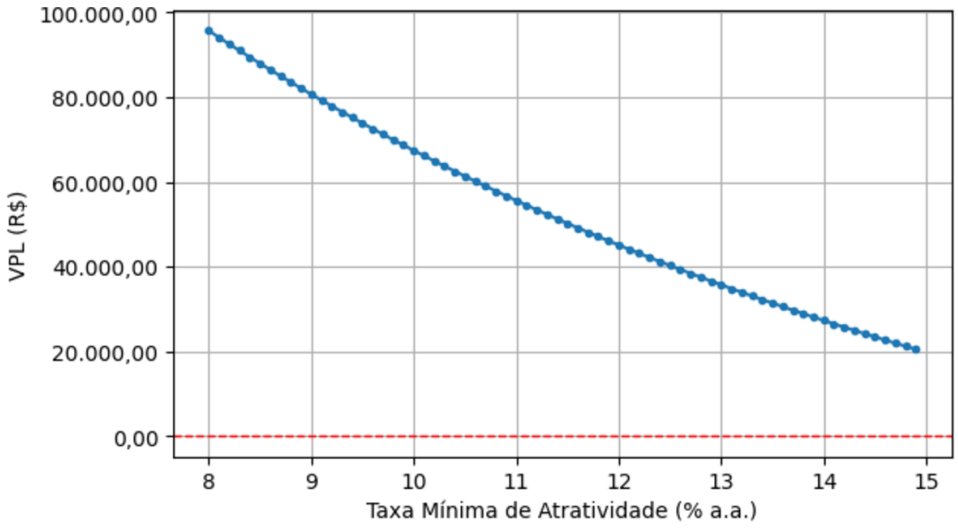
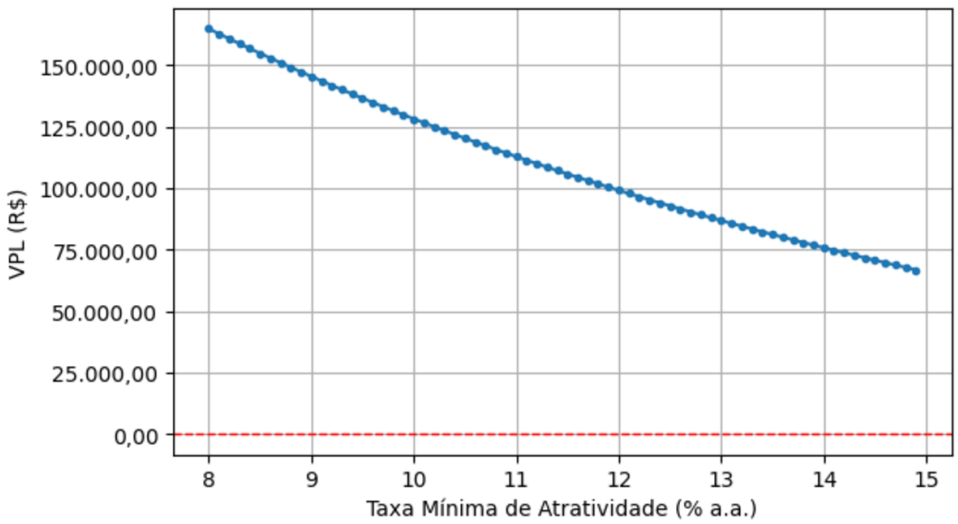


Figura 33 – *Análise de sensibilidade da TMA: Tarifa Branca.*



CAPÍTULO 6

Conclusão

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho sobre o desenvolvimento e aplicação da ferramenta SuinoPower, voltada à análise técnica e econômica de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás em suinoculturas. Incorporando aspectos técnicos e econômicos, e considerando as especificidades do SCEE e as opções tarifárias Convencional e Branca do Grupo B2 - Rural, a SuinoPower foi concebida para oferecer suporte abrangente à tomada de decisão em projetos que visam a sustentabilidade e a eficiência energética.

A ferramenta destaca-se por permitir a avaliação integrada de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás, analisando indicadores econômicos como o VPL, o *Payback* Descontado e a TIRM. Além disso, considera o fluxo energético entre as fontes de geração e a demanda da suinocultura, possibilitando a identificação de limites de viabilidade técnica e econômica. Funcionalidades adicionais incluem a análise de sensibilidade, que avalia o impacto de variáveis críticas, como o custo do sistema fotovoltaico, o custo do sistema de biogás, a potência nominal do sistema fotovoltaico, a potência nominal do sistema de biogás e a TMA. Essa funcionalidade permite identificar os parâmetros mais influentes no desempenho do projeto e otimizar o planejamento para diferentes cenários e condições.

Desenvolvida como uma aplicação *web*, a SuinoPower elimina a necessidade de instalação local, oferecendo uma interface intuitiva e organizada que facilita a entrada de dados e a interpretação dos resultados. Ao aliar acessibilidade e usabilidade com uma abordagem técnica detalhada, a ferramenta se consolida como um recurso estratégico para proprietários de suinoculturas e investidores que buscam informações precisas e confiáveis sobre a viabilidade de sistemas híbridos. Dessa forma, a SuinoPower contribui para a promoção de práticas mais sustentáveis e para o avanço da geração descentralizada, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

6.1 Limitações e melhorias futuras

A ferramenta SuinoPower foi desenvolvida com foco em suinoculturas enquadradas como unidades consumidoras do Grupo B2 - Rural, com limitações de potência instalada de até 112,5 kVA. Essa abordagem inicial visa atender a um segmento relevante no contexto agrícola brasileiro. Contudo, reconhecem-se limitações na aplicação da ferramenta para outras escalas de produção, bem como para consumidores fora do Grupo B2.

Melhorias futuras incluem a ampliação para atender projetos de maior escala, como os enquadrados no Grupo A, permitindo a avaliação de sistemas híbridos em unidades com demandas energéticas mais elevadas. Também está prevista a integração de funcionalidades voltadas para sistemas de armazenamento de energia com baterias, o que permitirá maior flexibilidade na gestão energética e potencializará os benefícios econômicos e operacionais dos sistemas híbridos. Além disso, planeja-se incorporar a busca automática de dados, facilitando a coleta e análise de informações relevantes para simulações. Essas evoluções tornarão a SuinoPower ainda mais robusta e abrangente, capaz de atender a uma gama diversificada de cenários e usuários, fortalecendo sua aplicabilidade no setor agropecuário e energético.

Referências

ABCS, Associação Brasileira dos Criadores de Suínos. **Dados de Mercado de Suínos. Balanço 2023**. [S.l.: s.n.], 2023. Relatório. 19, 24

_____. **Retrato da suinocultura brasileira**. [S.l.: s.n.], 2024. 19, 24

ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil - Infográfico**. August 2024. Acessado em 08/08/2024. Disponível em: https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/. 16

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Entenda como funciona a energia solar fotovoltaica**. 2024. Acesso em setembro de 2024. Disponível em: https://www.absolar.org.br/mercado/o-que-e-energia-solar-fotovoltaica/. 26

ALLOUHI, A; SAADANI, R; BUKER, MS; KOUSKSOU, T; JAMIL, A; RAHMOUNE, M. Energetic, economic and environmental (3E) analyses and LCOE estimation of three technologies of pv grid-connected systems under different climates. **Solar Energy**, Elsevier, v. 178, p. 25–36, 2019. 31

ALVARO, Alfonso García; PALOMAR, César Ruiz; TORRE, Raúl Muñoz; REDONDO, Daphne Hermosilla; CRESPO, Ignacio de Godos. Hybridization of anaerobic digestion with solar energy: A solution for isolated livestock farms. **Energy Conversion and Management: X**, v. 20, p. 100488, 2023. ISSN 2590-1745. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174523001447. 16, 19

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL Nº 1.000/2021**. [s.n.], 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html. 28, 29

_____. **Geração Distribuída**. 2024. Acesso em setembro de 2024. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida. 27

_____. **Tarifas**. 2024. Acesso em setembro de 2024. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas. 28, 29

_____. **Procedimentos de Regulação Tarifária (PRORET)**. 2025. Acesso em: 13 jan. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/proret. 28, 29

ARAUJO, Geraldo Jose Ferraresi de; OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. Economic, energetic and environmental analysis of the utilization of swine manure in Brazil: Opportunities and challenges. **Energy Strategy Reviews**, v. 47, p. 101089, 2023. ISSN 2211-467X. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X23000391. 16, 18, 64

BERNARDES, Pedro Alberto Chaib de Sousa; AQUILA, Giancarlo; PAMPLONA, Edson de Oliveira; ROCHA, Luiz Célio Souza; Rotella Junior, Paulo. Net metering and tax incentives for distributed generation in Brazil: Economic impact analysis for swine biogas. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134138, 2022. ISSN 0959-6526. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622037106. 16, 18, 25, 64

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Janeiro 2022. Diário Oficial da União. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. 39, 41

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Power Generation Costs Report 2021**. [S.l.: s.n.], 08 2022. Relatório técnico. 64

CASTRO, Pedro Henrique Gonçalves Rigueira Pinheiro; FILHO, Delly Oliveira; ROSA, André Pereira; GRACIA, Luis Manuel Navas; SILVA, Thais Cristina Almeida. Comparison of externalities of biogas and photovoltaic solar energy for energy planning. **Energy Policy**, v. 188, p. 114070, 2024. ISSN 0301-4215. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421524000909. 19

CIBIOGAS. **Biogasmap - Mapeamento das Plantas de Biogás no Brasil**. [S.l.]: Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás), 2025. Disponível em: https://shre.ink/bvE8. Acesso em: 15 jan. 2025. 23

CIBIOGAS, Centro Internacional de Energias Renováveis: Biogás. **Panorama do Biogás no Brasil 2023**. Foz do Iguaçu: [s.n.], 2024. 22 p. Il. 23, 24

CISER. **Geração Distribuída: 4 Tendências do Mercado de Energia Solar**. 2024. Acesso em setembro de 2024. Disponível em: https:

//blog.ciser.com.br/energia-solar/geracao-distribuida-4-tendencias-do-mercado-de-energia-solar/. 28

FERREIRA, L.R.A.; OTTO, R.B.; SILVA, F.P.; SOUZA, S.N.M.; SOUZA, S.S.; JUNIOR, O.H. Ando. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440–455, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304702. 16, 17, 24, 25

JESUS Ábio Xavier Cardoso de; NETO, Daywes Pinheiro; DOMINGUES, Elder Geraldo. Computational tool for technical-economic analysis of photovoltaic microgeneration in Brazil. **Energy**, v. 271, p. 126962, 2023. ISSN 0360-5442. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223003560. 36, 37

KUMAR, Nallapaneni Manoj; SUBATHRA, M. S. P; MOSES, J. Edwin. On-grid solar photovoltaic system: Components, design considerations, and case study. *In*: **2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 616–619. 27

LIMA, Jessica Aline Menezes; FILHO, Fernando Jorge Correa Magalhães; CONSTANTINO, Michel; FORMAGINI, Edinéia Lazarotto. Techno-economic and performance evaluation of energy production by anaerobic digestion in Brazil: bovine, swine and poultry slaughterhouse effluents. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123332, 2020. ISSN 0959-6526. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620333771. 17

MACHADO, V.A. Machado de Sá; SOUZA, C.G. de; GONçALVES, M.M.B.P. *et al.* Techno-economic feasibility analysis of biogas-solar photovoltaic hybrid system for bioenergy generation: a case study in the municipality of Boa Esperança (Pará, Brazil). **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, p. 18731–18745, 2024. 16, 19

NETO, Daywes Pinheiro. **Processo de otimização aplicada à análise de risco de investimento em geração de energia elétrica com fontes renováveis**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Goiás, 2017. 30, 31

NETO, Daywes Pinheiro; DOMINGUES, Elder Geraldo; COIMBRA, António Paulo; ALMEIDA, Aníbal Traça de; ALVES, Aylton José; CALIXTO, Wesley Pacheco. Portfolio optimization of renewable energy assets: Hydro, wind, and photovoltaic energy in the regulated market in Brazil. **Energy Economics**, Elsevier, v. 64, p. 238–250, 2017. 30

NICITA, A; MAGGIO, G; ANDALORO, APF; SQUADRITO, GJIJ. Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 45, n. 20, p. 11395–11408, 2020. 30

OLIVEIRA, Augusto Cesar Laviola de; FERNANDES, Osmar Rosa; RENATO, Natalia dos Santos; BORGES, Alisson Carraro. Feasibility of using different renewable energy sources in Brazilian swine farmings. **Journal of Cleaner Production**, v. 333, p. 130040, 2022. ISSN 0959-6526. Disponível em: `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621042074`. 18, 64

OLIVEIRA, Paulo Armando Victoria de; HIGARASHI, Martha Mayumi. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia: [s.n.], 2006. 42 p. (Embrapa Suínos e Aves. Documentos, 115). Projeto de controle da degradação ambiental decorrente da suinocultura em Santa Catarina. Disponível em: `https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58216/1/doc115.pdf`. 25, 26

PINTO, Jucimar Augusto; BARROS, Regina Mambeli; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; FILHO, Geraldo Lúcio Tiago; BOTAN, Maria Cláudia de Oliveira; BOAS, Thayla Francisca Vilas; CRISPIM, Adriele Maria de Cássia. Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. **Cleaner Waste Systems**, v. 5, p. 100097, 2023. ISSN 2772-9125. Disponível em: `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912523000234`. 18, 64

SALLES, Ana Claudia Nioac De. **Metodologias de análise de risco para avaliação financeira de projetos de geração eólica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, Brazil, 2004. 31

SILVA, Felipe Pinheiro; SOUZA, Samuel Nelson Melegari de; KITAMURA, Danilo Sey; NOGUEIRA, Carlos Eduardo Camargo; OTTO, Rodrigo Bueno. Energy efficiency of a micro-generation unit of electricity from biogas of swine manure. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3900–3906, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117314521`. 63, 64

WALKER, D; FOX-RUSHBY, JA. Allowing for uncertainty in economic evaluations: qualitative sensitivity analysis. **Health Policy and Planning**, v. 16, n. 4, p. 435–443, 12 2001. ISSN 0268-1080. Disponível em: `https://doi.org/10.1093/heapol/16.4.435`. 31

ZOMER, Clarissa Debiazi. **Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. 36