

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Abordagem para a configuração ótima de investimentos em
projetos de microgeração biogás-solar FV a partir da
otimização multiobjetivo

Pedro Alberto Chaib de Sousa Bernardes

Itajubá, 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Pedro Alberto Chaib de Sousa Bernardes

Abordagem para a configuração ótima de investimentos em
projetos de microgeração biogás-solar FV a partir da
otimização multiobjetivo

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção para a obtenção do Título de **Doutor**
em Ciências em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Edson de Oliveira Pamplona, Dr.

Coorientador: Prof. Giancarlo Aquila, Dr.

2023

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Pedro Alberto Chaib de Sousa Bernardes

Abordagem para a configuração ótima de investimentos em
projetos de microgeração biogás-solar FV a partir da
otimização multiobjetivo

Tese aprovada por banca examinadora em 14 de dezembro de
2023, conferindo ao autor o título de *Doutor em Ciências em*
Engenharia de Produção.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson de Oliveira Pamplona (Orientador)

Prof. Dr. Giancarlo Aquila (Coorientador)

Prof. Dr. Anderson Rodrigo de Queiroz

Prof. Dr. Benedito Donizeti Bonatto

Prof. Dr. André Luiz Medeiros

Prof. Dr. Marcelo Nunes Fonseca

Itajubá

2023

DEDICATÓRIA

*Ao meu pai, José Vitor Bernardes, e ao meu
filho, José de Jesus Chaib Bernardes*

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pois sou uma pessoa abençoada, sempre tive amor, saúde, paz, força e grandes oportunidades.

Ao meu pai, José Vitor Bernardes que me ensinou lições importantes de bondade e humildade, que sempre me apoiou ao longo de toda minha vida e, mesmo não estando mais entre nós, se faz presente em meio à inúmeras boas lembranças.

À minha mãe, Maria Célia Chaib de Sousa Bernardes, e aos meus irmãos, José Vitor Bernardes Junior, João Vitor Chaib de Sousa Bernardes e Gustavo Chaib de Sousa Bernardes. A família é a base, a estrutura, é a peça fundamental em todas as etapas da vida.

À minha esposa, Debora de Jesus Silva Bernardes, por acreditar em mim, mesmo quando eu mesmo não acreditei, por me dar um filho, José de Jesus Chaib Bernardes, que já carrega o nome do meu pai e me motiva a ser uma pessoa melhor em todos os sentidos, mesmo antes de nascer.

Ao meu tio, Ibraim Chaib de Sousa, e família, por estarem próximos em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

Aos professores e orientadores, Dr. Edson de Oliveira Pamplona e Dr. Giancarlo Aquila, pelo apoio incondicional prestado, a forma interessada, extraordinária e pertinente das contribuições para execução deste trabalho. As críticas, discussões e reflexões valiosas em todas as etapas do doutorado. Muito mais que orientadores, me auxiliaram e incentivaram até em momentos difíceis e problemas pessoais vividos ao longo dessa jornada. Ambas excelentes pessoas, professores e orientadores, cuja admiração e amizade carregarei por toda a vida.

Aos professores membros da banca da examinadora, Dr. Anderson Rodrigo de Queiroz, Dr. Benedito Donizeti Bonatto, Dr. André Luiz Medeiros e Dr. Marcelo Nunes Fonseca, pelas importantes contribuições ao trabalho.

À Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI pela oportunidade concedida a mim para realização do doutorado em Engenharia de Produção.

Aos professores da UNIFEI por transmitirem um conhecimento de valor inestimável.

Aos amigos e colegas Lívio Bacci e Guido Bacci por contribuírem para o ingresso no doutorado.

EPÍGRAFE

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original.”

(Albert Einstein)

RESUMO

O Brasil é um dos países que tem incentivado a geração distribuída (GD) a partir de um esquema *net-metering*, combinado com a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), que é ofertada por diferentes estados brasileiros em diferentes níveis, e as linhas de financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Entretanto, algumas fontes de energia renováveis (FER) incentivadas apresentam vantagens em determinados atributos, que muitas vezes outra FER não possui. Nesse sentido, a combinação entre duas ou mais fontes de forma híbrida é capaz de maximizar as vantagens e minimizar as desvantagens de cada fonte, dentre elas os custos de investimento, operação e manutenção, o efeito da intermitência e, a diferença de área ocupada no terreno em que o sistema de geração é instalado. Portanto, o objetivo deste trabalho é contribuir com a configuração de sistemas híbridos biogás-solar fotovoltaico (FV) para granjas de suínos, utilizando otimização multiobjetivo. Para tal, será adotada a técnica de delineamento de experimentos para definir as funções objetivo, a construção da fronteira de Pareto utilizando o método *Normal Boundary Intersection* (NBI) e, também, a identificação da melhor solução Pareto-ótima por meio da relação entre a Entropia e a distância de Mahalanobis. Os dados obtidos por meio do delineamento de experimentos também serão utilizados na construção de elipses de confiança e na técnica *Multivariate Analysis of Variance* (MANOVA), para confrontar os resultados obtidos em três cidades de três diferentes estados brasileiros. As variáveis de entrada empregadas estão relacionadas com os dados operacionais das gerações por meio do biogás e da geração FV e as variáveis de resposta utilizadas são a média e o desvio padrão do Valor Presente Líquido (VPL). Os principais resultados obtidos foram a configuração ótima do sistema híbrido biogás-FV e a comparação do investimento realizado nas três cidades selecionadas. As contribuições geradas têm como propósito auxiliar as decisões de reguladores do mercado de energia renovável e investidores.

Palavras-chave: Fontes de Energia Renovável; Geração Biogás-solar FV; Programação Multiobjetivo; *Normal Boundary Intersection*; Sistema Híbrido.

ABSTRACT

Brazil is one of the countries that seek to encourage distributed generation (DG) based on a net-metering scheme, combined with the exemption from the trading tax (ICMS), which is offered by different Brazilian states at different levels, and the lines financing from the national development bank. However, incentivized renewable energy sources (RES) have advantages in certain attributes, which many other RES do not have. In this sense, the combination of two or more sources in a hybrid way is able to minimize the disadvantages of renewable sources, including investment, operation and maintenance costs, intermittency and occupied area of the land where the generation system is installed. Therefore, the objective of this work is to contribute to the configuration of hybrid biogas-solar photovoltaic (PV) systems for pig farms, using multiobjective optimization. For this, a design of experiment technique will be adopted to define the objective functions, the construction of the Pareto frontier using the Normal Boundary Intersection (NBI) method and the Pareto-optimal solution will be located by the ratio between Entropy and Mahalanobis distance. The data obtained through the experimental design will also be used in the construction of confidence ellipses and in the Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) technique, to compare the results obtained in three cities in three different Brazilian states. The input variables used will be operational data from biogas and solar photovoltaic (PV) generation and the response variables used are the mean and standard deviation of the Net Present Value (NPV). The main results obtained were the optimal configuration of the biogas-PV hybrid system and the comparison of the investment made in the three selected cities. The contributions generated are intended to assist the decisions of renewable energy market regulators and investors.

Key-words: *Renewable Energy Sources; Biogas-Photovoltaic Generation; Multiobjective Programming; Normal Boundary Intersection; Hybrid System.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Levantamento bibliográfico sistemas híbridos biogás-solar FV.....	23
Figura 2. Crescimento das políticas <i>net-metering</i> e <i>net-billing</i> por jurisdição de 2016 a 2020.	28
Figura 3. <i>Net-metering</i> em um sistema de geração a partir de dejetos da suinocultura.	30
Figura 4. Escalonamento no pagamento de componentes tarifários.	33
Figura 5. Substratos utilizados na produção de biogás e derivados.	35
Figura 6. Etapas da digestão anaeróbica.....	37
Figura 7. Ranking de países por capacidade instalada para produção de energia elétrica a base de biogás.	40
Figura 8. Número de plantas de biogás em operação.	44
Figura 9. Volume de biogás por estado (milhões de Nm ³ /ano).	45
Figura 10. Potencial de produção de biogás no Brasil (em bilhões de Nm ³ /ano).	46
Figura 11. Plantas em operação por fonte de substrato.	47
Figura 12. Número de plantas e capacidade instalada de GD a biogás.	48
Figura 13. Funcionamento de uma célula FV.....	49
Figura 14. Evolução do LCOE solar FV no mundo.	51
Figura 15. Evolução da geração solar FV no Brasil de 2012 a 2021.	54
Figura 16. Matriz elétrica brasileira em 2021.....	55
Figura 17. Mapa brasileiro da média anual de irradiação solar.....	56
Figura 18. Número de instalações solar FV por estado brasileiro.....	58
Figura 19. Capacidade instalada solar FV por estado brasileiro em MW.	58
Figura 20. Sistema híbrido biogás-solar FV.....	61
Figura 21. Preço de baterias de lítio.	63
Figura 22. Arranjos simplex <i>lattice</i> e centróide.	71
Figura 23. Fronteira de Pareto para duas funções objetivo.	75
Figura 24. Intervalos de confiança univariado para a média.	78
Figura 25. Exemplos e correlação entre dados bivariados.	79
Figura 26 Função de densidade de probabilidade normal bivariada.	81
Figura 27. Elipse constante da distribuição normal bivariada, centrada na origem (0, 0).	84
Figura 28. Elipse constante da distribuição normal bivariada, centrada no vetor de médias. ..	85
Figura 29. Rotação de $P1(X1, X2)$	85
Figura 30. Construção da elipse a partir de duas circunferências.	86

Figura 31. Dispersões bivariadas (elipses) de três grupos de objetos.	89
Figura 32. Duas configurações dos vetores de médias.	94
Figura 33. Etapas da modelagem.....	96
Figura 34. Passo a passo da construção da metodologia.	117
Figura 35. Melhor ótimo Uberlândia – MG (em mil R\$).	121
Figura 36. Melhor ótimo Agudos – SP (em mil R\$).	122
Figura 37. Melhor ótimo Toledo – PR (em mil R\$).	123
Figura 38. Fronteiras de Pareto das três cidades analisadas.	127
Figura 39. Elipses de confiança para dados e médias (em mil R\$).	129
Figura 40. Shadows e Bonferroni (em mil R\$).	130
Figura 41. Artigo publicado na revista <i>Journal of Cleaner Production</i>	162
Figura 42. Artigo publicado na revista <i>Environmental Technology</i>	162
Figura 43. Artigo publicado na revista <i>Custos e @gronegocio on line</i>	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Ranking de capacidade solar FV.	53
Tabela 2. Matriz experimental.....	97
Tabela 3. Relação potência, vazão e rendimento.....	98
Tabela 4. Produção de biogás por categoria.	99
Tabela 5. Sólidos voláteis por classe de animais.....	100
Tabela 6. Produção de dejetos em cada fase de produção.....	101
Tabela 7. Relação volume e altura da câmara do biodigestor.	105
Tabela 8. Pré-tratamento - Tanque receptor com agitador homogeneizador.	107
Tabela 9. Biodigestor.....	107
Tabela 10. Grupo motor-gerador.	108
Tabela 11. Preço do sistema FV por Wp.	108
Tabela 12. Escalonamento desconto Fio B.....	109
Tabela 13. Parâmetros para taxa de desconto.....	112
Tabela 14. Condições de financiamento.....	112
Tabela 15. Parâmetros distribuição Weibull por cidade.....	114
Tabela 16. Resultado de média e desvio padrão do VPL por cidade (em mil R\$).....	118
Tabela 17. Função objetivo para y_1 em cada cidade.....	119
Tabela 18. Função objetivo para y_2 em cada cidade.....	119
Tabela 19. Peso das funções objetivo no ponto de configuração ótima do sistema híbrido. .	125
Tabela 20. Resultado de VPL com e sem financiamento.....	126
Tabela 21. Ponto de equilíbrio da fonte de biogás por cidade.....	128
Tabela 22. Limites dos intervalos de confiança simultâneos <i>Shadows</i> e Bonferroni (em mil R\$).	131
Tabela 23. Resultados MANOVA.....	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Principais tipos de substratos na produção de biogás.....	35
Quadro 2. Tipos de biodigestores.....	37
Quadro 3. Vantagens e desvantagens da geração de energia solar FV.....	52
Quadro 4. Tipos de sistemas híbridos.....	62
Quadro 5. Fluxo de caixa.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Agricultura de Baixo Carbono
ABiogás	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ACS	<i>Annualized Cost of the System</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAPM	<i>Capital Asset Pricing Model</i>
CDER	Centro de Desenvolvimento de Energias Renováveis
CE	Ceará
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás
COE	<i>Cost of Energy</i>
COFINS	Contribuição Financeira para a Previdência Social
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
CSP	<i>Concentrate Solar Power</i>
CSTR	<i>Continuous Stirred-Tank Reactor</i>
DA	Digestão Anaeróbica
DD	<i>Double-diode</i>
DIT	Demais Instalações de Transmissão
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DOSA	<i>Developed Owl Search Algorithm</i>
DOU	Diário Oficial da União
DPSP	<i>Deficiency of Power Supply Probability</i>
EE	Eficiência Energética
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FER	Fontes de Energia Renováveis
FGV-EESP	Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas
FIT	<i>Feed-In Tariffs</i>
FV	Fotovoltaica
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída

GEE	Gases do Efeito Estufa
GO	Goiás
GPE	<i>Global Percentage Error</i>
HOMER	<i>Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources</i>
I17	Instituto 17
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
IPCC	<i>International Panel on Climate Change</i>
IPi	Imposto sobre Produtos Industrializados
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
LPSP	<i>Loss of Power Supply Probability</i>
LUEC	<i>Levelized Unit Electricity Cost</i>
MANOVA	<i>Multivariate Analysis of Variance</i>
MDE	<i>Mixture Design of Experiments</i>
MG	Minas Gerais
MME	Ministério de Minas e Energia
MOPSO	<i>Multi-Objective Particle Swarm Optimization</i>
MT	Mato Grosso
NBI	<i>Normal Boundary Intersection</i>
NPC	<i>Net Present Cost</i>
NTN-B	Nota do Tesouro Nacional - Série B
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
O&M	Operação e Manutenção
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OPA	<i>Ontario Power Authority</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PE	Pernambuco
PEA	Produção Energética Anual
PIS	Imposto sobre o Programa de Integração Social
PR	Paraná

PRM	Prêmio de Risco
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
REF	<i>Renewable Energy Fraction</i>
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
RenovaBio	Política Nacional de Biocombustíveis
RJ	Rio de Janeiro
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SC	Santa Catarina
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEF-MG	Secretaria de Estado da Fazenda de Minas Gerais
SEF-RJ	Secretaria de Estado da Fazenda do Rio de Janeiro
SMC	Simulação de Monte Carlo
SP	São Paulo
TCC	<i>Total Current Cost</i>
TFSEE	Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica
TIR	Taxa Interna de Retorno
TNPC	<i>Total Net Present Cost</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution</i>
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention of Climate Change</i>
USAB	<i>Up-flow Sludge Blanket</i>
VPL	Valor Presente Líquido
WBA	<i>World Bioenergy Association</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2	JUSTIFICATIVA	21
1.3	OBJETIVOS	23
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2	REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1	POLÍTICAS DE INCENTIVO PARA MICRO E MINIGERAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO	25
2.2	MERCADO DE BIOGÁS	34
2.3	MERCADO DE ENERGIA SOLAR FV.....	49
2.4	PLANEJAMENTO ECONÔMICO DE SISTEMAS HÍBRIDOS	61
3	TÉCNICAS EMPREGADAS	70
3.1	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS – ARRANJO DE MISTURAS	70
3.2	<i>NORMAL BOUNDARY INTERSECTION</i> (NBI).....	74
3.3	ENTROPIA	77
3.4	DISTÂNCIA DE MAHALANOBIS E ELIPSES DE CONFIANÇA.....	78
3.5	<i>MULTIVARIATE ANALYSIS OF VARIANCE</i> (MANOVA)	89
4	MODELAGEM DAS VARIÁVEIS DO PROBLEMA	96
4.1	FLUXO DE MODELAGEM	96
4.2	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	96
4.3	VARIÁVEIS DE ENTRADA	97
4.3.1	PRODUÇÃO DE ENERGIA SISTEMA HÍBRIDO	97
4.3.1.1	PRODUÇÃO DE ENERGIA PROVENIENTE DE BIOGÁS DA SUINOCULTURA	97
4.3.1.2	PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR FV	102
4.3.2	ÁREA OCUPADA PELO SISTEMA HÍBRIDO	104
4.3.3	CAPEX E OPEX SISTEMA HÍBRIDO.....	106
4.3.4	RECEITAS	109
4.3.5	FLUXO DE CAIXA E CUSTO DE CAPITAL.....	110
4.4	VARIÁVEIS DE RESPOSTA	113
4.4.1	MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO VPL.....	113
5	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA E PASSO A PASSO	116

5.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	116
5.2 METODOLOGIA DE SUPORTE A DECISÃO PASSO A PASSO	117
6 RESULTADOS	118
6.1 PASSOS DO 1 AO 3.....	118
6.2 DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO.....	118
6.3 CONSTRUÇÃO DA FRONTEIRA DE PARETO POR MEIO DO NBI E OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO PARETO-ÓTIMA.....	120
6.4 CONSTRUÇÃO DE ELIPSES DE CONFIANÇA E MANOVA	128
7 CONCLUSÃO	133
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
APÊNDICE A – PRODUÇÕES BIBLIOGRÁFICAS	162

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O crescimento da demanda mundial de energia, a evolução tecnológica e da engenharia no setor de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, e a urgência em reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE), contribuíram para a disseminação da geração distribuída (GD) em diversos países (IEA, 2021a; ACKERMAN, ANDERSON e SOLDNER, 2011; VITA, ALIMARDAN e EKONOMOU, 2015).

A GD é um conjunto de tecnologias que possibilitam a produção de eletricidade próximo ao local de consumo, tornando o consumidor de energia elétrica um prosumidor, que produz parte ou toda energia que consome (UFA et al., 2021). Além disso, a GD favorece o uso das fontes de energia renováveis (FER) (solar fotovoltaica (FV), eólica, biomassa, biogás e outras), tecnologias de armazenamento de energia, ferramentas e métodos de controle e, a regulação do consumo de energia do lado do consumidor (GHAFOURI, MILIMONFARED e GHAREHPETIAN, 2015; CHAPMAN e VERBIC, 2016).

Entretanto, a principal barreira para a disseminação de novas tecnologias no setor elétrico é o alto custo, derivado de dois principais fatores: (i) *spillovers*: necessidade de alto investimento em pesquisa, e a baixa interação inicial entre *stakeholders*, pois na fase inicial de uma tecnologia existem poucos sistemas de geração (SAMADI, 2018; JUNGINGER et al., 2006); (ii) custo de capital: elevado investimento inicial para aquisição e instalação dos equipamentos (HIRTH e STECKEL, 2016). Para acelerar o processo de expansão de novas tecnologias tornou-se necessário a aplicação de políticas de incentivo, visando a redução dos custos por FER (IRENA, 2020).

Neste sentido, as principais políticas de longo prazo para incentivar a micro e minigeração distribuída no Brasil e no mundo são (ABDOMOULEH, ALAMMARI e GASTLI, 2015; AQUILA et al., 2017): (a) *Feed-In Tariffs* (FIT): contratos de longo prazo com garantia de uma remuneração fixa para cada FER, além de garantia de acesso à rede de distribuição (PACUDAN, 2018; COUTURE e GAGNON, 2010; KWON, 2015; HONG et al., 2020); (b) *Net-metering*: remunera os usuários de GD como compensação total ou parcial de cada unidade de energia elétrica injetada à rede (RAMÍREZ et al., 2017; GAUTIER et al., 2019; GAUTIER,

JACQMIN e POUDOU, 2018); (c) *Net billing*: assemelha-se ao *net-metering*, porém utiliza dois medidores, um para contabilizar a energia produzida, remunerada por uma tarifa pré-estabelecida, e outra para o consumo, paga pela tarifa de mercado (WATTS et al., 2015; DUFO-LÓPEZ e BERNAL-AGUSTIN, 2015).

O esquema de suporte pelo *net-metering* tem contribuído para a disseminação dos sistemas de GD em diversos países, dentre eles o Brasil. Em 2012, o Brasil começou a adotar o *net-metering*, a partir da resolução 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2012), que posteriormente, passou por aprimoramentos para viabilizar novos modelos de negócio em GD e, em janeiro de 2022, foi criado o Marco Legal da GD, por meio da lei 14.300, cuja principal alteração foi a cobrança do Fio B (ANDRADE et al., 2020; PLANALTO, 2022). Embora os sistemas fotovoltaicos representem a maior parte da potência instalada em GD no Brasil, os sistemas baseados em biogás têm chamado a atenção devido ao imenso potencial agrícola, que oferece uma grande oportunidade para esta fonte no país.

Cada FER apresenta vantagens em determinados atributos, que muitas vezes outra FER não possui. Nesse sentido, a combinação entre duas ou mais fontes de forma híbrida é capaz de minimizar as desvantagens particulares de cada fonte.

Face ao exposto, defronta-se com o seguinte problema: qual seria a configuração ótima de um sistema híbrido biogás-FV que minimize as desvantagens de cada fontes?

A utilização de métodos de otimização é uma ferramenta importante para suportar a tomada de decisão em diferentes campos da ciência (RAO, 2009). Para tal, é necessário a definição das funções objetivo que dependem das características do sistema analisado e, em muitos casos, pelo fato das relações entre as respostas e variáveis de decisão serem desconhecidas, há também o desconhecimento das funções objetivo (NOCEDAL e WRIGHT, 2006). Neste caso, o delineamento de experimentos pode ser utilizado para proporcionar aprendizado sobre um sistema ou processo. Por meio dos experimentos obtêm-se dados e informações para modelar o comportamento de um sistema e otimizar o seu funcionamento (MONTGOMERY, 2009).

Na resolução de problemas multiobjetivo a partir de métodos de aglutinação, várias soluções ótimas são geradas em uma fronteira de Pareto. Deste modo, a escolha da melhor solução Pareto-ótima se torna complexa (IBÁÑES-FORÉS et al., 2014).

Ao utilizar as técnicas supracitadas é possível contruir um modelo capaz de fornecer uma configuração ótima do sistema híbrido biogás-FV, com base nas variáveis de entrada referente à potência instalada para a geração de energia elétrica a base de biogás e para a geração solar FV. Após obter a configuração ótima também é possível realizar uma análise comparativa entre as diferentes localidades selecionadas.

Neste contexto, considerando o âmbito prático, o desenvolvimento de métodos que orientem a configuração híbrida de sistemas biogás-FV no Brasil é pertinente, pois não existe atualmente arcabouço regulatório específico para a GD de sistemas híbridos. Dessa forma, os resultados contribuem para o planejamento econômico desse tipo de sistema, auxiliando nas decisões dos reguladores e beneficiando investidores com a definição de um padrão ótima para investimentos no setor.

No âmbito socio-ambiental, a geração híbrida biogás-FV atende a alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), dentre eles: energia limpa e acessível; cidades e comunidades sustentáveis e; ação climática (ONU, 2024).

1.2 Justificativa

O Brasil apresenta grande potencial para a produção de biogás. A Associação Brasileira do Biogás (ABiogás) estima que 91% do potencial de 122 milhões de m³/dia do potencial de biometano no Brasil poderiam ser derivados de resíduos agrícolas (ABIOGÁS, 2020). A gestão de resíduos enfrenta vários desafios em todo o Brasil. Especificamente na pecuária, dejetos de elevado potencial poluidor podem ser utilizados como substrato em biodigestores, cujos resultados são a produção de biogás e biofertilizante não tóxico (MAGHANAKI et al., 2013; TÖRNWALL, PETTERSSON e THORIN, 2017).

Uma das principais fontes para a produção de biogás, se trata do biogás oriundo da suinocultura, que apresenta potencial energético de 3.759,32 GWh/ano, aproximadamente 28% da capacidade de geração de energia elétrica na pecuária brasileira (SENAI, 2016; IBGE, 2019).

Além disso, o Brasil também apresenta grande potencial de irradiação solar, facilitando investimentos na geração solar FV. Na GD a fonte FV apresentou em 2021 uma participação

de 97,2% em relação a outras fontes (hidrelétrica, eólica, biomassa e biogás) (RIGO et al., 2022). A capacidade instalada de energia solar FV distribuída no Brasil atingiu 24 GW em 2023, sendo aproximadamente 49% da capacidade instalada no setor residencial (ANEEL, 2023a).

De acordo com Rigo et al. (2020) e Rigo et al. (2019b), o sucesso da GD solar FV se deve à facilidade da instalação, manutenção reduzida e queda constante nos custos dos equipamentos, além de uma cadeia de suprimentos, logística e profissionais atuantes na área.

Além do elevado potencial das fontes de geração de energia elétrica biogás e solar FV, as fontes apresentam boa complementariedade para serem combinadas em um sistema híbrido. Por um lado, a fonte biogás ocupa maior área, possui custos de investimento, operação e manutenção mais elevados, mas não é uma fonte intermitente; por sua vez a fonte FV apresenta facilidade de operação, mas possui elevada intermitência (CAMIRAND, 2021; IRENA, 2019).

Assim, pode-se considerar que a produção de eletricidade pelo sistema híbrido biogás-FV por meio da GD é uma alternativa pertinente ao contexto brasileiro. A regulação brasileira inclui o biogás e a geração solar FV como alternativa a ser utilizada para a GD, sendo que atualmente os sistemas de até 75 kW são caracterizados como microgeração e os sistemas entre 75 kW até 3MW sendo de minigeração (ANEEL, 2017; PLANALTO, 2022). O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) oferece linhas de financiamento subsidiadas para a instalação de sistemas de geração limpa (RIGO et al., 2019a) e, além disso, por meio do Convênio ICMS 16, os estados brasileiros oferecem a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), sendo que a abrangência desta isenção pode ser atribuída de acordo com os critérios definidos pelo governo de cada estado (COELHO et al., 2021).

Além disso, na literatura existem pesquisas que abordam sistemas híbridos biogás-FV, mas poucos utilizam técnicas de otimização multi-objetivo para configurar o sistema. Pesquisas realizadas na base de dados Scopus, mostram que quando a busca é realizada utilizando as palavras-chave “*hybrid biogas-solar PV system*” os resultados apontam poucos documentos de 2015 a 2023.

Modificando a palavra-chave pesquisada para “*hybrid biogas-solar PV system optimization*”, os resultados apontam uma redução no número de documentos encontrados na base Scopus no mesmo intervalo de tempo (2015-2023). No entanto, quando adicionado à busca

o termo multi-objetivo “*hybrid biogas-solar PV system multi-objective optimization*”, não é encontrado nenhum estudo. Utilizando outras palavras-chave “*multi-objective hybrid biogas photovoltaic optimization*” obtém-se alguns estudos realizados. O número de documentos encontrados detalhados por conjunto de palavras-chave é ilustrado na Figura 1.

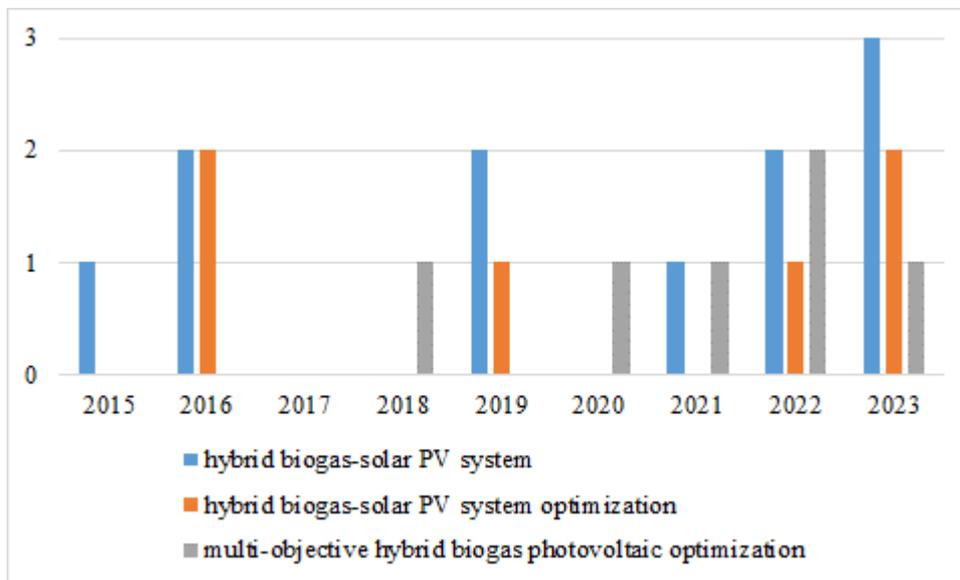


Figura 1. Levantamento bibliográfico sistemas híbridos biogás-solar FV.

Fonte: Scopus (2023).

Nesse sentido, observa-se que na literatura os estudos sobre planejamento de sistemas biogás-FV que utilizam métodos de otimização multiobjetivo ainda são escassos.

1.3 Objetivos

Objetivo Geral: esta pesquisa apresenta a finalidade de desenvolver uma metodologia utilizando a programação multiobjetivo, para auxiliar o planejamento de sistemas híbridos biogás-FV na modalidade de GD.

Objetivos específicos:

- a) Construir as funções objetivo, considerando a média e o desvio padrão do VPL;

- b) Utilizar o método de otimização *Normal Boundary Intersection* (NBI), para a resolução do problema de otimização;
- c) Por meio da razão Entropia distância de Mahalanobis, identificar a melhor solução Pareto-ótima;
- d) Confrontar os resultados experimentais para as diferentes localidades, através da construção de elipses de confiança e da MANOVA.

1.4 Estrutura do trabalho

Além deste capítulo introdutório, no Capítulo 2 será apresentada uma revisão de literatura sobre políticas de incentivo para micro e minigeração no Brasil e no Mundo, o mercado de biogás, o mercado de energia solar FV e, o planejamento econômico de sistemas híbridos; no Capítulo 3 serão abordadas as técnicas planejamento de experimentos (arranjo de misturas), o método NBI, a entropia, a distância de Mahalanobis, a construção de elipses e, a MANOVA; no Capítulo 4 serão detalhadas as variáveis envolvidas no problema, variáveis de entrada e variáveis de resposta; no Capítulo 5 a pesquisa será classificada e, será detalhado um passo-a-passo do seu desenvolvimento nas próximas etapas; por fim, no Capítulo 6 serão apresentados os resultados obtidos e no Capítulo 7 as conclusões.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Políticas de incentivo para micro e minigeração no Brasil e no Mundo

O crescimento da demanda mundial de energia, a evolução tecnológica e da engenharia no setor de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, e a urgência de redução de emissões de GEE, contribuíram para a disseminação da GD em diversos países (IEA, 2021a; ACKERMAN, ANDERSON e SOLDER, 2011; VITA, ALIMARDAN e EKONOMOU, 2015).

A GD é definida como a produção de energia elétrica realizada em pontos diversos, através de sistemas geradores conectados à rede de distribuição, que ficam próximos ou até mesmo na própria unidade consumidora (casas, empresas e indústrias) (ACKERMAN, ANDERSON e SOLDER, 2011). Em geral, a GD é um conjunto de tecnologias que possibilitam a produção de eletricidade próximo ao local de consumo, tornando o consumidor de energia elétrica um prosumidor, que produz parte ou toda energia que consome (UFA et al., 2021). Além disso, a GD favorece o uso das FER (solar FV, eólica, biomassa, biogás e outras), tecnologias de armazenamento de energia, ferramentas e métodos de controle e a regulação do consumo de energia do lado do consumidor (GHAFOURI, MILIMONFARED e GHAREHPETIAN, 2015; CHAPMAN e VERBIC, 2016).

Vários benefícios para o sistema elétrico podem ser elencados com a propagação da GD, tais como: (a) possibilidade de utilização de sistemas de geração eficientes operando por geração conjunta (calor e energia elétrica); (b) melhoria na confiabilidade do fornecimento de energia; (c) suprimento da demanda em horários de pico, devido à alimentação extra de energia no sistema; (d) redução de sobrecargas de equipamentos de energia; (e) possibilidade de utilização de fontes de energia locais, diminuindo gastos com interligação e distribuição; (f) possibilidade de participar ativamente na produção de eletricidade; (g) redução dos custos de transmissão por redução de perdas técnicas e; (h) uso de FER, reduzindo a emissão de GEE (CHIRADEJA, 2005; FARH et al., 2020).

Entretanto, a principal barreira para a disseminação das FER é o alto custo da tecnologia, derivado de dois principais fatores: (i) *spillovers*: necessidade de alto investimento em pesquisa,

e a baixa interação entre *stakeholders*, pois na fase inicial de uma tecnologia existem poucos sistemas de geração (SAMADI, 2018; JUNGINGER et al., 2006); (ii) custo de capital: elevado investimento inicial para aquisição e instalação dos equipamentos (HIRTH e STECKEL, 2016). Para acelerar o processo de expansão dessas fontes, faz-se necessário políticas de incentivo, visando o nivelamento dos custos de geração da eletricidade por FER aos custos da geração por combustíveis fósseis (IRENA, 2020).

Dentre as principais estratégias para a disseminação da micro e minigeração distribuída no Brasil e no mundo estão as políticas de longo prazo, das quais se destacam (ABDOMOULEH, ALAMMARI e GASTLI, 2015; AQUILA et al., 2017):

- FIT: contratos de longo prazo com garantia de uma remuneração fixa específica para cada FER, além de garantia de acesso à rede de distribuição (PACUDAN, 2018; COUTURE e GAGNON, 2010; KWON, 2015; HONG et al., 2020);
- *Net-metering*: remunera os usuários de GD como compensação total ou parcial de cada unidade de energia elétrica injetada à rede, onde um único medidor contabiliza a diferença entre a geração e o consumo de energia no período, determinando a remuneração do consumidor (RAMÍREZ et al., 2017; GAUTIER et al., 2019; GAUTIER, JACQMIN e POUDOU, 2018);
- *Net-billing*: assemelha-se ao *net-metering*, porém utiliza dois medidores, um para contabilizar a energia produzida, remunerada por uma tarifa pré-estabelecida, e outra para o consumo, paga pela tarifa de mercado (WATTS et al., 2015; DUFO-LÓPEZ e BERNAL-AGUSTIN, 2015).

No que diz respeito às FIT, o suporte para a geração em pequena escala pode resultar em um alto custo da política para o consumidor final, inviabilizando a utilização do mecanismo em muitos casos. Como exemplo de FIT para projetos de pequena escala, Mabee, Mannion e Carpenter (2012) descrevem o Programa microFIT para a Província de Ontário, Canadá, criado como uma vertente do Programa FIT para permitir a participação de projetos de capacidade instalada de 10kW ou menos. O programa foi desenvolvido pela *Ontario Power Authority* (OPA) para incentivar o uso de FER, que incluem energia eólica, hidráulica, biomassa, biogás,

gás de aterro e solar FV. No entanto, de acordo com Yatchew e Baziliauskas (2011), o ônus causado para o consumidor final, no programa FIT em Ontário, gerou uma rejeição popular.

Outros casos de FIT para projetos de pequena escala ocorreram na Itália e Espanha. Na Itália, a FIT para solar FV, teve início em 2004 após várias revisões no período entre 2005 a 2012, mas em 2013 o esquema cessou após atingir um valor de 6,7 bilhões de euros por ano. Atualmente a maior parte das usinas solar FV com autoconsumo, são incentivados pelo mecanismo *net-billing* denominado *Scambio Sul Posto* (CAMPOCCIA et al., 2014; SILVA et al., 2019). Ainda na União Europeia, a Espanha também iniciou os incentivos por meio do FIT para plantas solares FV em 2008, mas foi suspenso em 2012 (CAMPOCCIA et al., 2014). Posteriormente estudos foram realizados sobre a implementação da política *net-metering* em substituição à FIT (DUFO-LÓPEZ e BERNAL-AGUSTIN, 2015). Atualmente a política *net-metering* passa por revisões, para ser implantada (REN21, 2021).

Visto que, para muitos países, a política FIT é uma alternativa cara para micro e minigeração, elevando os custos da energia para o consumidor final, as estratégias mais adotadas para a GD são o *net-metering* e o *net-billing* (WATTS et al., 2015). Conforme visualizado na Figura 2, houve um crescimento expressivo da utilização das políticas *net-metering* e *net-billing* ao longo dos anos, considerando jurisdições a nível nacional e sub-nacional (províncias) que utilizam ou estão revisando o mecanismo. No intervalo entre 2016 a 2020, houve um crescimento de aproximadamente 31% (55 - 72) no número de jurisdições que adotam ou estão revisando os esquemas de incentivo *net-metering* ou *net-billing* (REN21, 2017; 2018; 2019; 2020; 2021).

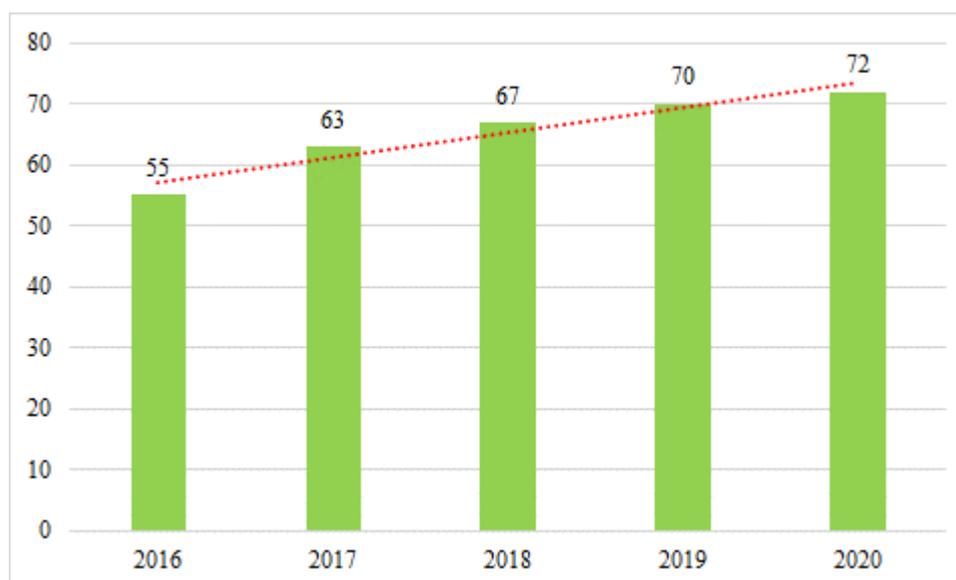


Figura 2. Crescimento das políticas *net-metering* e *net-billing* por jurisdição de 2016 a 2020.

Fonte: Adaptado de REN21 (2017, 2018, 2019, 2020 e 2021).

Campoccia et al. (2009) apontam países da União Europeia que utilizam as políticas *net-metering* para suportar a produção de energia elétrica descentralizada, dentre eles Bélgica, República Checa, Dinamarca e Itália. Silva et al. (2019) abordam os casos de estados dos EUA (Havaí, Califórnia, Nevada e Nova Iorque), e países (Brasil e Bélgica) que também adotam o *net-metering* como incentivo.

Na China, Eid et al. (2014) descrevem que a política *net-metering* foi implementada em 2013, visando cultivar o mercado fotovoltaico e segundo Comello e Reichelstein (2017), o governo chinês beneficiava os usuários com subsídios políticos de geração de energia solar FV fixo de 0,42 yuan/kWh, e, além disso, permitia a venda da energia excedente para a rede elétrica. Jia et al. (2020) acrescentam que além da China, Dinamarca, Itália, Lituânia e Holanda também se beneficiaram do esquema *net-metering* para incentivar os segmentos residencial e comercial.

Estudando as políticas *net-metering* e *net-billing* no Chile, Watts et al. (2015) concluem que a maior parte dos países em desenvolvimento, incluindo o Chile, são propensos a adotar o *net-billing* pelo fato da eletricidade injetada na rede ser comprada a uma tarifa inferior à tarifa de varejo. Já no caso da Espanha, Dufo-López e Bernal-Agustín (2015) afirmam que o *net-metering*, valorizando a energia injetada na rede 1:1 (1kWh injetado, gera 1kWh de crédito), seria uma boa estratégia para fomentar a produção de eletricidade por FER de pequena escala.

A GD promovida por estratégias de incentivo, traz à tona a figura do prosumidor, que se trata de um agente relevante no contexto dos *smart grids*. Em um *smart grid*, um dos principais fundamentos é a integração e o melhor gerenciamento da demanda de eletricidade. Nesse aspecto, um o aumento da GD a partir de FER, além do uso de dispositivos inteligentes para monitorar a oferta e demanda da rede, favorece a busca destes objetivos (KAKRAN e CHANANA, 2018).

Um *smart grid* com a figura do prosumidor também permite alcançar melhor controle nos horários de pico de carga, o fluxo de energia contínuo, a estabilidade e segurança no sistema, apresenta alta eficiência energética (EE), e contribui para disseminar o uso de FER (MORETTI et al., 2017; FAN et al., 2021).

O Brasil também tem sido um dos países que tem buscado incentivar a GD por meio do *net-metering*, a partir de um arcabouço regulatório que teve início com a publicação da resolução 482/2012 (ANEEL, 2012). Esta resolução basicamente instituiu um esquema de *net-metering* para sistemas de GD de energia elétrica (microgeração até 100 kW e minigeração até 1 MW), baseado nas fontes FV, eólica, hídrica, biocombustíveis e, em cogeração qualificada (combinação entre calor e energia) instalados tanto em residências, quanto em estabelecimentos comerciais.

Assim como os esquemas de *net-metering* tradicionais, o esquema de incentivo lançado pela resolução 482/2012 viabilizou o acesso à rede elétrica para os sistemas GD enquadrados na resolução, utilizando um medidor bidirecional, no qual a energia excedente seria injetada na rede. Na Figura 3, é ilustrado um exemplo de funcionamento do *net-metering* para o caso dos sistemas de GD a partir do biogás da suinocultura.

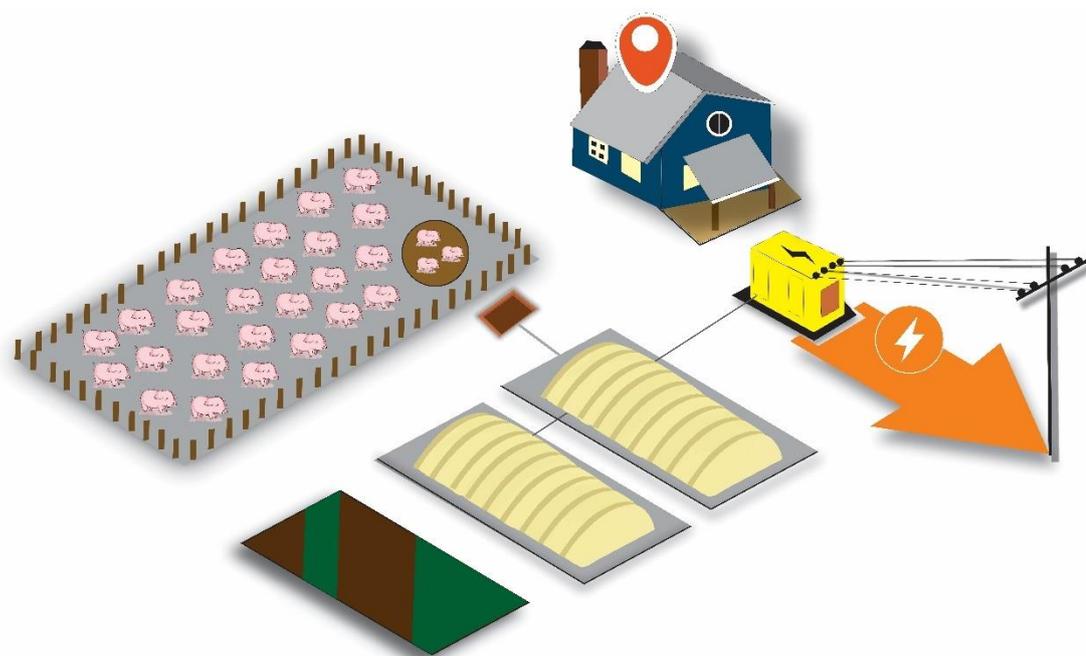


Figura 3. *Net-metering* em um sistema de geração a partir de dejetos da suinocultura.

Fonte: Bernardes et al. (2022).

Posteriormente, a resolução 687/2015 viabilizou novas modalidades de geração para os prosumidores, que vão além da tradicional geração junto à carga (RIGO et al., 2019a; COELHO et al., 2021). Dentre elas estão:

- autoconsumo remoto: os prosumidores possuem um sistema de geração localizado distante de onde é consumida a carga, mas quando atendido pela mesma concessionária, podem usufruir da compensação de créditos na conta de energia;
- empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (EMUCs): utilização da compensação da energia elétrica proveniente da GD em condomínios e prédios, onde cada prosumidor é tratado de forma individual, e o consumo de energia elétrica nas áreas de uso comum sendo tratada a parte;
- geração compartilhada: é caracterizada por consórcios ou cooperativas formadas por diferentes prosumidores, que se beneficiam da GD instalada em local diferente de onde a energia elétrica é compensada.

Outras mudanças trazidas pela resolução 687/2015 foram: prazo para registro dos sistemas foram reduzidos de 82 dias para 34 dias; validade dos créditos de energia passaram de 36 dias para 60 dias; e as faixas de caracterização de potência passaram a ser de até 75 kW para microgeração e a minigeração passou a ser enquadrada como acima de 75 kW e abaixo de 5 MW (apenas a hídrica sendo abaixo de 3 MW) (ANEEL, 2015).

Em 2017, a resolução 786/2017 ainda promoveu mais algumas alterações no *net-metering*, sendo elas: aumento do limite máximo de potência para a fonte de hídrica de 3 MW para 5 MW; e a proibição para classificação de GD para sistemas que anteriormente já haviam sido licenciados para operação comercial, ou que já estiveram diretamente comprometidos com alguma concessionária (ANEEL, 2017).

O esquema de *net-metering* tem se consolidado como a política de longo prazo para a GD no Brasil, e além disso o país tem adotado algumas das chamadas políticas de curto prazo, que visam potencializar os efeitos de políticas de longo prazo (AYOUB e YUJI, 2012). Dentre essas estratégias estão incentivos fiscais e linhas de financiamento subsidiadas.

O primeiro é o chamado Convênio ICMS 16, que consiste na isenção do imposto sobre comercialização para os sistemas de GD contemplados pelo *net-metering* brasileiro (CONFAZ, 2015). A iniciativa surgiu em 2015, a partir das isenções oferecidas pelo estado de Minas Gerais, sendo que, gradativamente até 2018, todos os estados brasileiros de alguma forma passaram a oferecer a isenção do imposto (CONFAZ, 2018).

Como se trata de um tributo estadual, cada estado brasileiro possui autonomia para oferecer essa isenção de diferentes formas. Os estados de Paraná e Santa Catarina, por exemplo, oferecem a isenção sobre a parcela referente a aproximadamente 50% da tarifa de energia elétrica apenas durante os quatro primeiros anos de operação (CONFAZ, 2018).

Por sua vez, o estado de Minas Gerais através da lei estadual 23762/2021 passou a oferecer a isenção sobre a tarifa para os sistemas de GD durante todo o ciclo de vida (SEF-MG, 2013). Da mesma maneira, o estado do Rio de Janeiro, por meio da lei estadual 8922/2020, também incentivou sistemas de micro e mini geração com a isenção sobre a tarifa (SEF-RJ, 2020), sendo que os demais estados oferecem a mesma isenção, porém, apenas sobre a parcela referente à tarifa de energia, ou seja, à parcela em que não incide os impostos sobre o uso do sistema de distribuição.

Outra política de curto prazo, dessa vez adotada pelo governo nacional foi a lei 13169/2015 que oficializou as isenções do Imposto sobre o Programa de Integração Social (PIS) e da Contribuição Financeira para a Previdência Social (COFINS) sobre a energia elétrica injetada à rede pelos prosumidores (DOU, 2015). Entretanto, tanto a lei 13169/2015, quanto o Convênio ICMS 16 são aplicados apenas para as modalidades de geração que estão sob única titularidade, ou seja, a junto à carga e o autoconsumo remoto, sendo ainda inflexíveis para as demais modalidades, porém, mesmo assim, elas implicam em um passo importante que alavancou a GD no Brasil a partir de 2015 (COELHO et al., 2021).

Ainda em 2015, o governo brasileiro lançou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída (ProGD) que teve como uma das principais finalidades o desenvolvimento de novas linhas de financiamento para projetos de GD no país (DOU, 2015). O ProGD contribuiu para o surgimento de linhas de financiamento do BNDES e de outros bancos públicos nacionais direcionados para prosumidores, indústrias de componentes tecnológicos, e para a capacitação de empreendedores no mercado de GD (MME, 2019).

Em janeiro de 2022, foi criado o Marco Legal da GD, por meio da lei 14.300. A lei apresenta várias mudanças no âmbito da GD. No entanto, para projetos protocolados até doze meses após a publicação da lei fica mantido o regime atual até 31/12/2045 (PLANALTO, 2022).

Nesse sentido em janeiro de 2023, conforme o Marco Legal da GD, a potência instalada para fontes não despacháveis (que despacham energia sem controle humano algum, dependendo das condições climáticas, tais como a solar, a eólica e a biomassa) foi reduzida de 5MW para 3MW.

Além disso, algumas componentes tarifárias deixarão de ser compensadas gradualmente e de maneira escalonada, dando início a um sistema de compensação parcial, devido à exigência de se pagar o Fio B, referente à distribuidora de energia. Estima-se que o Fio B represente em média 40% de redução do crédito atualmente injetado. No entanto, unidades de minigeração acima de 500 kW em fonte não despachável nas modalidades de autoconsumo remoto ou geração compartilhada, com participação de um único titular em 25% ou mais do excedente de energia elétrica, deverá ser considerada (PLANALTO, 2022):

- 100% das componentes tarifárias relativas à remuneração dos ativos do serviço de distribuição, à quota de reintegração regulatória (depreciação) dos ativos de distribuição e ao custo de operação e manutenção do serviço de distribuição - Fio B;
- 40% das componentes tarifárias relativas ao uso dos sistemas de transmissão da Rede Básica, ao uso dos transformadores de potência da Rede Básica com tensão inferior a 230kV e das Demais Instalações de Transmissão (DIT) compartilhadas, ao uso dos sistemas de distribuição de outras distribuidoras e à conexão às instalações de transmissão ou de distribuição - Fio A;
- 100% dos encargos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), EE e Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE).

Os projetos pagarão as taxas a partir de 2023 de maneira escalonada até atingir 100% do pagamento dos componentes tarifários em 2029, conforme ilustrado na Figura 4.

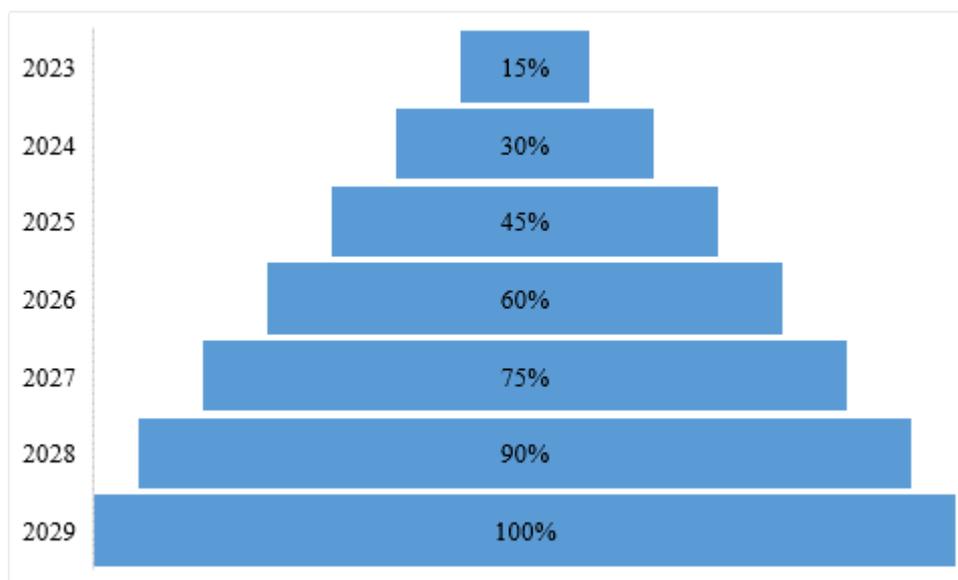


Figura 4. Escalonamento no pagamento de componentes tarifários.

Fonte: Adaptado de Planalto (2022).

Outro ponto da lei ajusta problemas referentes à duplicidade dos créditos, causada pelo custo de disponibilidade. O custo de disponibilidade é a taxa mínima que as concessionárias cobram pelo uso da infraestrutura de distribuição, e sendo assim a taxa para consumidores monofásicos é de 30 kWh, para consumidores bifásicos é de 50 kWh e para trifásicos é de 100

kWh. Atualmente os créditos injetados na rede compensam o custo de disponibilidade e o prosumidor paga a tarifa mínima na conta de energia, porém, com a nova lei o custo de disponibilidade será desconsiderado no cálculo de consumo e injeção de energia na rede (PLANALTO, 2022).

Quanto à gestão do excedente de energia que atualmente é definido em valores percentuais para serem consumidos em estabelecimentos não geradores, a partir da lei 14.300/2022, a energia excedente poderá ser consumida por estabelecimentos não geradores obedecendo uma ordem de prioridade. Por exemplo, em três estabelecimentos de mesma titularidade um dos estabelecimentos é o gerador (A), os outros dois são não geradores (B e C). Após o aproveitamento da energia no estabelecimento A o excedente era dividido utilizando uma porcentagem definida entre os estabelecimentos B e C. Atualmente este excedente poderá ser destinado obedecendo uma ordem de prioridade, e, desta forma, a energia excedente poderá ser destinada ao estabelecimento B e, caso ainda haja excedente, para o estabelecimento C.

Outros pontos de destaque são a possibilidade de comercializar os excedentes de energia com as distribuidoras por meio de chamada pública ainda a ser regulamentada pela ANEEL; flexibilização na geração compartilhada, que poderá ser estabelecida via consórcio, cooperativa, associação e também por condomínio civil (voluntário ou edifício); e, maior celeridade na conexão da GD, salvo casos em que exista a necessidade de adequações ou outros tipos de pendências, a distribuidora de energia deve empregar celeridade na conexão de unidades geradoras ao sistema, com o prazo de 34 dias para a microgeração e de 49 dias para a minigeração (PLANALTO, 2022).

2.2 Mercado de biogás

As atividades humanas geram volumes crescentes de resíduos orgânicos, que podem ser utilizados como substrato (matéria-prima) na produção de biogás por meio da digestão anaeróbica (DA) (HORVÁTH et al., 2016). Alguns substratos apresentam potencial poluidor e emitem gás metano na atmosfera, portanto, convertê-los em biogás é benéfico para o ambiente e contribui para redução de emissões de GEE (BAKKALOGLU et al., 2021; SCHEUTZ e FREDENSLUND, 2019). Comparado a outros biocombustíveis, o biogás pode ser obtido por

meio da utilização de diversos tipos de substratos, desde que sejam biodegradáveis, conforme ilustrado na Figura 5 (ADEKUNLE e OKOLIE, 2015).

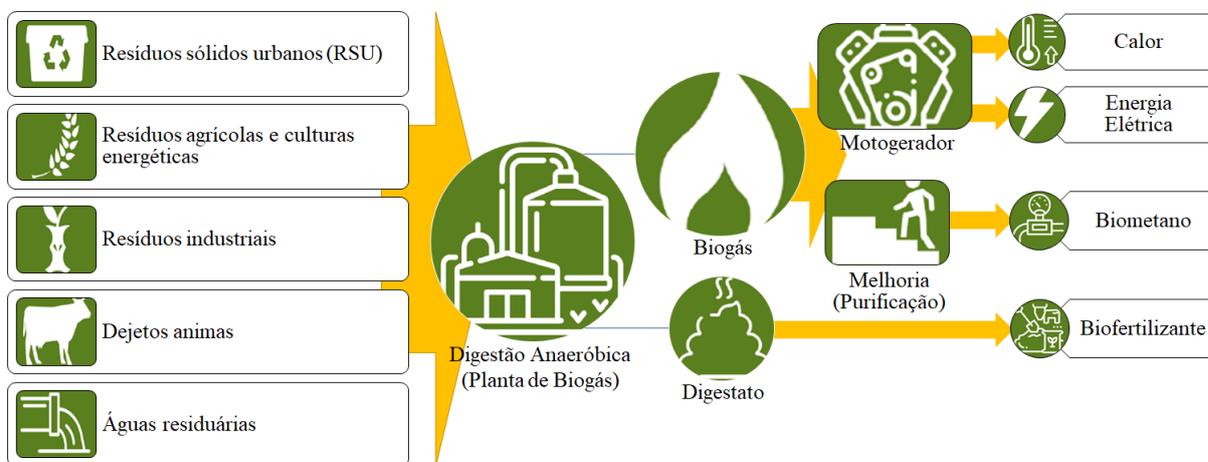


Figura 5. Substratos utilizados na produção de biogás e derivados.

Fonte: Adaptado Tezer et al. (2021) e EBA (2019).

Por serem recursos renováveis, os substratos apresentam vantagens pela diversidade, disponibilidade e sustentabilidade (TEZER et al., 2021). De acordo com sua origem, podem ser basicamente classificados em resíduos municipais, resíduos da atividade agropecuária e resíduos da atividade industrial (HORVÁTH et al., 2016). Dentre a ampla gama de substratos que podem ser encontrados, destacam-se: os resíduos sólidos urbanos (RSU); resíduos da agropecuária; resíduos industriais; e plantas aquáticas e terrestres. No Quadro 1 são descritos os tipos de substrato para os principais grupos (TEZER et al., 2021).

Quadro 1. Principais tipos de substratos na produção de biogás.

Grupos de substratos	Tipos de substratos
Resíduos municipais	- RSU; - Lodo de esgoto.
Resíduos da agropecuária	- Dejetos de animais (suínos, bovinos, aves e outros); - Resíduos de culturas agrícolas (bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, casca de café e outros).
Resíduos industriais	- Águas residuárias industriais (frigorífico, laticínios, bebidas, celulose e outros); - Resíduos de óleo e gordura (curtumes, indústrias de óleos e margarinas, frigoríficos e outros).

Plantas terrestres e aquáticas	<ul style="list-style-type: none"> - Culturas energéticas (cana-de-açúcar, milho, sorgo e outras); - Gramíneas; - Algas.
-----------------------------------	---

Fonte: Adaptado de Tezer et al. (2021).

De acordo com Duque-Acevedo et al. (2020), a agropecuária, com grande produção de resíduos orgânicos, é um dos maiores setores biológicos e apresenta boas oportunidades para a redução do uso de combustíveis fósseis e mitigação das emissões de GEE, por meio da conversão dos resíduos da atividade agropecuária em bioprodutos, dentre eles a bioenergia e o biofertilizante.

Van Stappen et al. (2016) e Lyng et al. (2015) afirmam que o setor da agropecuária é essencial para o aumento do potencial bioenergético no futuro, entretanto alguns substratos apresentam problemas relacionados a sua aplicação. Por exemplo, a utilização de culturas energéticas para a obtenção de biogás pode gerar concorrência com a produção de ração animal e até mesmo com a alimentação humana.

Nesse sentido, os dejetos de animais não oferecem concorrência com outras formas de uso, podendo ser considerados um bom substrato para produção de biogás, por não apresentar efeitos colaterais como mudança no uso da terra e ameaça à segurança alimentar (SCARLAT, DALLEMAND e FAHL, 2018; ESTEVES et al., 2019).

O estudo de Bumbiere et al. (2020) apresenta uma análise multicritério baseando-se na viabilidade econômica, eficiência dos substratos e aspectos ambientais para concluir que dentre um leque de substratos da agropecuária, os melhores para a produção de biogás são os dejetos de suínos e de aves. Por sua vez, Horváth et al. (2016) complementam que a eficiência dos resíduos varia conforme a sua composição e biodegradabilidade quando exposto a condições anaeróbicas.

O processo de DA pode ser realizado utilizando apenas um tipo de substrato (mono-digestão), ou um mix de dois ou mais tipos de substratos (co-digestão) (KUNATSA e XIA, 2022). A DA é composta pelas etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, ilustradas na Figura 6, que ocorrem no interior de biodigestores (ADEKUNLE e OKOLIE, 2015).

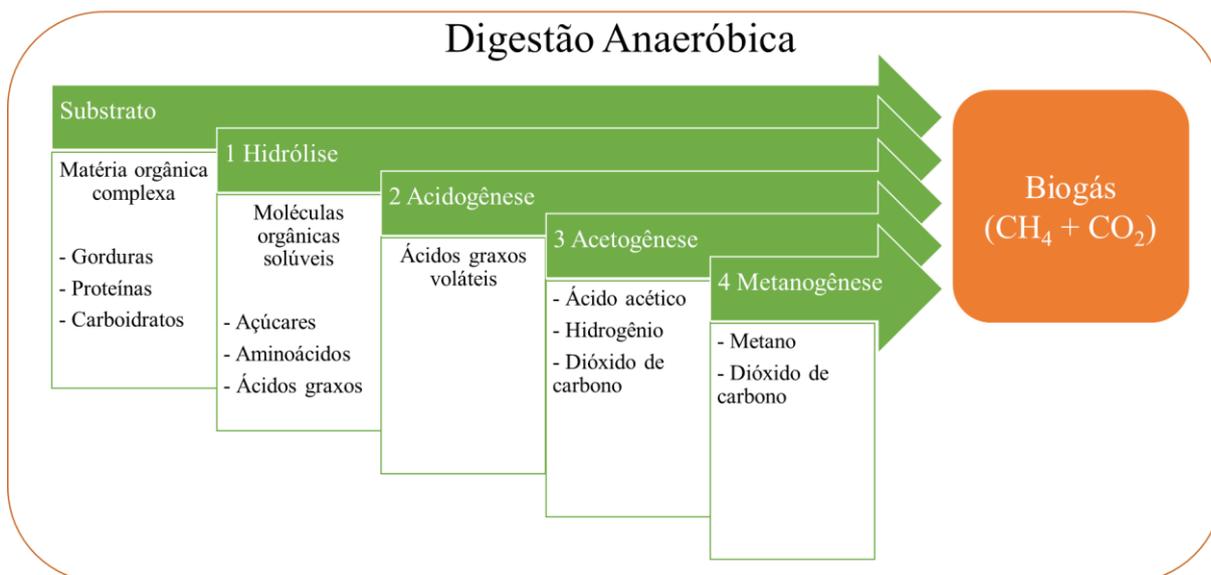


Figura 6. Etapas da digestão anaeróbica.

Fonte: Adaptado Kasinath et al. (2021).

A categoria de biodigestores para resíduos da agropecuária e industriais são: lagoa coberta; mistura completa (CSTR, do inglês *Continuous Stirred-Tank Reactor*); *Up-flow Sludge Blanket* (USAB) e; *Plug Flow* (MUTUNGWAZI, MUKUMBA e MAKAKA, 2018). A definição da tecnologia adotada para biodigestão depende do tipo e da consistência do substrato utilizado como matéria-prima, sendo que o leque de biodigestores e suas características são detalhados no Quadro 2.

Quadro 2. Tipos de biodigestores.

Digestores	Características	Vantagens/Desvantagens
Lagoa coberta	<ul style="list-style-type: none"> - Resíduos líquidos ou diluídos (< 2% de resíduos sólidos); - Lagoas, revestidas por manta de polietileno e coberto por forro hermético; - Tempo de retenção hidráulica (TRH) entre 30-40 dias; - Adequado para climas acima de 20°C; - Biogás é colhido por tubos, armazenado ou queimado em geradores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vantagens: baixo custo operacional, não há necessidade de aquecimento, baixo investimento, excelente no tratamento de resíduos líquidos; - Desvantagens: elevado TRH, conversão de sólidos lenta, não há agitação, baixa produção de biogás, limpeza periódica necessária e difícil manutenção da lagoa.

CSTR e UASB	<ul style="list-style-type: none"> - Adequados para substratos com 3-10% de resíduos sólidos; - Tanques de concreto isolados, para manter a temperatura; - Possui agitadores mecânicos e aquecimento por fonte externa; - Fechado por um revestimento hermético; - TRH entre 10-20 dias; - Alta taxa de produção de biogás; - Biogás canalizado para um gerador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vantagens: elevada produção de biogás, agitação eficiente dentro do digestor e TRH curto; - Desvantagens: altos custos de capital e de energia, e necessidade de manutenção periódica das partes mecânicas do digestor.
<i>Plug Flow</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Indicado para substratos sólidos (até 14% de resíduos sólidos); - Construídos no subsolo com concreto de cimento armado, evitam perda de calor; - Canais longos, estreitos, cobertos com um forro hermético, não há agitação; - TRH entre 15-20 dias; - O substrato se move no digestor quando inserido uma nova entrada de resíduos; - Biogás produzido gera calor para o próprio biodigestor, o restante canalizado para um gerador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vantagens: fácil instalação, fácil manuseio, adaptação a baixas temperaturas, custo de capital reduzido, projeto simples e TRH razoável; - Desvantagens: ausência de agitação, conversão lenta de sólidos, baixa produção de biogás e necessidade de limpeza periódica.
Filme fixo	<ul style="list-style-type: none"> - Adequados para substratos com 1-3% de resíduos sólidos; - Um meio inerte é adicionado no biodigestor, onde as bactérias crescem e formam um biofilme, que degrada o substrato à medida que se move; - Elevada eficiência no rendimento do biogás; - TRH reduzido, cerca de 3-5 dias; - Comportam cerca de 450.000 litros e reduzem os maus odores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vantagens: tempo de retenção curto, construção fácil, operação fácil, rendimento moderado de biogás; - Desvantagens: necessidade de limpeza periódica e substituição do filme, frequência de entupimento e a ausência de distribuição uniforme de temperatura.

Fonte: Adaptado de Singh e Prerna (2009), Akula (2013), Ghosh e Bhattacharjee (2013), Mahmudul et al. (2019) e Mutungwazi, Mukumba e Makaka (2018).

Devido a seus atributos, o biogás possui algumas vantagens adicionais que motivam o incentivo e a disseminação de seu aproveitamento, dentre elas: o fato de a produção de biogás depender do tratamento adequado de resíduos orgânicos provenientes de outras atividades econômicas, e que muitas vezes são descartados de forma incorreta causando prejuízos ambientais, que vão além das emissões de GEE; é a segunda maior FER disponível no mundo, perdendo apenas para a energia solar (MAGHANAKI et al., 2013; MANESH, REZAZADEH e KABIRI, 2020); pode ser armazenado sem auxílio de baterias, diferente das fontes solar e eólica; apresenta alta eficiência na produção de outras formas de energia, também podendo ser aproveitado na geração de calor e como combustível de transportes (biometano) (SCARLAT, DALLEMAND e FAHL, 2018); também produz o digestato que pode ser utilizado como fertilizante (TÖRNWALL, PETTERSSON e THORIN, 2017).

A partir do ano 2000, a produção de biogás tem ganhado destaque no mercado mundial de FER. Entre 2000 e 2019 o setor cresceu 9%, atingindo uma produção de 62,3 bilhões de m³ (WBA, 2021). Do total produzido, aproximadamente 70% do biogás é destinado para geração de eletricidade e calor; 20% para cozimento de alimentos; e 10% destinado a conversão para biometano (IEA, 2021b).

Conforme ilustrado na Figura 7, os países que possuem a maior capacidade instalada para a produção de energia elétrica através do biogás são: Alemanha (7.020 MW – 32,6%), EUA (2.029 MW – 9,4%), Reino Unido (1.935 MW – 9,0%) e China (1.928 MW – 9,0%), o Brasil ocupa a nona posição com 486 MW, representando 2,3% da capacidade instalada mundial (IRENA, 2023).

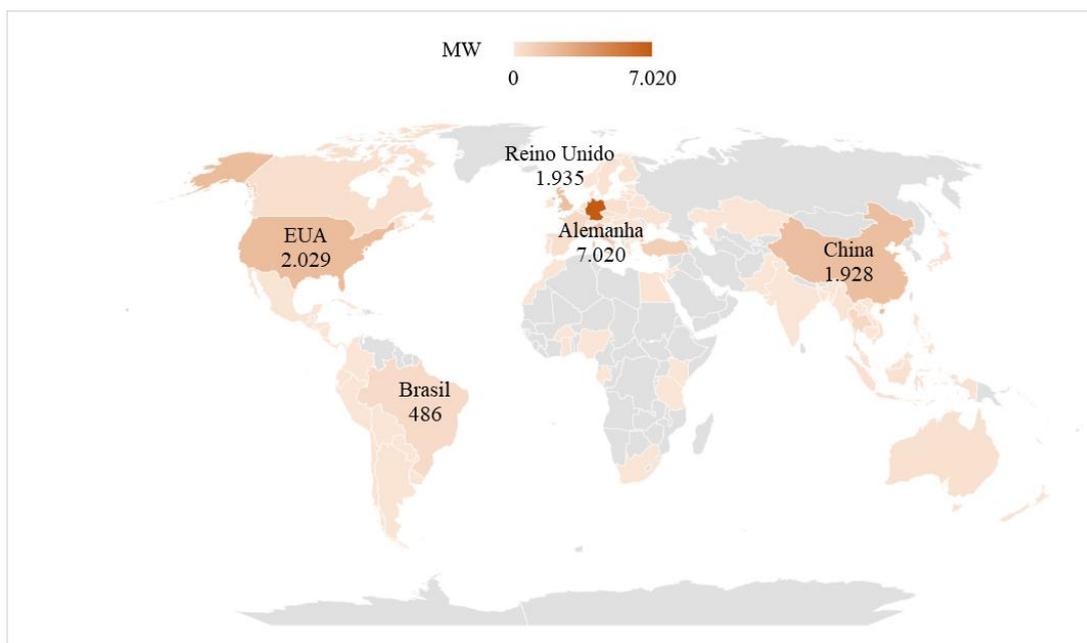


Figura 7. Ranking de países por capacidade instalada para produção de energia elétrica a base de biogás.

Fonte: Adaptado IRENA (2023).

Com projeções de 50% a 60% de FER na matriz energética até 2035, a Alemanha apresenta grande produção de biogás utilizando resíduos agropecuários, com cerca de 8.400 usinas destinadas a geração de calor e eletricidade. Alterações na Lei de Fontes de Energia Renovável alemã foram realizadas em 2021, buscando considerar os diferentes níveis de desenvolvimento de FER por região e fomentar o desenvolvimento de regiões mais atrasadas (IEA Bioenergy, 2022).

O Reino Unido conta com políticas para incentivar o desenvolvimento do setor de biogás que incluem o Esquema de Suporte ao Gás Verde, o Incentivo à Agricultura Sustentável e o Esquema de Investimento em Lodo de Esgoto. De 685 plantas de biogás instaladas no Reino Unido, 558 são destinadas a geração de eletricidade, e calor e eletricidade combinadas. Além disso, do total de usinas, a maioria pertence ao setor agropecuário (342), mas quando comparadas com as de outros setores são significativamente menores em termos de capacidade (IEA Bioenergy, 2022).

Na China o aumento da produção de eletricidade à base de biogás é justificado pelo crescente número de usinas de biogás agrícola (mais de 100.000) e de biodigestores domésticos (cerca de 45 milhões), sendo uma das principais finalidades a geração de energia elétrica. Além

disso, foram lançados em 2021 para incentivar o uso de FER, a Lei de Promoção da Revitalização Rural da República Popular da China e o Plano de Trabalho de Construção do Projeto de Geração de Energia a Biomassa (IEA Bioenergy, 2022).

Embora os demais países listados apresentem expectativas de crescimento, os EUA, segundo maior produtor de energia a base de biogás, apresentam uma tendência de queda em sua produção nos últimos anos (REN21, 2021). No intervalo de 2017 - 2021 a geração de energia elétrica pelo uso do biogás reduziu em aproximadamente 17% (IRENA, 2023).

O biogás de países desenvolvidos se concentra em usinas de maior escala, como grandes fazendas e indústrias, com destino de gerar energia elétrica e calor. Por outro lado, usinas de biogás estão em expansão em vários países, sendo que em países em desenvolvimento há um grande volume de biodigestores domésticos, usados para fornecer combustível para cozinhar e gerar eletricidade (SCARLAT, DALLEMAND e FAHL, 2018).

Vários países em desenvolvimento apresentam grande potencial de recursos para a produção de biogás, porém obstáculos climáticos, transferência de tecnologia, estrutura legal e socioeconômica retardam este desenvolvimento (JIANG, SOMMER e CHRISTENSEN, 2011; MWIRIGI, BALANA e MUGISHA, 2014). No entanto, nos últimos anos novas tecnologias e diversos esquemas para se produzir biogás foram introduzidos em países em desenvolvimento como Brasil, China e Índia, reduzindo a diferença de produção de biogás em comparação a países desenvolvidos (COIMBRA-ARAÚJO, MARIANE e BLEY JUNIOR, 2014; SINGH e JASH, 2015).

No Brasil, um dos marcos de incentivo à produção de eletricidade através da biomassa e do biogás se deu pelo o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), lançado em 2002. Das usinas do PROINFA, as principais fontes de biomassa contratada foram provenientes do bagaço da cana, casca de arroz, cavaco de madeira, além do biogás de aterro (DUTRA e SZKLO, 2008). Entretanto, o preço pago na época para as usinas de biomassa foi insuficiente para atingir a meta de contratação definida no PROINFA.

Atualmente, a maioria das usinas de geração de energia elétrica através de biomassa/biogás são contratadas via leilões do ambiente de comercialização regulado. Embora a cadeia produtiva no setor de biogás no Brasil já tenha capacidade e experiência mais madura do que outras fontes alternativas, ainda é fundamental o papel das associações e órgãos de

pesquisas para fomentar um maior avanço da fonte e a capacitação de novos empreendedores no setor.

Neste aspecto, o setor tem alcançado mais notoriedade à medida que novas associações e órgãos de pesquisa foram criados ou envolvidos para fomentar o crescimento da produção de biogás. Como exemplo, podem ser citados a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás) e o Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás (CIBiogás). Além destes órgãos, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) também contribuem há anos na difusão do biogás em grandes setores (energia e transporte) (BORGES et al., 2021).

A resolução normativa 482/2012 da ANEEL, e seus posteriores desdobramentos, também pode ser considerado outro marco que ofereceu uma nova alternativa para novos empreendimentos no mercado de biogás (FREITAS et al., 2019). Alguns casos de sucesso de GD à base de biogás podem ser encontrados no estado do Paraná (CIBIOGÁS, 2022a; ABIOGÁS, 2022a):

- Granja São Pedro Colombari, localizada em São Miguel do Iguazu, pioneira em GD de biogás de dejetos suínos;
- Minicentral Termelétrica a Biogás, no município de Entre Rios do Oeste, também movida a biogás de dejetos da suinocultura;
- Unidade de Produção de Biogás Cerâmica Stein, localizada em Entre Rios do Oeste, utiliza a co-digestão de dejetos de suínos e resíduos alimentares para gerar biogás e convertê-lo em eletricidade; e
- Usina híbrida solar FV e biogás de dejetos suínos, no município de Ouro Verde do Oeste, armazena o biogás para a geração de energia no período da noite, enquanto a solar FV produz durante o dia.

Outra iniciativa que merece destaque é o reconhecimento do biometano como combustível pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em 2015, possibilitando a injeção na rede de gás natural, obedecendo especificações padronizadas de compostos do biometano. Com isso, vários estados obrigaram distribuidoras de gás natural a comprarem uma parcela de energia renovável de produtores de biogás (BORGES et al., 2021).

Medidas como essa incentivam novas instalações de biodigestores, gerando ganhos de aprendizagem no mercado de biogás, indiretamente favorecendo também a produção de outros subprodutos do biogás, como a própria geração de energia elétrica.

Posteriormente, em 2017 foi instituída Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) pela Lei nº 13.576, visando aumentar a produção de biocombustíveis na matriz energética brasileira, por meio de um mercado de crédito de carbono que incluía biometano (BORGES et al., 2021).

Além disso, a Política Federal do Biogás e do Biometano que ainda não foi aprovada (Projeto de Lei 2193/20), pretende incentivar o investimento para a produção, distribuição e comercialização de biogás, biometano e biofertilizante, reduzindo em 50% o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) na aquisição de equipamentos para atuantes nessa cadeia produtiva e criando linha de financiamento no BNDES para fomentar pesquisas, o desenvolvimento e a produção de biogás. Se essa emenda for aprovada, possivelmente contribuirá para a entrada de empreendedores no mercado de biogás (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2020).

Entretanto, mesmo com toda a evolução do mercado de biogás brasileiro o país ainda apresenta uma lacuna muito grande a ser preenchida, visto que o potencial de matéria-prima disponível para a produção de biogás é muito maior do que o consumido atualmente (BORGES et al., 2021). Deste modo, a atuação de associações como o CIBiogás e ABiogás fundados com o intuito de difusão de conhecimento e tecnologia, tem sido relevante para o suporte a novos empreendimentos e para defender o setor de biogás em discussões públicas sobre incentivos ao setor, principalmente quando se trata da GD em pequenos empreendimentos, que demanda incentivos para viabilizar economicamente a GD (CIBIOGÁS, 2022b; ABIOGÁS, 2022b).

Além disso, número reduzido de linhas de financiamento específicos para o biogás fazem com que o nível de investimentos esteja distante do potencial vislumbrado para o mercado brasileiro. Atualmente grande parte dos recursos do BNDES são destinados a grandes empreendimentos, e para projetos de menor porte no meio rural se destacam as linhas de Agricultura de Baixo Carbono (ABC), Inovagro, Renovagro (BNDES, 2018; 2022; 2023).

Até 2021, o país abrigava 811 plantas de biogás, das quais 755 estão em operação, sendo a produção equivalente a 2,35 bilhões de Nm³/ano. Em relação a 2020, houve um crescimento de 16% no número de plantas de biogás instaladas (653 - 811) e aumento de 10% no volume

de biogás produzido (2,14 - 2,35 bilhões de Nm³/ano) (CIBIOGÁS, 2021). Os estados mais representativos em número de plantas são Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Santa Catarina (SC), Goiás (GO), São Paulo (SP) e Mato Grosso (MT), conforme ilustrado na Figura 8.

O estado de Minas Gerais possui 251 plantas de biogás, o que representa 33% de todas as plantas em operação no país. No entanto, quando se trata de volume de biogás o estado produz apenas 210 milhões de Nm³/ano, 9% do total. Por sua vez, o Paraná ocupa a segunda posição com 159 plantas em operação, que corresponde a 21% do total de plantas e produz 253 milhões de Nm³/ano. Já Santa Catarina e Goiás apresentam respectivamente 64 e 63 plantas de biogás, respectivamente, ocupando a terceira e quarta posição no ranking. Os estados de Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina abrigam um grande número de plantas de pequeno porte, apropriadas para a GD, que em sua maioria utilizam resíduos do setor agropecuário (CIBIOGÁS, 2021).

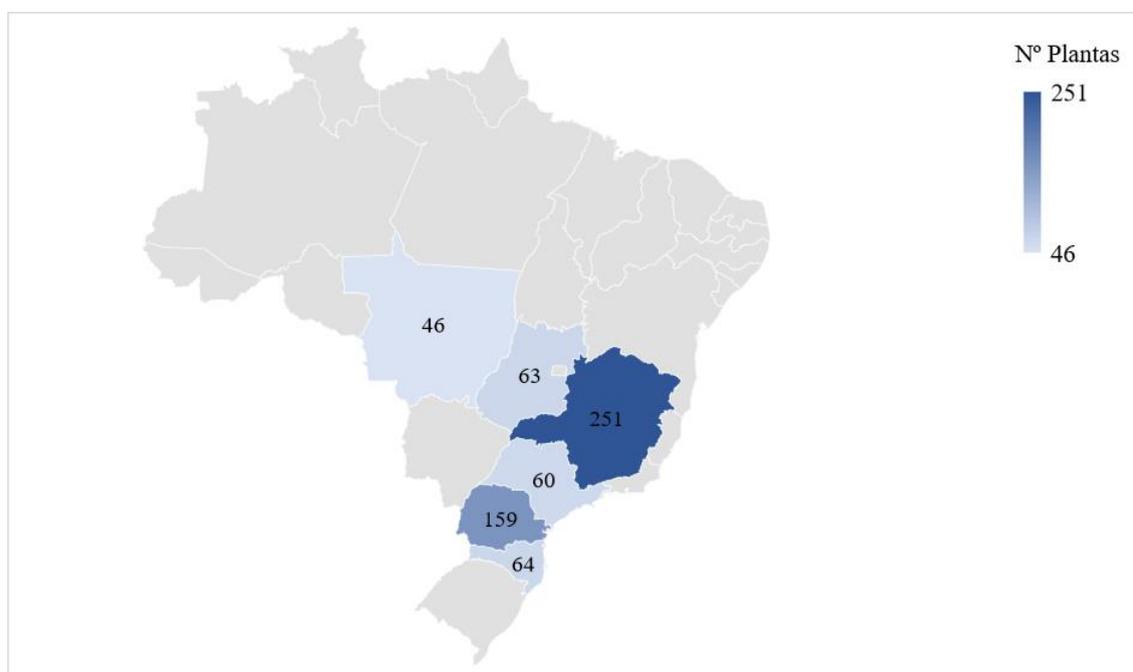


Figura 8. Número de plantas de biogás em operação.

Fonte: Adaptado CibioGás (2021).

No que concerne ao volume de biogás produzido, conforme ilustrado na Figura 9, no ano de 2021 se destacaram os estados de São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), Paraná (PR), Minas Gerais (MG), Pernambuco (PE) e Ceará (CE). São Paulo se manteve à frente dos demais

estados com o volume de 798 milhões de Nm^3/ano , representando mais do que o dobro do volume produzido no Rio de Janeiro (392 milhões de Nm^3/ano).

O estado de São Paulo abriga a maior quantidade de usinas de grande porte, que em sua maioria utilizam resíduos industriais e RSU. No Rio de Janeiro existem apenas 10 plantas de biogás em operação (90% dessas plantas são sistemas que aproveitam RSU), mas representam 17% do total do volume nacional produzido. Assim como nos estados anteriores, Pernambuco e Ceará, também possuem um número pequeno de plantas em operação, sendo 6 no estado de Pernambuco e 3 no estado do Ceará, mas apresentam produção significativa 145 e 110 milhões de Nm^3/ano , respectivamente (CIBIOGÁS, 2021).

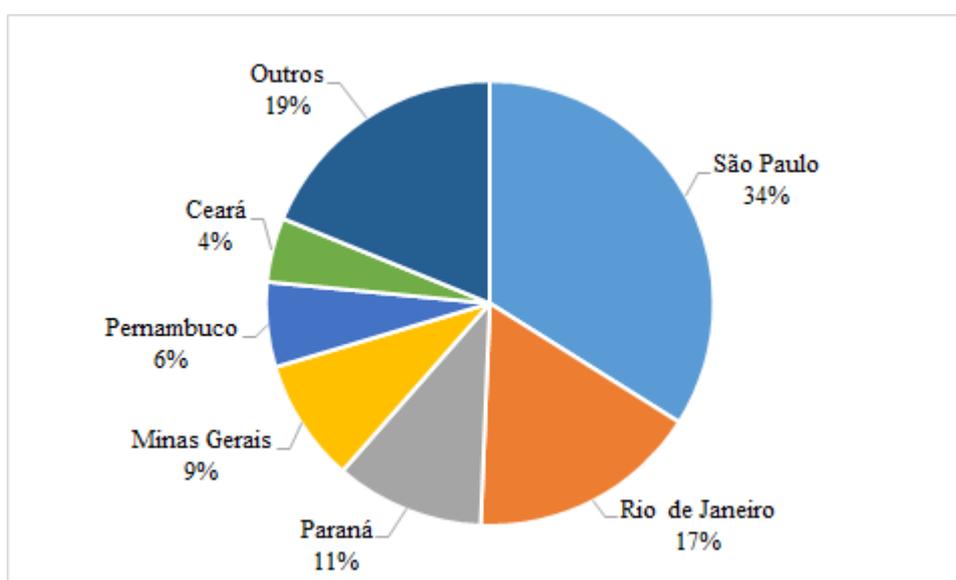


Figura 9. Volume de biogás por estado (milhões de Nm^3/ano).

Fonte: Adaptado Cibiogás (2021).

Teoricamente, o potencial brasileiro para a produção de biogás é de 84,6 bilhões de Nm^3/ano , sendo que apenas 2,78% da capacidade produtiva é utilizada atualmente, conforme apresentado na Figura 10. Operando em sua capacidade teórica, a produção de biogás seria suficiente para atender 40% da demanda interna de energia elétrica e 70% do consumo de diesel (ABIOGÁS, 2021). Além disso, o potencial teórico de produção no curto prazo, equivalente a 10,8 bilhões de Nm^3/ano , cerca de 4,5 vezes a produção atual (I17, 2021).

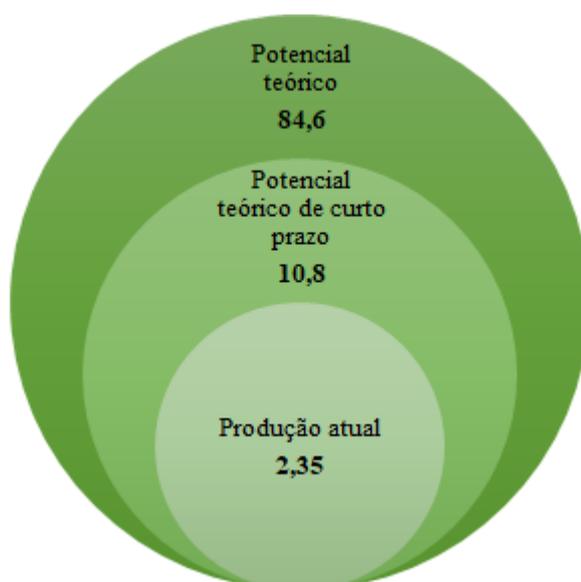


Figura 10. Potencial de produção de biogás no Brasil (em bilhões de Nm³/ano).

Fonte: ABiogás (2021), I17 (2021) e CIBiogás (2021).

Considerando a produção de biogás em 2021, a agropecuária representa 80% das plantas de biogás em operação, mas respondem pela produção de apenas 10%, por serem em sua maioria de menor porte. Por outro lado, o RSU contribuí com apenas 11% das plantas em operação e representam 74% do volume de biogás produzido, por serem plantas de maior porte (CIBIOGÁS, 2021). Na Figura 11, é ilustrado o percentual de plantas em operação no país por substrato.

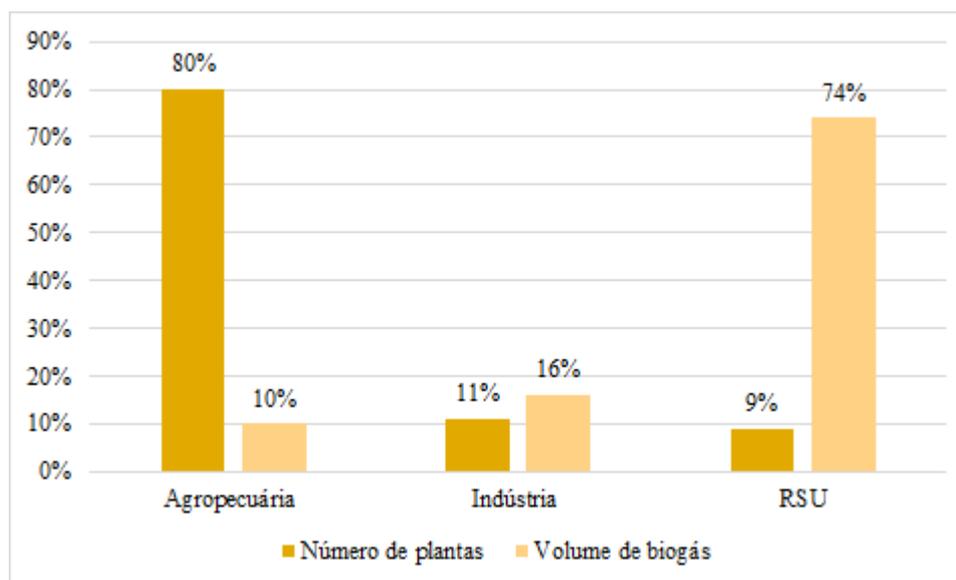


Figura 11. Plantas em operação por fonte de substrato.

Fonte: CIBiogás (2021).

Das plantas em operação no Brasil, 87% são destinadas à conversão do biogás em eletricidade. Devido à simplicidade no processo de conexão, a maioria das plantas são sistemas de GD, justificado pelo estímulo da compensação de créditos na conta de energia elétrica (CIBIOGÁS, 2021).

A GD por meio de biogás, é composta por 173 plantas conectadas à rede, que apresentam capacidade instalada de aproximadamente 25 MW. Deste total, a maior parte das plantas são movidas a dejetos de animais, que são representadas por 122 plantas e correspondem a 70,5% das conexões de plantas de biogás que se enquadram na modalidade de GD.

Por sua vez, a geração por meio de dejetos de animais apresenta capacidade instalada de quase 17 MW, aproximadamente 68% de toda a capacidade de GD à base de biogás. Além disso, conforme ilustrado na Figura 12, a maior parte das conexões por estado estão em Minas Gerais (65 plantas e 8,36 MW), seguido de Santa Catarina (15 plantas e 1,86 MW), Goiás (9 plantas e 1,33 MW), Paraná (9 plantas e 0,85 MW) e São Paulo (8 plantas e 0,80 MW) (ANEEL, 2022).

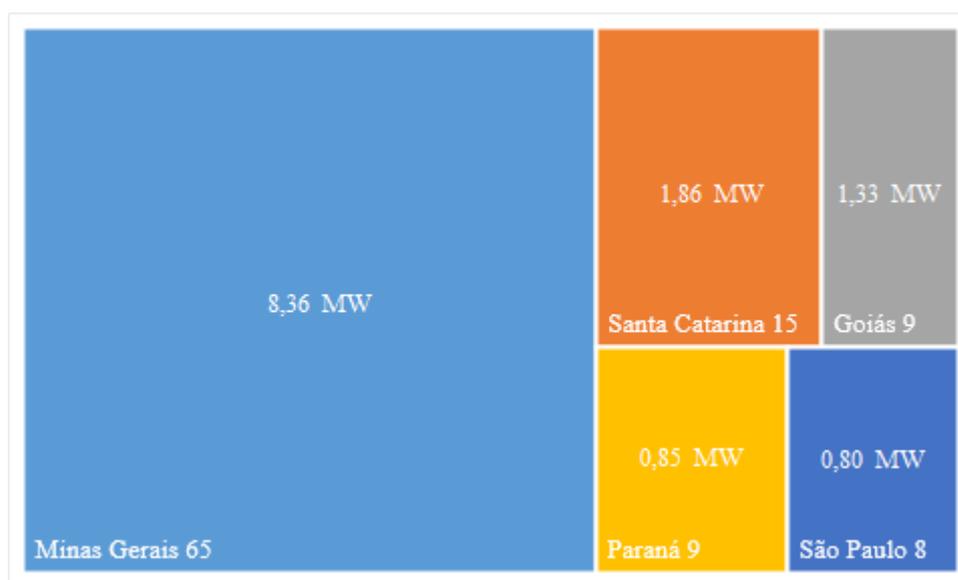


Figura 12. Número de plantas e capacidade instalada de GD a biogás.

Fonte: Adaptado ANEEL (2022).

Dentro os sistemas de menor porte, apropriados para a GD, os mais populares utilizam como substrato os dejetos de animais em empreendimentos agropecuários. O volume dessa matéria-prima é abundante no país, visto que a pecuária brasileira apresenta potencial energético para gerar 13.452,96 GWh/ano pela queima do biogás de dejetos de aves, suínos e vacas ordenhadas (TÖRNWALL, PETTERSSON e THORIN, 2017; SENAI, 2016).

Deste modo, o aproveitamento de dejetos animais para a produção de biogás é promissor no mercado brasileiro, principalmente o biogás proveniente da suinocultura, pois mesmo gerando um volume menor de dejetos quando comparado aos bovinos, o esterco do suíno é o segundo em termos de eficiência na produção de biogás, perdendo apenas para os dejetos da avicultura (OLIVEIRA et al., 2020; BUMBIERE et al., 2020). Em complemento, no Brasil já existem diversos empreendimentos bem-sucedidos no aproveitamento de dejetos suínos, tais como: a Granja São Pedro Colombari, a Minicentral Termelétrica a Biogás, Unidade de Produção de Biogás Cerâmica Stein, e a usina híbrida de Ouro Verde do Oeste que é baseada na fonte solar FV e o biogás da suinocultura.

2.3 Mercado de energia solar FV

Existem basicamente dois tipos de geração de energia solar integrada à rede de energia elétrica: energia solar concentrada (CSP, do inglês *Concentrate Solar Power*) e energia solar FV (NWAIGWE, MUTABILWA e DINTWA, 2019). A geração CSP, também conhecida como energia térmica solar, é semelhante à energia térmica convencional que converte vapor (energia térmica) em eletricidade. Neste sentido, os sistemas solares FV são distintos dos sistemas térmicos por não usarem o calor do sol e sim a luz solar para a produção de energia (NWAIGWE, MUTABILWA e DINTWA, 2019). Por sua vez, a fonte FV é o principal meio de geração de energia elétrica através da energia solar, respondendo por aproximadamente 99% da capacidade global de energia solar instalada, o que comprova o potencial dessa fonte para contribuir com a geração de energia de baixo carbono nas próximas décadas (REN21, 2020; PENG, LU e YANG, 2012; IEA, 2020).

A transformação da irradiação solar em corrente elétrica é obtida por meio do efeito fotovoltaico. O processo ocorre quando os fótons de luz solar são absorvidos pelas células FV, compostas por um material semicondutor. A energia dos fótons de luz é transferida para os elétrons que se movimentam e geram corrente elétrica direta (corrente contínua). Utilizando inversores e outros componentes, a corrente contínua é convertida em corrente alternada para ser injetada na rede elétrica (TYAGI et al., 2013; MUNDO-HERNÁNDEZ et al., 2014). A Figura 13 ilustra o funcionamento de uma célula FV.

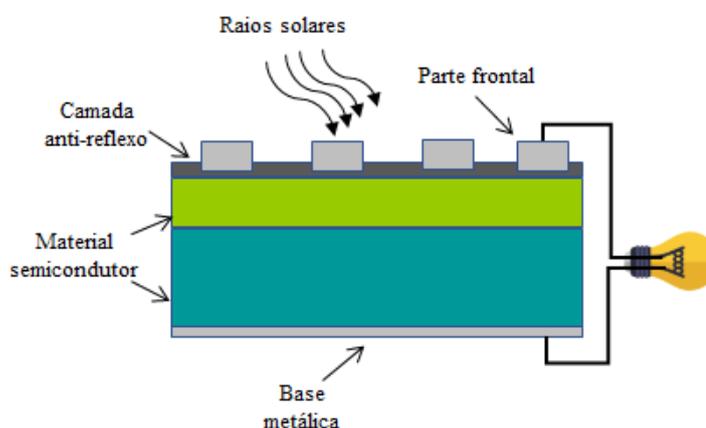


Figura 13. Funcionamento de uma célula FV.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023).

Para a geração de energia solar FV em maior escala faz-se necessário o agrupamento das células FV. O conjunto de células FV é denominado módulo FV, sendo que o conjunto de módulos compõem um painel FV. Uma vez que a produção de energia elétrica a partir da tecnologia FV apresenta grande dependência da irradiação solar, é fundamental que haja um planejamento técnico e econômico dos sistemas solares FV, considerando as variáveis ambientais do local onde será instalado o sistema (NAVABI et al., 2015).

Pesquisas com materiais semicondutores de células solares são desenvolvidas desde 1960, com o objetivo de reduzir custo de material e aumentar a capacidade produtiva (RAZYKOV et al., 2011). A maior parte das células FV oferecidas no mercado são feitas com silício monocristalino (produzida a partir de um único cristal de silício) ou policristalino (produzida a partir de um bloco de cristais de silício), bem como tecnologias de filme fino, feita de camadas finas de materiais fotossensíveis (silício amorfo, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio) (AQACHMAR et al., 2021; ALAMI et al., 2022). A eficiência de módulos FV comerciais estão na faixa de 20% a 23%, dependendo do fabricante, materiais, tipo de tecnologia, localização e técnicas de fabricação (ENERGYSAGE, 2023).

Parida, Iniyar e Goic (2011) avaliaram as tecnologias solares FV e concluíram que o aumento constante da eficiência, diminuição dos custos e poluição mínima combinadas, resultaram na aplicação da tecnologia solar FV em vários projetos de energia, dentre eles sistemas prediais, residenciais e comerciais, além de outras aplicações.

A redução de custos dos componentes dos módulos solares FV, alavancam a utilização da tecnologia em todo mundo. O Custo Nivelado de Energia (LCOE, do inglês *Levelized Cost of Energy*) médio ponderado global da energia solar FV diminuiu em 88% no intervalo de 2010 para 2021, de US\$ 0,417/kWh para US\$ 0,048/kWh. Especificamente de 2020 para 2021 houve uma redução de 13%, sendo que a evolução do LCOE neste intervalo está detalhada na Figura 14. A redução do LCOE de 2020 para 2021 foi impulsionado por um declínio no custo total instalado médio ponderado global para esta tecnologia de 6%, que diminuiu de US\$ 916/kW em 2020 para US\$ 857/kW para projetos comissionados em 2021 (IRENA, 2021).



Figura 14. Evolução do LCOE solar FV no mundo.

Fonte: Adaptado IRENA (2021).

O sistema FV é formado por um grupo de módulos solares que juntos operam para gerar eletricidade, como um sistema autônomo (usado em áreas remotas onde não há rede elétrica) ou conectado à rede (a eletricidade gerada é injetada na rede elétrica pública) (MUNDO-HERNÁNDEZ et al., 2014). No entanto, destacam-se três barreiras importantes para o uso mais amplo da energia solar FV: (1) a geração de eletricidade a partir desta fonte é limitada, devido à intermitência da fonte ao longo do dia; (2) depende das condições climáticas locais, pois o clima e irradiação solar variam conforme a localização do sistema solar FV; (3) a geração flutua fortemente ao longo do ano, uma vez que as diferentes estações do ano geram níveis distintos de irradiação solar (JOSHI, DINCER e REDDY, 2009).

A energia solar FV está entre as fontes de energia mais adotadas devido à sua confiabilidade, capacidade de produzir eletricidade a um custo razoavelmente baixo e pequeno espaço territorial ocupado, apesar de suas intermitências (IRENA, 2020). As principais limitações da energia solar FV são sua incapacidade de produzir eletricidade na ausência de radiação solar e a intermitência de sua produção, causada por distúrbios climáticos (MAINALI e DHITAL, 2015). As principais vantagens e desvantagens da geração de energia solar FV estão elencadas no Quadro 3.

Quadro 3. Vantagens e desvantagens da geração de energia solar FV.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Nenhuma emissão de CO₂ e nenhum ruído durante a produção de eletricidade; - Vida útil de aproximadamente 30 anos, após o comissionamento; - Ampla gama de aplicações (residências, prédios comerciais, grandes usinas e outras); - Nenhum risco ambiental no uso e descarte do silício (material abundante); - Depende apenas do sol para gerar energia (combustível gratuito e constante); - Os módulos fotovoltaicos podem ser reciclados (redução de preços em equipamentos novos) e possuem baixa manutenção; - Pesquisas realizadas continuamente para melhorar eficiência, aparência, reciclagem e custos de módulos e sistemas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dependência do desenvolvimento da tecnologia para aumentar a utilização (amadurecimento na eficiência das células e redução de custos); - Limite de produção de energia por fatores técnicos (eficiência de conversão, limites de acesso à terra e a natureza difusa e intermitente desse recurso natural); - Sazonalidade de geração ao longo do ano; - Alta tecnologia, alto volume de materiais e pessoal altamente qualificado são necessários para construir e operar um sistema fotovoltaico.

Fonte: Adaptado de Joshi, Dincer e Reddy (2009), Mundo-Hernández et al. (2014) e Alami et al. (2022).

A demanda por energia solar FV está se expandindo como a opção mais competitiva para fornecimento de energia em escala comercial e residencial, em um número crescente de países ou regiões ao redor do mundo. Essa tendência foi atribuída principalmente à melhoria contínua das tecnologias e à redução dos custos dos módulos, graças ao apoio de políticas e investimentos governamentais em todo o mundo (MA, YANG e LU, 2014a; DING et al., 2020).

A tecnologia solar FV é amplamente adotada devido à sua simplicidade para geração de eletricidade. Ao comparar as tecnologias de energia renovável e sua adoção global, os sistemas movidos a energia solar e especialmente os sistemas FV são os que mais crescem rapidamente (ALAMI et al., 2022). Face ao exposto, a capacidade instalada mundial para a geração solar FV tem crescido exponencialmente ao longo dos anos, considerando o intervalo de 2011 a 2021 houve um aumento de 70 GW para 942 GW, crescimento de aproximadamente 12,5 vezes (REN21, 2022). A energia solar FV desempenha um papel cada vez mais proeminente no fornecimento de energia com uma capacidade global prevista de 4,6 TW, representando 16% da geração total de energia global até 2050 (IEA, 2014).

Embora a tecnologia FV esteja amadurecendo, ela não é distribuída uniformemente em todo mundo. O número de países que estão usando eficientemente essas tecnologias é limitado. Há carência de usinas solares em alguns países com grande potencial solar, seja por estudos insuficientes de viabilidade e otimização que recomendem a adoção de tais tecnologias, seja pela ausência de vontade política e de arcabouço regulatório estável para concretizar esses estudos (AQACHMAR et al., 2021).

De acordo com dados do IRENA (2021), detalhados na Tabela 1, destacam-se China (com aproximadamente 307 GW de capacidade instalada), seguido de EUA (95 GW), Japão (74 GW), Alemanha (59 GW) e Índia (50 GW). Pelo nono ano consecutivo a Ásia dominou as instalações de solares FV, representando 52% (94,64 GW) da capacidade global adicionada em 2021, dos quais, China representa 54,9 GW e Índia 13 GW. Além disso, vale ressaltar o crescimento em 2021 dos EUA (26,9 GW), Japão (6,5 GW) e Brasil (5,5 GW) (REN21, 2022).

Tabela 1. Ranking de capacidade solar FV.

País	Capacidade Instalada (GW)	Representatividade (%)
China	307,0	32,6
EUA	95,2	10,1
Japão	74,2	7,9
Alemanha	58,7	6,2
Índia	49,7	5,3
Austrália	22,9	2,4
Itália	22,7	2,4
República da Coreia	18,2	1,9
Vietnã	16,7	1,8
Espanha	16,0	1,7
França	14,7	1,6
Holanda	14,2	1,5
Brasil	13,1	1,4
Outros	218,9	23,2
Mundo	942,0	100,0

Fonte: Adaptado de IRENA (2022).

Na América Latina, a adoção da tecnologia solar FV continuou a crescer, apesar da lenta recuperação dos impactos gerados pela pandemia de COVID-19. Os melhores desempenhos de capacidade recém-instalada em 2021 foram Brasil (5,5 GW), México (1,8 GW) e Chile (1,3 GW). Com o incremento de 5,5 GW de capacidade instalada em 2021, o Brasil liderou o crescimento na América Latina, atingindo um total de aproximadamente 13 GW e, obteve destaque mundial ao assumir a quinta posição no ranking mundial de crescimento de capacidade em energia solar FV (REN21, 2022).

No Brasil a matriz de energia elétrica apresenta grande participação de FER, na qual a solar FV se destaca pelo crescimento exponencial ao longo da última década, conforme ilustrado na Figura 15 (EPE, 2022). O país possui potencial reconhecido para o desenvolvimento de FER, incluindo a geração solar FV (PEREIRA et al., 2012; SILVA, NETO e SEIFERT, 2016). Assim, a produção de energia solar FV concentra as maiores taxas de crescimento entres as FER no país (ROSA et al., 2020; RIGO et al., 2020).

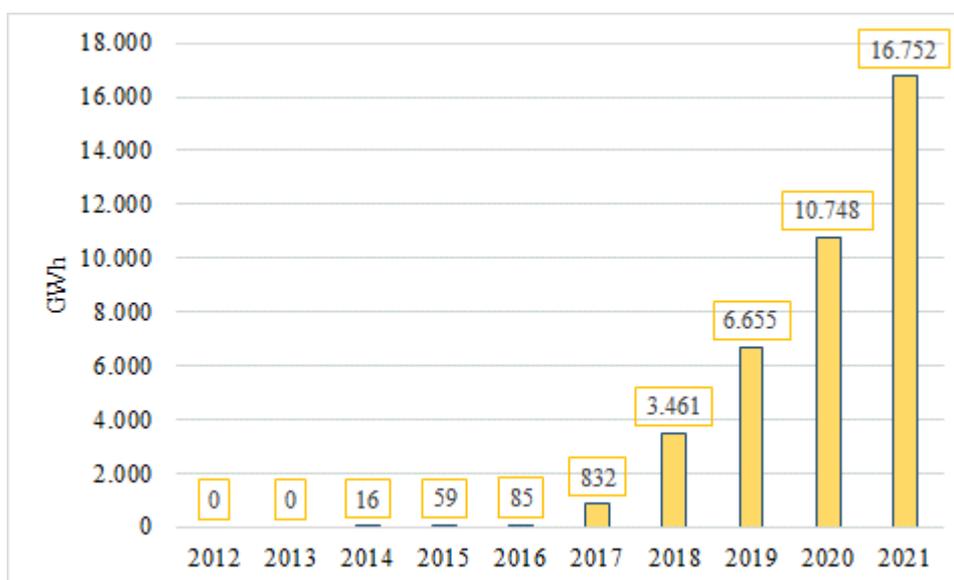


Figura 15. Evolução da geração solar FV no Brasil de 2012 a 2021.

Fonte: Adaptado EPE (2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018a, 2019, 2020, 2021 e 2022).

Devido ao alto nível de irradiação solar, redução dos custos de sistemas FV e incentivos governamentais, como o mecanismo de compensação de energia para GD, a geração de energia solar FV ganhou participação na matriz elétrica e atualmente representa cerca de 2,6% da produção de energia elétrica brasileira (PEREIRA et al., 2017; GARCEZ, 2017; EPE, 2022). A

Figura 16 detalha a participação da capacidade instalada da fonte solar FV em relação a outras fontes utilizadas na geração de eletricidade no ano de 2021.

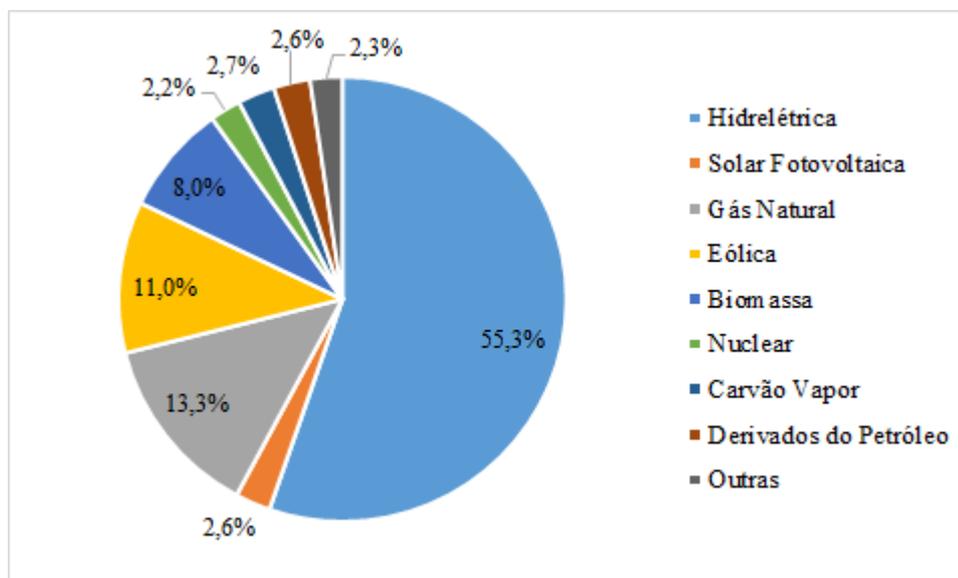


Figura 16. Matriz elétrica brasileira em 2021.

Fonte: Adaptado EPE (2022).

As usinas FV brasileiras são instaladas em duas modalidades Geração Centralizada (GC) e GD. Usinas GC possuem geração em larga escala e a energia é comercializada em leilões promovidos pela ANEEL. O crescimento da GC é mais lento quando comparado à GD, devido à competitividade imposta pelas hidrelétricas (REDISKE et al., 2020). Entretanto, na GD a fonte solar FV apresentou em 2021 uma participação de 97,2% em relação a outras fontes (hidrelétrica, eólica, biomassa e biogás) (RIGO et al., 2022).

A capacidade instalada de energia solar FV distribuída no Brasil aumentou nos últimos anos, chegando a 7 GW em 2021, após um crescimento anual de 75% entre 2020 e 2021 (ANEEL, 2022). Aproximadamente 41% dessa capacidade instalada está no setor residencial (GREENER, 2020).

De acordo com Rigo et al. (2020) e Rigo et al. (2019b), o sucesso da GD solar FV se deve à facilidade de instalação, manutenção reduzida e queda constante nos custos dos equipamentos, além de uma cadeia de suprimentos, logística e profissionais atuantes na área. Santos e Lucena (2021) complementam que a crescente expansão da capacidade instalada solar

FV distribuída, o grande número de residências urbanas e alta disponibilidade do recurso também contribuem para o avanço da energia solar FV no país.

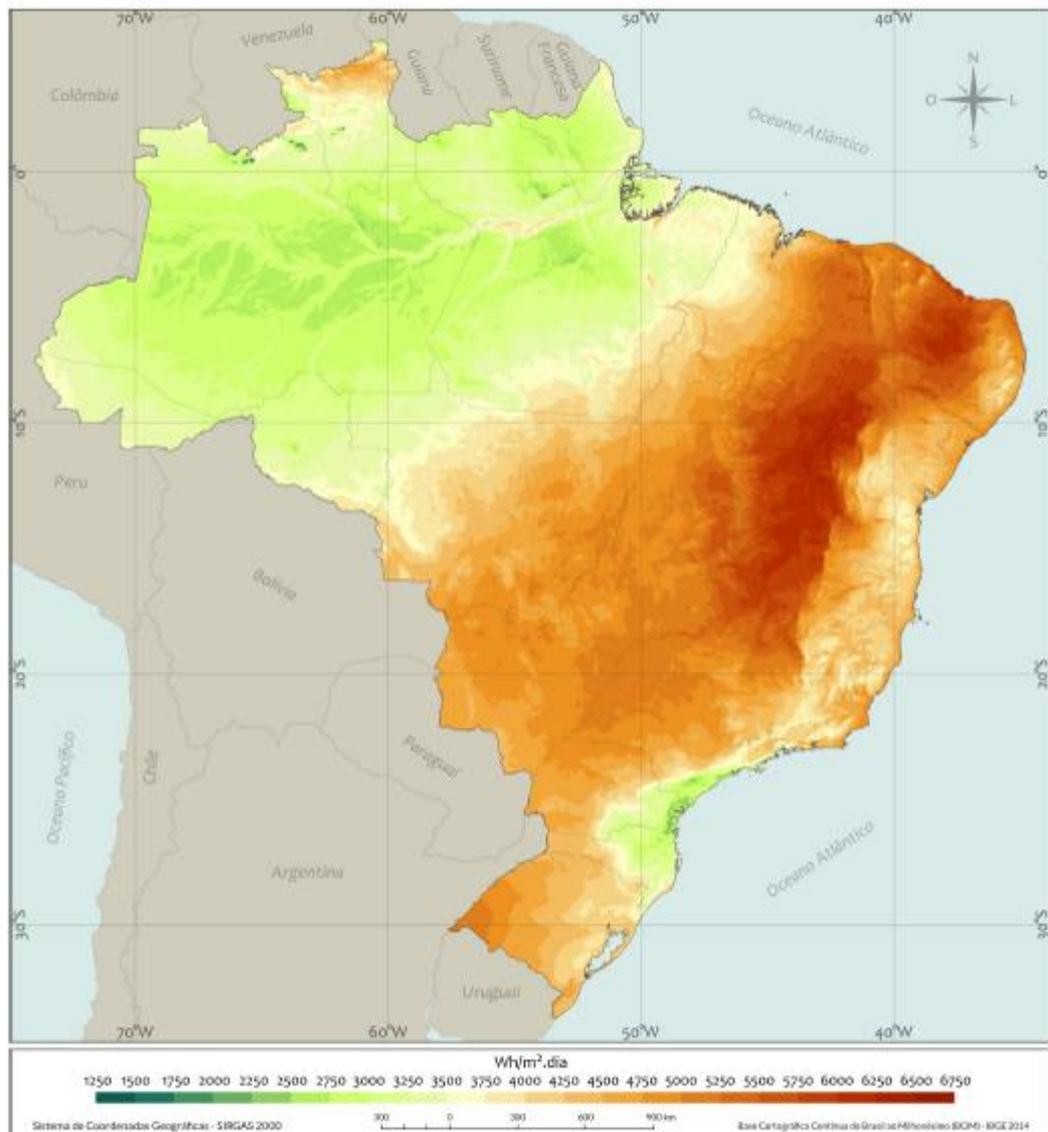


Figura 17. Mapa brasileiro da média anual de irradiação solar.

Fonte: Pereira et al. (2017).

O Brasil possui dimensões continentais, é um dos maiores países do mundo, apresenta 8,5 milhões de km^2 de área, população com mais de 215 milhões de habitantes, localizado em sua totalidade na zona tropical, no qual todas as regiões apresentam níveis médios de radiação solar superior a países da Europa como Alemanha, França e Espanha, que apresentam

capacidade instalada solar FV superior à brasileira. O maior nível de radiação solar se encontra no interior do Nordeste brasileiro é de cerca de 6,5 kWh/m² ao dia, quase o dobro da máxima registrada na Alemanha (3,4 kWh/m² ao dia) (RIBEIRO, AROUCA e COELHO, 2016; IBGE, 2022; SIMIONI e SCHAEFFER, 2019). O potencial de irradiação solar brasileiro é ilustrado na Figura 17.

A GD solar FV se destacou após a resolução 482/2012 introduzida no Brasil pela ANEEL, possibilitando o funcionamento do *net-metering* no país (JANNUZZI e MELO, 2013). Essa resolução normativa viabilizou a GD no Brasil, principalmente a microgeração solar FV (ROCHA et al., 2017a). Posteriormente, devido à baixa adesão à GD nos primeiros anos, o marco normativo foi revisado e melhorado, resultando nas resoluções 687/2015 e 786/2017 (RIGO et al., 2019a). A implantação da norma, seus desdobramentos e demais incentivos como o Convênio ICMS 16, que consiste na isenção do imposto sobre comercialização para os sistemas de GD contemplados pelo *net-metering* brasileiro, e linhas de financiamento subsidiadas, viabilizaram investimentos em GD (SANTOS e LUCENA, 2021).

Mesmo com o desenvolvimento de um arcabolo regulatório, incentivos e elevado potencial de irradiação solar, a GD ainda é pouco difundida no Brasil e se concentra em alguns estados das regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste, com destaque para o estado de São Paulo (SP) que lidera o número de instalações de plantas solar FV, de acordo com a Figura 18 (ANEEL, 2023a).

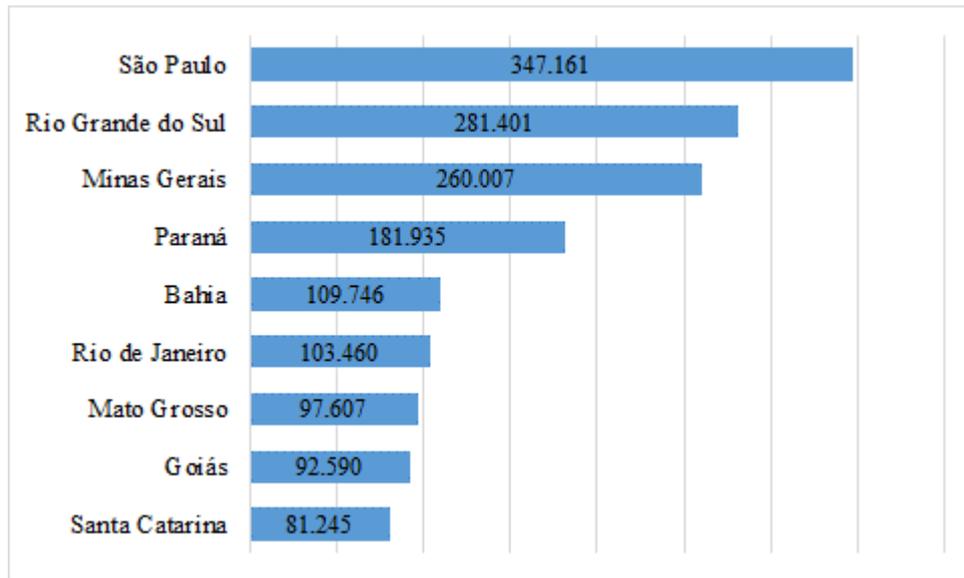


Figura 18. Número de instalações solar FV por estado brasileiro.

Fonte: Adaptado ANEEL (2023a).

O maior desenvolvimento da GD solar FV em São Paulo (SP) é resultado de isenção de ICMS ao longo de todo ciclo de vida do projeto de investimento e potencial para a geração solar FV. Os estados com maior capacidade instalada de solar FV estão descritos na Figura 19.

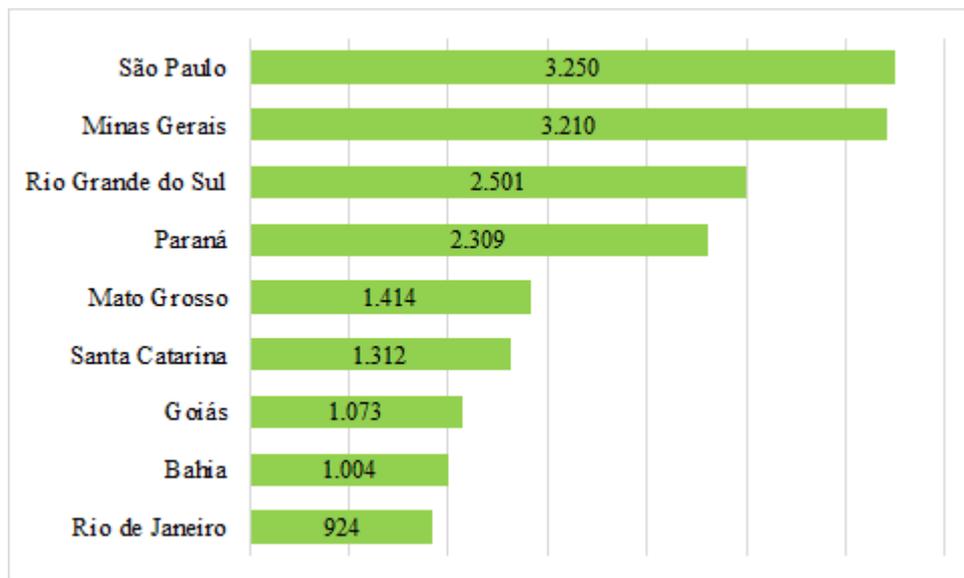


Figura 19. Capacidade instalada solar FV por estado brasileiro em MW.

Fonte: Adaptado ANEEL (2023a).

De acordo com Aquila et al. (2017), a utilização da energia solar FV no Brasil sofreu atrasos, uma vez que a fonte não participou do Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). O PROINFA foi a primeira política relevante de energia renovável para fontes alternativas no país, criada pelo governo por meio da Lei nº 10.438/2002, que buscou incentivar pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), usinas eólicas e usinas térmicas movidas a biomassa.

Martelli, Chimenti e Nogueira (2020) complementam que a GD, principalmente solar FV, está regulamentada no Brasil desde 2012, mas sua adoção ainda é incipiente quando comparado ao enorme potencial de irradiação solar que o território brasileiro possui.

Para Santos e Lucena (2021), a energia solar FV é uma alternativa robusta de geração de energia renovável para o país, porém mudanças nas tarifas de eletricidade, custo de instalação de sistemas solares FV e mecanismos regulatórios podem afetar consideravelmente o potencial de crescimento solar FV, pois influenciam na viabilidade dos investimentos na fonte.

No entanto, em 2022 foi publicada a Lei 14.300, criando um marco legal para a GD no Brasil e, atualizando as regras na RN482. Como principal mudança a nova lei modifica a forma de compensação de energia injetada na rede, onde a parcela referente à tarifa TUSD Fio B deve ser paga sobre toda a energia consumida da rede, independentemente de compensação. Todos os projetos de GD aprovados após janeiro de 2023 estarão sujeitos à nova lei (PLANALTO, 2022).

A nova lei foi aprovada para sanar dois impactos negativos causados pela regulamentação 482/2012 e suas atualizações: (1) o subsídio cruzado de consumidores para prosumidores, uma vez que os proprietários não fotovoltaicos subsidiam custos de rede que os prosumidores evitam pagar e; (2) a chamada “espiral da morte”, em que uma distribuidora perdia continuamente uma parte considerável do mercado (EID et al., 2014).

Iglesias e Vilaça (2022), realizaram uma análise técnico-econômica comparando as alternativas de valorização da energia injetada na rede pelo prosumidor proposta na resolução 482/2012 e na Lei 14.300/2022. A atualização do sistema de compensação de energia da resolução 482 por meio da Lei 14.300 leva a um prejuízo na viabilidade econômica do investimento em sistemas fotovoltaicos, uma vez que o LCOE médio aumenta em 22% enquanto o tempo de retorno médio aumenta em 29%, reduzindo o interesse de investidores.

Isso ocorre uma vez que a compensação *net-metering* deixa de ser realizada através de todos os componentes da tarifa, como na resolução 482, sendo exigido o pagamento do componente transporte denominado Fio B, que incide sobre a energia consumida independentemente da energia injetada na rede. Além disso, conforme os resultados encontrados pelos autores supracitados, estima-se que os prejuízos de viabilidade econômica contribuam para uma redução no número esperado de adotantes desta tecnologia e desacelere o crescimento em 34%, devido exclusivamente à atualização do sistema de compensação proposto pela Lei 14.300.

Frente à queda dos retornos de projetos de GD trazidas pela nova lei, muitos investidores se anteciparam para implantar projetos de GD, em sua maioria solar FV, visando aproveitar o período de vacância da lei de janeiro de 2022 a janeiro de 2023 (PLANALTO, 2022). De acordo como os dados divulgados pela ANEEL houve um crescimento acelerado da capacidade instalada de GD solar FV até o final de 2022, por causa da recente e sancionada Lei nº 14.300, atingindo atualmente 24 GW (PLANALTO, 2022; ANEEL, 2023a).

Doyle et al. (2021) sugerem a elaboração de outros subsídios governamentais, como outros países têm realizado, para evitar a queda repentina da viabilidade de projetos de investimentos em GD devido a alterações legais, para continuar promovendo FER no país. Outra forma de melhorar a viabilidade dos sistemas de GD é a combinação entre FERs, originando os chamados sistemas de geração híbridos.

Trannin (2016) destaca que as principais vantagens na geração a partir de sistemas híbridos são: (1) complementaridade entre as fontes e; (2) economia de escala, que reduz do custo médio de geração. Um exemplo real de sistema de geração híbrido na modalidade de GD, é a usina híbrida localizada em Ouro Verde do Oeste (Paraná), que explora a complementaridade entre as fontes solar FV e biogás da suinocultura, na qual a geração solar FV funciona ao longo do dia e, no período da noite o biogás produzido é queimado em motogeradores pra evitar que haja intermitência no sistema. Além disso, a combinação entre as fontes aumenta a geração de energia do sistema, reduzindo o custo médio do kWh produzido.

2.4 Planejamento econômico de sistemas híbridos

Algumas fontes de energias renováveis, como a solar e a eólica, são ilimitadas e limpas, porém têm como limitação o aspecto intermitente. Para contornar este problema, umas das alternativas é recorrer a uma mistura de várias fontes de energia, o que resulta nos sistemas híbridos de energia renovável (AMMARI et al., 2022).

Os sistemas híbridos de geração de energia se caracterizam por combinar duas ou mais fontes de energia, sendo geralmente uma delas uma fonte de energia renovável, tal como o exemplo de sistema híbrido biogás-solar FV, ilustrado na Figura 20 (DESHMUKH e DESHMUKH, 2008).

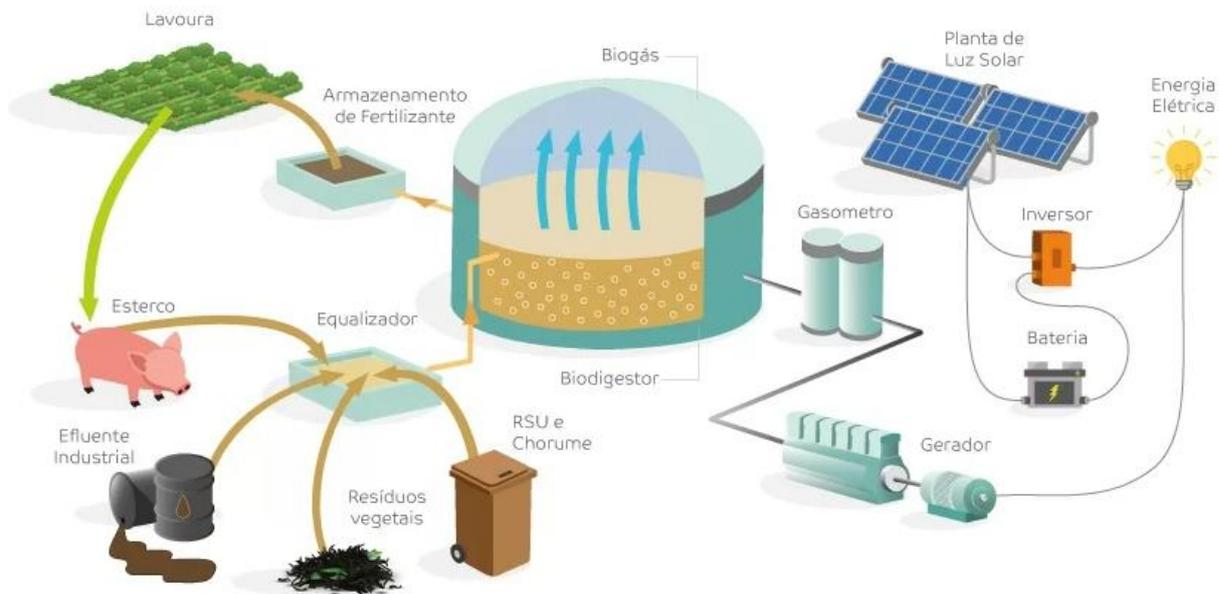


Figura 20. Sistema híbrido biogás-solar FV.

Fonte: Canal Bioenergia (2022).

Além da combinação biogás-solar FV, outras combinações de tecnologias têm sido propostas por desenvolvedores de projetos de geração de energia elétrica e fabricantes de equipamentos, sendo que algumas delas estão detalhadas na Quadro 4 (EPE, 2018b).

Quadro 4. Tipos de sistemas híbridos

Eólica + Solar FV	Devido à menor incidência de ventos diurnos em algumas regiões, e a ausência de radiação solar no período noturno, há possibilidade de otimização de custos de operação e investimento ao se combinar essas fontes.
Hidráulica + Solar FV	Pela grande disponibilidade de área nos espelhos d'água de hidrelétricas, existem projetos que utilizam painéis fotovoltaicos com flutuadores sobre a área alagada, com possível complementariedade sazonal de recursos.
Biogás + Solar FV	A associação da fonte solar FV ao biogás reduz a intermitência do sistema, permitindo a geração FV durante dia, e em períodos noturnos pode ser utilizado biogás.
Heliotérmica (termossolar) + outro combustível (biomassa)	Há a possibilidade de se utilizar um combustível para aumentar o fator de capacidade de usinas heliotérmicas. Alguns projetos utilizam biomassa como combustível.
Biomassa + gás natural	A utilização de gás natural em usinas a bagaço de cana-de-açúcar, aumenta o período de despacho e eficiência dessas usinas.
Carvão + biomassa (coqueima)	Ao se queimar biomassa junto com carvão, reduz-se as emissões de CO ₂ por MWh produzido.
Solar FV + Bateria	A utilização do armazenamento em baterias reduz a intermitência do sistema.
Solar FV + Diesel + Bateria	Sistema híbrido <i>off-grid</i> , reduz custos e as emissões de CO ₂ . Comunidades isoladas e consumidores rurais aplicam estas soluções como por exemplo em pivôs de irrigação.

Fonte: Adaptado EPE (2018b), Greener (2021) e Bambokela et al. (2022).

No mercado GD fotovoltaico, já existem sistemas híbridos onde a funcionalidade do backup foi integrada à unidade geradora. Com a constante redução de custos das baterias, conforme detalhado na Figura 21, e a ampliação do uso de sistemas solares com inversores híbridos, o mercado de armazenamento de energia deverá crescer ao longo da década de 2020 (GREENER, 2021). No Brasil, a Consulta Pública 39/2023 tem por objeto obter subsídios para a inserção de sistemas de armazenamento no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) (ANEEL, 2023b).

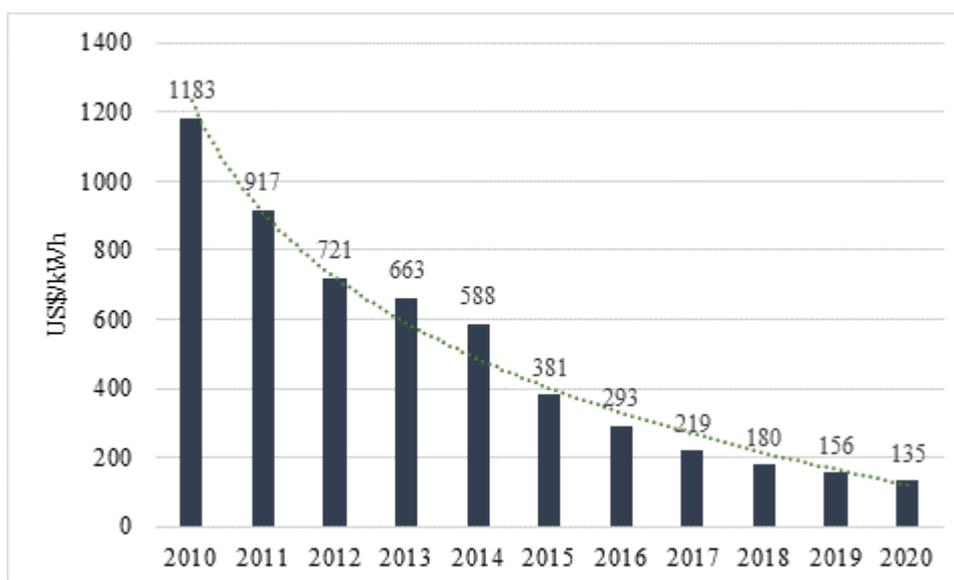


Figura 21. Preço de baterias de lítio.

Fonte: Adaptado Greener (2021).

Vale ressaltar que várias outras combinações de sistemas híbridos podem existir, alguns deles com mais de duas fontes de energia como o sistema híbrido solar FV, eólico e biomassa estudado por González et al. (2015). Estes sistemas são reconhecidos como meios eficazes para explorar localmente as energias renováveis para eletricidade e, em alguns casos, para a geração de calor. As fontes de energia que possuem características complementares entre si podem reduzir as desvantagens umas das outras, otimizando a operação energética (DESHMUKH e DESHMUKH, 2008).

Um exemplo de complementariedade entre as fontes pode ser observado nos sistemas híbridos eólico-FV, onde o regime de ventos é mais intenso à noite, enquanto a incidência de sol ocorre durante o dia (TRANNIN, 2016). Além disso, Doile et al. (2022) avaliaram a viabilidade econômica de sistemas híbridos solar FV-eólica com bancos de baterias aplicados a GD em um cenário de mudanças regulatórias, e as conclusões mostram que há elevada probabilidade de viabilidade em todos os cenários avaliados e que a complementariedade das fontes traz benefícios ao sistema. O planejamento econômico de sistemas híbridos eólico-FV tem sido alvo de investigações, como por exemplo, nos estudos de Bekele e Palm (2010), Kaabeche, Belhamel e Ibtouen (2011), Ma, Yang e Lu (2014b), Abdelkader et al. (2018),

Aquila et al. (2018), Aquila et al. (2020), Barakat, Ibrahim e Elbaset (2020), He et al. (2021) e Rocha et al. (2022).

Bekele e Palm (2010) investigaram a possibilidade de fornecer eletricidade para 200 famílias a partir de um sistema solar-eólico-bateria para uma comunidade modelo isolada da rede elétrica na Etiópia. Para dimensionar o sistema híbrido foi empregado o software HOMER® (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*) considerando os parâmetros tamanho do FV, área varrida do rotor da turbina eólica, capacidade da bateria, ângulo de inclinação do módulo PV e altura da instalação da turbina eólica, sendo que LCOE (\$/kWh) variando entre 1 e 4 foram estimados.

Kaabeche, Belhamel e Ibtouen (2011) recomendaram um modelo de dimensionamento baseado em técnica iterativa para otimizar os tamanhos de capacidade de diferentes componentes do sistema híbrido solar FV-eólico de geração de energia usando um banco de baterias, considerando os submodelos do sistema híbrido, a *Deficiency of Power Supply Probability* (DPSP) e o *Levelized Unit Electricity Cost* (LUEC), tendo sido gerado o fluxograma do modelo de dimensionamento. A otimização do dimensionamento do sistema de geração de energia solar FV-eólica foi realizada técnico-economicamente de acordo com os requisitos de confiabilidade do sistema. Para tal, foi utilizado um estudo de caso realizado em Bouzaréah, Argélia, em residências localizadas na área do Centro de Desenvolvimento de Energias Renováveis (CDER).

Ma, Yang e Lu (2014b) apresentaram um estudo detalhado de viabilidade e avaliação técnico-econômica de um sistema solar-eólico autônomo com armazenamento de energia por bateria para uma ilha remota. Adotaram o *software* HOMER® para fazer as simulações e realizar a avaliação técnico-econômica. Milhares de casos foram realizados para alcançar uma configuração ótima do sistema autônomo, em termos de *net present cost* (NPC) e *cost of energy* (COE).

Abdelkader et al. (2018) desenvolveram uma nova abordagem para otimizar o dimensionamento de um sistema solar FV-eólico com bateria. A formulação do problema de otimização é considerada pela minimização do custo total de energia elétrica e da probabilidade de perda de alimentação da carga, simultaneamente. Neste sentido, uma abordagem baseada em algoritmo genético multi-objetivo foi utilizada para dimensionar o sistema desenvolvido

considerando toda a dinâmica de armazenamento. Para obter uma configuração ótima do sistema, foram estabelecidos diferentes casos de análise econômica.

Aquila et al. (2018) desenvolveram um modelo de otimização para determinar configurações ótimas para usinas eólicas-FV em doze cidades brasileiras. Para tal, utilizaram a programação multiobjetivo, com auxílio da técnica de arranjo de misturas para modelar as funções de densidade de emissões e LCOE. O método de otimização explorado foi o NBI, sendo que para determinar a melhor solução Pareto-ótima foi explorada a métrica baseada na razão entre a entropia e o *Global Percentage Error* (GPE).

Por sua vez, em Aquila et al. (2020) foi utilizada uma otimização multiobjetivo não linear para otimizar a área ocupada de parques híbridos (eólico-solar FV), preço mínimo de viabilidade, produção de eletricidade esperada e desvio padrão da eletricidade produzida. O modelo foi criado a partir de otimização não linear utilizando o método do NBI combinado com a análise fatorial exploratória e, a relação sinal-ruído de Taguchi. Para identificar a melhor solução Pareto-ótima foi utilizado a *Technique for order performance by similarity to ideal solution* (TOPSIS).

Barakat, Ibrahim e Elbaset (2020) utilizaram *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) para configurar um sistema eólico-solar FV conectado à rede para fornecer energia a uma comunidade rural na província de Ismailia, Egito, considerando a minimização de duas funções objetivo *Loss of Power Supply Probability* (LPSP) e COE enquanto maximiza a *Renewable Energy Fraction* (REF) do sistema como a terceira função objetivo. Os resultados englobam três perspectivas: econômica, uso de energia renovável e emissão de GEE.

He et al. (2021) propuseram um método quantitativo de comparação técnico-econômica de bateria, armazenamento de energia térmica, armazenamento de água bombeada e armazenamento de hidrogênio em sistema eólico-solar FV. Nesse sentido adotaram modelos de otimização de capacidade multiobjetivos com base na minimização do LCOE (economia) e da LPSP (confiabilidade) simultaneamente. Para solucionar o problema foram avaliados quatro algoritmos evolutivos e selecionado o algoritmo evolucionário *Strength Pareto* por apresentar melhor desempenho quando aplicado em problemas de otimização de capacidade.

Rocha et al. (2022) adotaram um processo de otimização multiobjetivo para o planejamento de projetos híbridos eólico-FV com baterias. São considerados como objetivos,

o LCOE, densidade de produção de energia diversificada e o VPL. Para formulação do problema de otimização foi utilizada a técnica de arranjo de misturas e foi adotada a abordagem NBI para configuração do sistema.

A combinação entre a fonte solar FV e uma fonte não renovável, como geração de energia a diesel, aumentaria a confiabilidade do sistema, reduzindo a intermitência da geração solar FV como proposto por Fonseca et al. (2018), Roberts et al. (2018) e, Costa e Villalva (2020).

Fonseca et al. (2018) utilizam a otimização multiobjetivo a partir do método do NBI, com o suporte do *design* de experimentos por arranjo de mistura e, identificando a melhor solução Pareto-ótima com a Análise Envoltória de Dados. O intuito da investigação foi propor uma configuração ótima de sistemas híbridos solar FV-diesel com baterias, para geração de energia em quatro regiões isoladas no estado do Amazonas, norte do Brasil. Devido a alto volume de emissões de CO₂ causado pela utilização de geradores a diesel, o estudo buscou a minimização dos custos e das emissões de CO₂ no modelo de otimização.

Roberts et al. (2018) propuseram uma abordagem multiobjetivo baseada em simulação probabilística para dimensionamento de Sistemas Híbridos de Energia robustos baseados em energia renovável. O método integra um Módulo de Otimização baseado em Algoritmo Genético multiobjetivo, um Módulo de Incerteza que utiliza o método *Latin Hypercube Sampling* e Simulação de Monte Carlo para gerar cenários de incerteza e, um Módulo de Simulação para simular o sistema elétrico em condições reais de operação. O método foi aplicado para dimensionar um sistema eólico-FV, com diesel e banco de baterias, para abastecer uma típica comunidade isolada na região Amazônica do Brasil.

Costa e Villalva (2020) avaliaram um estudo de caso de um sistema isolado híbrido diesel-FV na reserva extrativista Tapajós-Arapiuns na região amazônica brasileira. A planta estudada é formada por sistema solar FV, banco de baterias eletroquímicas de chumbo-ácido e, um gerador a diesel. Foi utilizado o software HOMER® para encontrar a solução ótima que reduzisse ao máximo a utilização do diesel.

Além disso, a combinação solar FV pode ser realizada com outros combustíveis como destacado nos trabalhos de Silva, Severino e Oliveira (2013) que avaliaram o uso de um sistema FV com célula de combustível (dispositivo eletroquímico que produz eletricidade através da reação de hidrogênio e oxigênio na presença de um eletrólito) e, bateria para o fornecimento de

energia elétrica em uma comunidade isolada, localizada no estado do Tocantins. O estudo se concentrou em questões técnicas e de custo de um projeto-piloto implantado em uma área de proteção ambiental. Após a otimização foi realizada uma análise comparativa dos custos do sistema híbrido como auxílio do programa HOMER®.

Por outro lado, Zhu et al. (2020) exploram a complementaridade entre duas fontes renováveis hídrica-FV, pois a integração de energia hidrelétrica despachável e energia solar FV não despachável é promissora para alcançar o uso eficiente dos recursos. Nesse sentido os autores propuseram um modelo multiobjetivo que otimiza simultaneamente o benefício econômico e a segurança operacional do sistema híbrido. Um algoritmo evolutivo multiobjetivo baseado em modelagem de frente genérica paralelo (GFM-MOEA) é projetado para produzir um conjunto de soluções Pareto ótimas, para decisão da configuração mais adequada do sistema. Posteriormente, o modelo é aplicado ao sistema de energia de Longyangxia na China, maior usina hidro-FV do mundo.

Outros estudos desenvolvidos como Bekele e Tadesse (2012) e Ren et al. (2021) combinam três fontes (hídrica-FV-eólica) visando aproveitar ao máximo os recursos disponíveis de um local. No trabalho de Bekele e Tadesse (2012) foi estudada viabilidade de um sistema híbrido de abastecimento elétrico baseado em hídrica-solar FV-eólica de pequena escala para uma região isolada na Etiópia. O software HOMER® é utilizado para a configuração ótima do sistema híbrido baseado em NPC, COE e REF. Já Ren et al. (2021) propuseram em seu estudo uma otimização multiobjetivo para o sistema integrado hídrica- FV-eólica. Para obter a máxima geração de energia com flutuações mínimas, foi utilizado um *Developed Owl search algorithm* (DOSA) com três soluções na fronteira de pareto.

Sistemas híbridos biomassa-FV podem ser uma opção alternativa para regiões onde o recurso solar é moderado, mas os recursos de biomassa estão prontamente disponíveis. Dessa forma, González et al. (2015) propuseram uma metodologia de otimização apenas do custo mínimo do ciclo de vida de um sistema híbrido de energia renovável baseado em energia solar FV, eólica e biomassa de cavaco de madeira florestal. A otimização é realizada por meio de um algoritmo genético, aplicando uma abordagem da perspectiva do custo total ao longo do ciclo de vida do sistema. Sarkar et al. (2019) modelaram uma combinação energia solar FV, eólica, biomassa e banco de bateria. A configuração ótima do sistema e a otimização técnico-comercial foi realizada no *software* HOMER®, o corte de carga de pico foi estabelecido através da

simulação PSCAD e, os objetivos envolvem redução do LPSP e otimização do resultado econômico representado pela Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback*.

Além disso a combinação biogás-FV também apresentam boa complementariedade. A DA produz biogás para gerar eletricidade, calor, combustível e fertilizantes a partir de resíduos agrícolas e resíduos sólidos urbanos (BEYENE, WERKNEH e AMBAYE, 2018). Ao contrário da energia solar FV que é intermitente, a usina de biogás pode gerar energia a qualquer hora do dia, dependendo da ingestão de matéria-prima no biodigestor (CAMIRAND, 2021). O biogás também pode ser armazenado em gasômetro, um reservatório flexível que pode se expandir e contrair conforme a quantidade de biogás produzido, usado frequentemente em sistemas de pequena escala, como em propriedades rurais (CIBIOGÁS, 2019b). Um dos desafios é que as tecnologias de resíduos para energia são mais caras do que a energia solar FV em termos de instalação e custos de operação e manutenção (O&M), durante a vida útil do ativo (IRENA, 2019).

O desenvolvimento de tecnologias de biogás é afetado principalmente por indicadores técnicos-chave de desempenho que envolvem projeto da usina, disponibilidade e qualidade das matérias-primas, potencial de metano dos substratos a serem usados, tipo de digestões (úmido ou seco) que é selecionado, condições de temperatura do processo (mesofílico ou termofílico), fator de capacidade da usina de biogás, fator de conversão de eletricidade do gerador, viabilidade da tarifa pela qual a eletricidade será vendida e rentabilidade de mercado de subprodutos, como o biofertilizante do digestato que responde por 90% do digerido remanescente após a geração de energia (CAMIRAND, 2021; SCARLAT, DALLEMAND e FAHL, 2018). Esses indicadores técnicos-chave de desempenho são as razões pelas quais o biogás não é tão amplamente adotado quanto outros FER, como energia solar FV ou tecnologias eólicas *onshore* (SYNWOLDT e REIS, 2021).

No entanto, vale destacar que grande parte dos indicadores técnicos que afetam a utilização da tecnologia de biogás são controláveis através da gestão correta dos insumos e do processo de DA, diferente das fontes FV e eólica onde a radiação solar e o comportamento dos ventos não são controláveis.

Al-Masri e Al-Sharqi (2020) realizam o dimensionamento de um sistema híbrido FV-biogás nas configurações *on-grid* e *off-grid* em Ramtha, Jordânia, com o objetivo de amenizar as emissões de GEE e melhorar a acessibilidade e confiabilidade da energia. Utilizaram o

algoritmo *grey wolf* para realizar a otimização multi-objetivo e obter soluções não dominantes de LPSP e *total current cost* (TCC), em um primeiro caso, e, em um segundo caso as soluções não dominantes considerando as emissões GEE e TCC. Posteriormente, os pontos não dominantes são discutidos e classificados entre viáveis economicamente, comprometidos e confiáveis ou ecologicamente corretos.

O estudo de Wu et al. (2021) considera o biogás como uma das fontes de um sistema híbrido. Os autores propuseram um sistema integrado de energia, conectado à rede, para as interações sinérgicas dos fluxos de energia elétrica, térmica e de gás, em que as complementaridades biogás-FV-eólico são totalmente consideradas e o aquecimento do digestor é aplicado para fornecer uma temperatura adequada para a produção de biogás a partir de DA. Um modelo de otimização multiobjetivo é construído para otimizar o custo operacional, a emissão de dióxido de carbono e a perda de energia, considerando os efeitos termodinâmicos da digestão para o digestor anaeróbico e a incerteza da energia eólica e solar. Para solucionar o problema foi utilizado um algoritmo para executar mais de uma programação ao mesmo tempo, ou seja, multitarefa.

Al-Masri et al. (2022) investigam a confiabilidade e a viabilidade econômica de um sistema híbrido FV-biogás no território de Al-Ghabawi, Amã, Jordânia. Para tal, foram considerados três cenários: LPSP com *total net present cost* (TNPC); LPSP com *annualized cost of the system* (ACS) e TNPC com index of reliability (IR). A fronteira de Pareto para cada caso foi obtida o algoritmo de otimização multi-objetivo *particle swarm* aprimorado com a viabilidade. As variáveis de decisão foram o número de placas FV e o tempo de operação da planta de biogás por dia. Também foi implementado o modelo solar-FV de *double-diode* (DD) para obter um dimensionamento preciso do sistema.

Outras pesquisas levantadas como Bambokela et al. (2022) e Tamoor et al. (2020) discutem sistemas híbridos biogás-solar FV, mas não utilizam técnicas de otimização para configurar o sistema. Nesse sentido, observa-se que na literatura os estudos sobre planejamento de sistemas biogás-FV que utilizam métodos de otimização multiobjetivo ainda são escassos.

3 TÉCNICAS EMPREGADAS

3.1 Planejamento de experimentos – arranjo de misturas

Experimento é um teste ou uma série de testes onde são realizadas alterações nas variáveis de entrada de um processo ou de um sistema para se observar as mudanças nas variáveis de saída (MONTGOMERY, 2009). A técnica de *Design of Experiments* (DOE) ou projeto de experimentos é uma forma de desenho experimental que utiliza métodos estatísticos para planejar e executar experimentos (SOLVASON et al., 2009). Montgomery (2009) complementa que o DOE possibilita a coleta de dados adequada e a análise por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas.

As técnicas mais empregadas no projeto de experimentos são arranjos fatoriais completos, os arranjos fatoriais fracionados, os arranjos ortogonais de Taguchi, a metodologia de superfície de resposta e o arranjo de misturas, adotada neste trabalho (MONTGOMERY, 2009).

O objetivo da técnica de arranjo de misturas (MDE, do inglês *Mixture Design of Experiments*) é obter um modelo que permite correlacionar variáveis de saída (resposta) com variáveis de entrada (proporção dos componentes de mistura) (CORONADO et al., 2014). Neste sentido, as propriedades das variáveis de saída estão diretamente relacionadas com a composição das variáveis de entrada, e, deste modo, as mudanças na proporção das variáveis de entrada resultarão na alteração das propriedades das variáveis de saída. Face ao exposto, a proporções das variáveis de entrada em experimentos de misturas permite identificar quais combinações resultam em características desejáveis para as variáveis de saída (CORNELL, 2002).

O resultado de um experimento de misturas é uma função dos percentuais das diferentes variáveis de entrada utilizadas na composição das variáveis de saída. Os pesos para cada variável de entrada são não-negativos e a soma dos pesos atribuído a cada uma das variáveis de entrada utilizadas totaliza 1 (um), ou seja, 100%. Vale destacar que a obtenção das variáveis de saída em um arranjo de misturas depende apenas da porcentagem utilizada de cada variável de entrada na mistura (LEE e GILMORE, 2005; KAMOUN et al., 2002; CORNELL, 2002).

Para muitos problemas industriais as variáveis de resposta são função das proporções das variáveis de entrada utilizados em sua formulação, sendo este um problema de superfície de resposta denominado mistura. Para solucionar problemas de mistura, pode-se utilizar o *simplex design*, técnica de delineamento experimental e método de construção de modelos (MYERS e MONTGOMERY, 2009).

O arranjo *simplex* irá variar de acordo com o número de variáveis de entrada, por exemplo, quando a mistura possui duas variáveis de entrada o *simplex* será uma linha. Se a mistura apresentar três variáveis de entrada, o espaço *simplex* será um triângulo equilátero e experimentos com quatro variáveis de entrada serão representados por um tetraedro (CORONADO et al., 2014).

O sistema de coordenadas *simplex* é o espaço cartesiano utilizado para experimentos de misturas, onde a distribuição das variáveis de entrada representa as coordenadas (CORNELL, 2002), podendo ser de dois tipos: *lattice* e centróide (MYERS, MONTGOMERY e ANDERSON-COOK, 2016). Os arranjos *lattice* e centróide estão respectivamente apresentados na Figura 22.

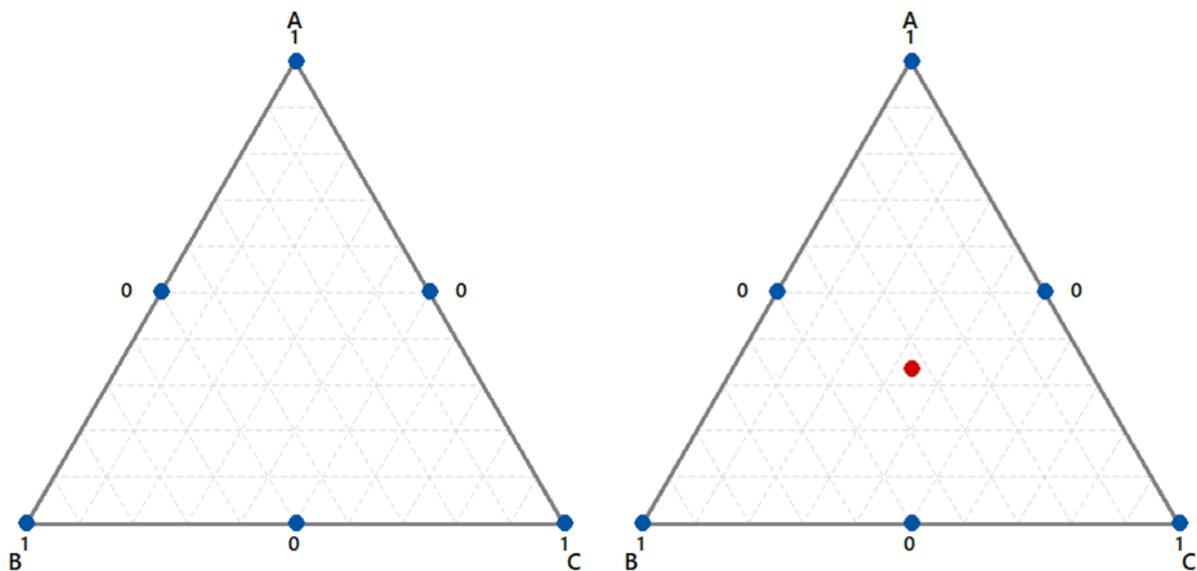


Figura 22. Arranjos *simplex lattice* e centróide.

Fonte: Adaptado Myers, Montegormery e Anderson-Cook (2016).

Para Oliveira et al. (2011), os vértices da figura que descreve as proporções dos componentes de mistura representam pontos nos quais as misturas são puras, isto é, um determinado componente tem peso igual a 1 (um) e os demais pesos iguais a zero. Os pontos no interior da região são misturas em que nenhum dos componentes tem pesos zero, por fim, no ponto central (centróide) da figura os pesos de todos os componentes assumem valores iguais.

Um projeto simplex com componentes p e ordem m tem proporções $m + 1$, uniformemente espaçadas de zero a um (MONTGOMERY, 2009). Os níveis de fator x_i são obtidos da seguinte forma:

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1; \text{ para } i = 1, 2, \dots, p \quad (1)$$

e, o número de experimentos (N) na rede simplex é dado por:

$$N = \frac{(p+m-1)!}{m!(p-1)!} \quad (2)$$

Uma alternativa à estrutura simplex é o simplex centróide. Neste caso, as k variáveis de entrada são definidas em $2^p - 1$ pontos, correspondendo a p permutações de $(1, 0, 0, \dots, 0)$, as $\binom{p}{2}$ permutações de $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \dots, 0\right)$, as $\binom{p}{3}$ permutações de $\left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0, \dots, 0\right)$ e o centróide $\left(\frac{1}{p}, \frac{1}{p}, \dots, \frac{1}{p}\right)$.

Uma desvantagem do projeto simplex é o fato de que a maioria dos experimentos ocorre nos limites do arranjo e apenas alguns pontos na parte interna são testados. Assim, recomenda-se, sempre que possível, aumentar o número de experimentos adicionando pontos internos aos arranjos, como os pontos centrais e também os pontos axiais. Pontos axiais podem ser definidos como todas as permutações de $((k+1)/2k, 1/2k, \dots, 1/2k)$, onde k é o número de variáveis de entrada. No caso de arranjos de mistura, vale ressaltar que os pontos centrais correspondem ao próprio centróide.

Coronado et al. (2014) complementa que o uso do *simplex design* para calcular a equação matemática deve modelar o comportamento da resposta, usando um número mínimo de misturas, estrategicamente localizadas e distribuídas sobre o triângulo.

A função obtida pela regressão ajustada de dados no *simplex lattice* é deduzida a partir de alterações propostas por Scheffé (1958, 1963) que resultam em polinômios canônicos que podem ser configurados das seguintes formas (CORNELL, 2002):

$$E(w) = \sum_{i=1}^q \beta_i w_i \quad (3)$$

$$E(w) = \sum_{i=1}^q \beta_i w_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij} w_i w_j \quad (4)$$

$$E(w) = \sum_{i=1}^q \beta_i w_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij} w_i w_j + \sum_{i<j} \gamma_{ij} w_i w_j (w_i - w_j) + \sum_{i<j<k} \beta_{ijk} w_i w_j w_k \quad (5)$$

onde: $E(w)$ = resposta esperada para determinada mistura; β_i = mostram como cada componente contribui para a variável de resposta; β_{ij} = indica qual é o efeito combinado dos componentes i e j ; $\beta_{ij} w_i w_j$ = representa a alteração na resposta do modelo quadrático em relação ao o modelo linear. Os coeficientes β_i e β_{ij} são estimados usando o algoritmo de Mínimos Quadrados Ordinários (OLS, do inglês *Ordinary Least Squares*) (CORNELL, 2002).

Nocedal e Wright (2006) ressaltam que, em vários casos, há o desconhecimento das relações entre as variáveis de resposta e as variáveis de decisão, conseqüentemente, as funções objetivas também são desconhecidas. Diante disso, Montgomery (2009) explica que o delineamento de experimentos pode ser empregado em diversas disciplinas, buscando aprendizado sobre um sistema ou processo. A partir dos experimentos é pode-se extrair informações e dados que permitem modelar o comportamento de um sistema, ou seja, definir as funções objetivo.

Nesse sentido, este trabalho utiliza o arranjo de misturas para gerar uma malha experimental, obter dados e informações da relação entre as variáveis de resposta e as variáveis

de decisão do sistema híbrido biogás-FV e definir as funções objetivo, inicialmente desconhecidas.

3.2 *Normal Boundary Intersection (NBI)*

Atualmente, para o processo de planejamento energético, os modelos que consideram apenas a minimização de custos são cada vez menos realistas. Frente à necessidade de considerar atributos econômicos, técnicos e ambientais os modelos para o planejamento de expansão da geração estão se tornando cada vez mais complexos (OREE, HASSEN e FLEMING, 2017).

Diferente de problemas que consideram apenas um objetivo, os problemas multiobjetivo são mais complexos e requerem um método especial para a solução, uma vez que cada um dos objetivos está em função das mesmas variáveis de decisão e, apresentam conflito entre si, caracterizando um problema de *trade-off*, onde a melhora de resultado resulta na piora de pelo menos um outro (MIETTINEN, 1999; BARIL, YACOUT e CLÉMENT, 2011).

As abordagens para solucionar problemas multiobjetivo se dividem em priorização e aglutinação (SHAHRAKI e NOOROSSAN, 2014). Abordagens por priorização buscam otimizar um objetivo, considerando os outros objetivos como restrição, e como exemplo podem ser citados o ε -method (MIETTINEN, 1999) e a programação lexicográfica (AGHAEI, AMJADY e SHAYANFAR, 2011).

Já as abordagens por aglutinação apresentam a característica de transformar todas as funções objetivos em apenas uma função (PAIVA, FERREIRA e BALESTRASSI, 2007), e os principais são programação por objetivos (CHARNES e COOPER, 1961); critério global (MIETTINEN, 1999); somas ponderadas (ZHANG e YANG, 2001); e o NBI (DAS e DENNIS, 1998).

Em um problema multiobjetivo, os métodos por aglutinação produzem soluções Pareto-ótimas, que são obtidas a partir das combinações ótimas de variáveis de decisão que otimizam simultaneamente as funções objetivo conflitantes (ESKELINEN e MIETTINEN, 2011). A fronteira de Pareto para dois objetivos é representada na Figura 23.

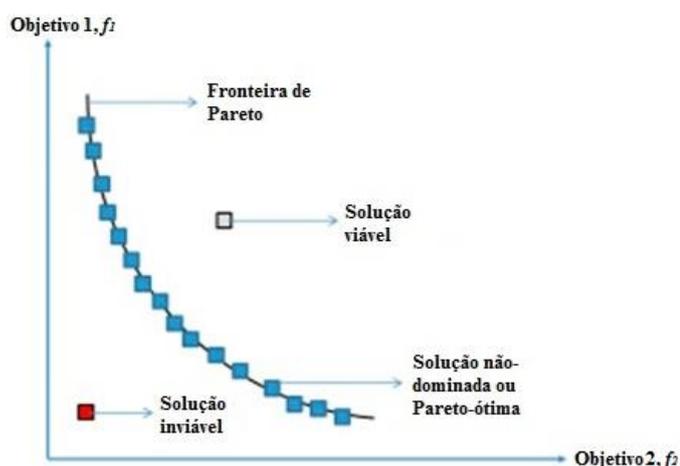


Figura 23. Fronteira de Pareto para duas funções objetivo.

Fonte: Oree, Hassen e Fleming (2017).

A seguinte expressão matemática demonstra um problema geral de otimização multiobjetivo (ROCHA et al. 2021):

$$\begin{aligned}
 & \text{Min. } \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \\
 & \text{s. t. : } h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, l \\
 & \quad \quad g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned} \tag{6}$$

onde: $f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)$ são funções objetivo a serem otimizadas; $h_i(x)$ representa as l restrições de igualdade; e $g_j(x)$ representa as m restrições de desigualdade.

Dentre as abordagens supracitadas a mais empregada para gerar soluções Pareto-ótimas em problemas multiobjetivo é a abordagem das somas ponderadas, devido a sua simplicidade de implementação (ROCHA et al., 2017b). Porém, a abordagem não funciona de forma adequada para problemas com equações não convexas e pode gerar fronteira de Pareto sem uniformidade entre os pontos, até mesmo para problemas que envolvem equações convexas (DAS e DENIS, 1997). Nesse sentido, o método NBI evita tais falhas da abordagem das somas ponderadas (DAS e DENIS, 1998).

Matematicamente, o método do NBI pode ser escrito por:

$$\begin{aligned}
& \underset{(x,D)}{\text{Max}} D \\
& \text{s. t. : } \bar{\Phi}(w - De) = \bar{F}(x) \\
& x \in \Omega
\end{aligned} \tag{7}$$

onde: D é a distância da fronteira de Pareto à linha da utopia; $\bar{\Phi}$ é a matriz de *payoff* normalizada; w é a ponderação; e é um vetor de valor 1; e $\bar{F}(x)$ é o vetor que contém os valores individuais das funções objetivo normalizadas.

Φ e $\bar{\Phi}$ são a matriz de *payoff* e a matriz de *payoff* normalizada, que podem ser escritas como:

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1^*(x_1^*) & \cdots & f_1(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_m(x_1^*) & \cdots & f_m^*(x_m^*) \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \frac{f_1^*(x_1^*) - f_1^*(x_1^*)}{f_1(x_m^*) - f_1^*(x_1^*)} & \cdots & \frac{f_1(x_m^*) - f_1^*(x_1^*)}{f_1(x_m^*) - f_1^*(x_1^*)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{f_m(x_1^*) - f_m^*(x_m^*)}{f_m(x_1^*) - f_m^*(x_m^*)} & \cdots & \frac{f_m^*(x_m^*) - f_m^*(x_m^*)}{f_m(x_1^*) - f_m^*(x_m^*)} \end{bmatrix} \tag{9}$$

A solução que minimiza a i -ésima função objetivo $f_i(x)$ pode ser representada como $f_i^*(x_i^*)$. Quando se substitui o ótimo individual x_i^* nas funções objetivo restantes, tem-se $f_i(x_i^*)$. De acordo com Das e Dennis (1998), as vantagens do NBI em relação aos demais métodos são: (1) evita a seleção arbitrária de parâmetros; (2) o conjunto de soluções na fronteira de Pareto são uniformemente distribuídas, independente da escala utilizada para os pesos dos objetivos e; (3) não apresenta problemas na solução de problemas não-convexos.

A partir das funções objetivo do problema híbrido biogás-FV, adotou-se o NBI para gerar uma fronteira de soluções eficientes (fronteira de Pareto), atribuindo pesos para as funções objetivo, com intuito de definir prioridades no processo de otimização.

3.3 Entropia

Shannon (1948) derivou uma medida para quantificar o grau de incerteza de uma distribuição de probabilidade, denominando S a medida de entropia de Shannon. Inicialmente, a entropia foi utilizada na termodinâmica, mas devido as suas vantagens na medição de riscos e descrição de distribuições também foi amplamente adotada na teoria financeira (ZHOU, CAI e TONG, 2013).

De acordo com Mendes et. al. (2016), a entropia pode ser usada para medir a diversificação de portfólio, nesse sentido, quanto maior a entropia melhor. Para solucionar o problema de diversificação, adota-se a maximização do índice de entropia de Shannon, possibilitando maior diversidade do portfólio (BERA e PARK, 2008; JANA, ROY e MAZUMDER, 2007).

O índice de entropia de Shannon é um dos vários índices usados para medir a diversidade em dados categóricos, considerado satisfatório por incorporar os conceitos de variedade e equilíbrio (GRUBB, BUTLER e TWOMEY, 2006; HICKEY, CARLSON e LOOMIS, 2010).

De forma análoga a otimização de portfólio, no presente estudo foi utilizada a entropia para auxiliar na seleção da melhor solução Pareto-ótima, ou seja, a solução que apresente a melhor diversificação entre as proporções biogás-FV. Deste modo, a entropia de Shannon ($S(x)$) é um critério utilizado para avaliar a qualidade das soluções Pareto-ótimas obtidas por meio do NBI a partir da máxima diversificação do vetor de pesos, obtida por meio da Eq. (10).

$$S(\mathbf{W}) = - \sum_{i=1}^m w_i \ln(w_i) \quad (10)$$

sendo: w_i os pesos atribuídos às funções objetivo.

Alguns pesquisadores como Jana, Roy e Mazunder (2007), Bera e Park (2008), Usta e Kantar (2011), Mendes et. al. (2016) e Leal et al. (2022) empregam a entropia de Shannon para otimizar portfólio considerando a abordagem multi-objetivo. A entropia é fácil de ser utilizada

uma vez que o cálculo do índice é realizado diretamente no estado final do portfólio, após a atribuição dos pesos (MERCURIO, WU e XIE, 2020). A entropia é muito útil quando no problema são usadas funções objetivo geradas por meio de arranjos experimentais, pois a máxima diversificação dos pesos resulta em vetores de solução capazes de reduzir a largura dos intervalos de confiança (IC) para a resposta prevista.

Após a construção da fronteira de Pareto, a solução Pareto-ótima é obtida por meio da relação entropia/Mahalanobis. Nesse caso, o uso da entropia, métrica relacionada à diversificação do sistema, se mostra pertinente por destacar a complementariedade entre as fontes biogás-FV, melhorando fatores importantes do sistema como a intermitência e a redução da área não vinculados diretamente ao modelo de otimização. Além disso, para órgãos reguladores do setor elétrico a diversificação entre as fontes é interessante, pois possibilita uma maior diversificação da matriz de energia elétrica Brasileira.

3.4 Distância de Mahalanobis e elipses de confiança

O intervalo de confiança (IC), mostrado na Figura 24, é a amplitude de valores, resultante da estatística de amostras, com a probabilidade de representar o comportamento de um parâmetro populacional (realidade). Analisando uma variável (univariada), o intervalo apresenta uma única dimensão, mas quando analisado duas ou mais variáveis (bivariado ou multivariado), correlacionadas, o intervalo apresenta mais dimensões e é denominado região de confiança (ALMEIDA et al., 2020a; ALMEIDA et al., 2020b).

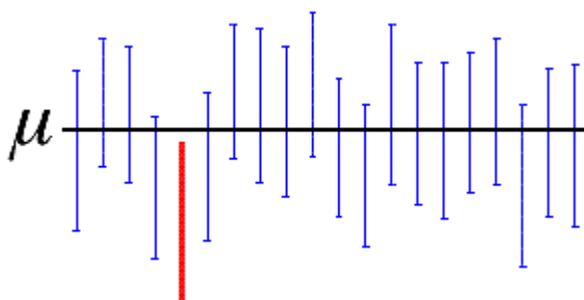


Figura 24. Intervalos de confiança univariado para a média.

Fonte: Adaptado Montgomery e Runger (2011).

O tamanho do intervalo está relacionado com a precisão, intervalos menores apresentam maiores nível de precisão do que intervalos maiores. Além disso, para uma melhor tomada de decisão, é necessário intervalos ou regiões não sobrepostas, permitindo maiores níveis de distinção (MONTGOMERY e RUNGER, 2019).

O tratamento de um conjunto de dados correlacionado de forma univariada, pode resultar na perda de informações relevantes ao processo de tomada de decisão. Assim, para se obter conclusões concretas para amostras bivariadas ou multivariadas correlacionadas é necessário ampliar o conceito de intervalo de confiança para região de confiança (JOHNSON e WICHERN, 2007). A Figura 25 mostra exemplos de correlação entre dados bivariados: (a) correlação positiva; (b) correlação negativa; e (c) não correlacionado.

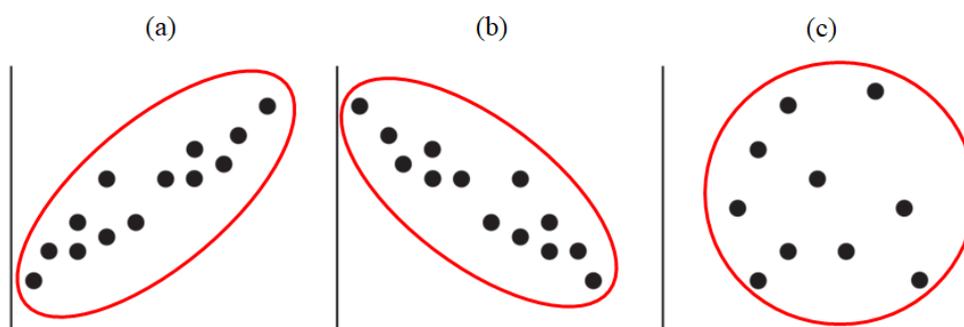


Figura 25. Exemplos e correlação entre dados bivariados.

Fonte: Adaptado Montgomery e Runger (2011).

Em problemas bidimensionais ou multidimensionais as regiões são representadas por elipses ou elipsoides de confiança (ALMEIDA et al., 2019). As elipses ou elipsoides possibilitam analisar a região de confiança para os dados e para a média dos dados e, conseqüentemente, permite avaliar o sistema de medição verificando se as elipses ou elipsoides se sobrepõem e medindo a variabilidade atribuída. Dessa forma, as elipses de confiança permitem identificar os limites multivariados que os dados apresentam, trazendo vantagens em relação à intervalos de confiança univariados (ALMEIDA et al, 2020a; ALMEIDA et al, 2020b).

De acordo com Ferreira (2018), uma elipse de confiança é a representação bidimensional ($p = 2$) da função densidade normal multivariada. Para Torres et al. (2020), a distribuição normal multivariada é uma extensão da distribuição univariada. No caso de apenas

uma variável com média (μ) e variância (σ^2), função densidade normal multivariada é expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}q(x)} \text{ para } -\infty < x < +\infty \quad (11)$$

$$q(x) = (x - \mu)(\sigma^2)^{-1}(x - \mu) \quad (12)$$

A equação $q(x)$ determina a distância entre x e μ na escala de um desvio padrão. Segundo Johnson e Wichern (2007), essa distância também pode ser utilizada quando \mathbf{x} é um vetor de valores. Por exemplo, $\mathbf{x}^T = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$, para $n \geq 2$. Então, $\boldsymbol{\mu}^T = [\mu_1 \ \mu_2 \ \dots \ \mu_n]$ é o vetor de médias para cada variável em \mathbf{x} e $\boldsymbol{\Sigma}$ é a matriz de variância-covariância positiva definida. De acordo com Torres et al. (2020), a equação para a distância multivariada pode ser obtida por:

$$Q_p(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) \quad (13)$$

A Eq. (13) representa o quadrado da distância entre \mathbf{x} e $\boldsymbol{\mu}$. Segundo Rencher (2002), o quadrado da distância entre dois vetores foi proposto a primeira vez por Mahalanobis (1936) e com frequência é chamada de distância de Mahalanobis. Além disso, a função de densidade de probabilidade normal multivariada (Figura 26), p -dimensional ($p =$ número de variáveis), é definida como:

$$F_p(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} |\boldsymbol{\Sigma}|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}Q_p(\mathbf{x})} \text{ para } \begin{matrix} -\infty < x_p < +\infty \\ p = 1, 2, \dots, n. \end{matrix} \quad (14)$$

Quando \mathbf{x} possui densidade Eq. (14), diz-se que \mathbf{x} é distribuído como $N_p(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$, ou simplesmente \mathbf{x} é $N_p(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ (RENCHE, 2002).

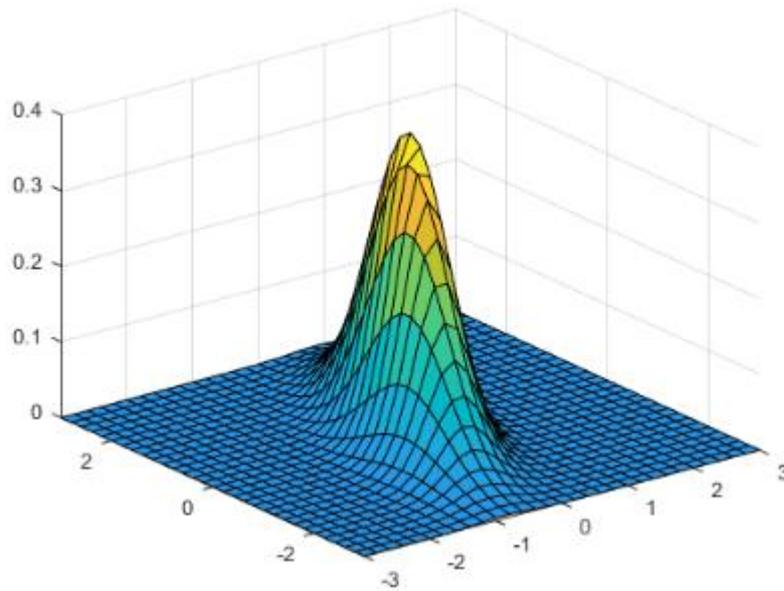


Figura 26 Função de densidade de probabilidade normal bivariada.

Fonte: Adaptado Rencher (2002).

Ao realizar um corte transversal na função densidade normal bivariada é possível visualizar, do topo para a base, uma elipse. Considerando a elipse no plano cartesiano, a distância entre um ponto $P = (x_1, x_2)$ e coordenadas de origem $O = (0,0)$, sabendo que a distância de qualquer ponto P até a origem e dada pela distância Euclidiana, pode ser expressada por (JOHNSON e WICHERN, 2007):

$$d(O, P) = \sqrt{(x_1 - 0)^2 + (x_2 - 0)^2} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad (15)$$

A distância Euclidiana não considera as diferenças de variabilidades da origem na direção x_1 e na direção de x_2 . Por considerar que cada coordenada contribui igualmente para o cálculo da distância, a distância Euclidiana não é útil em um cenário multivariado, neste caso deve-se considerar não só a variância das variáveis, mas também suas covariâncias ou correlações (RENCHE, 2002). De acordo com Johnson e Wichern (2007), a maneira correta de proceder é padronizando (Z) as variáveis x_1 e x_2 , para se obter uma distância estatística dada por:

$$d(O, P) = \sqrt{\left(\frac{x_1 - 0}{\sqrt{S_1^2}}\right)^2 + \left(\frac{x_2 - 0}{\sqrt{S_2^2}}\right)^2} = \sqrt{z_1^2 + z_2^2} \quad (16)$$

$$d(O, P) = \sqrt{\frac{x_1^2}{S_1^2} + \frac{x_2^2}{S_2^2}} \text{ ou } d(O, P)^2 = \frac{x_1^2}{S_1^2} + \frac{x_2^2}{S_2^2} \quad (17)$$

Deste modo, pode-se afirmar que todos os pontos que possuem coordenadas (x_1, x_2) e estão a uma distância quadrada constante (c^2), satisfazem a Eq. (17). Assim, a reescrevendo a Eq. (16), tem-se $d(O, P)^2$ igual a c^2 , além disso, como $z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2$ é uma variável Qui-quadrado c^2 é igual a χ^2 (JOHNSON e WICHERN, 2007):

$$c^2 = \chi^2 = \frac{x_1^2}{S_1^2} + \frac{x_2^2}{S_2^2} = [x_1 \ x_2] \begin{bmatrix} 1/S_1^2 & 0 \\ 0 & 1/S_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \mathbf{x}^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{x} \quad (18)$$

Essa distância estatística, também chamada de distância de Mahalanobis. De acordo com Rencher (2002), se uma variável aleatória tiver uma variância maior que outra, ela receberá um peso relativamente menor na distância de Mahalanobis. Da mesma forma, duas variáveis altamente correlacionadas não contribuem tanto quanto duas variáveis menos correlacionadas. Em resumo, o uso do inverso da matriz de variância-covariância ($\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$) na distância de Mahalanobis tem o efeito de (a) padronizar todas as variáveis para a mesma variância e (b) eliminar correlações.

Realizando a decomposição espectral da matriz sigma ($\boldsymbol{\Sigma}$), obtém-se a combinação linear de autovalores (λ) e autovetores (e). Sendo \mathbf{P} a matriz ortonormal ($\mathbf{P}^T = \mathbf{P}^{-1}$), onde cada coluna da matriz \mathbf{P} está associada a apenas um autovalor da matriz diagonal $\boldsymbol{\Lambda}$ (TIMM, 2002; JOHNSON e WICHERN, 2007).

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{P}^T \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{P} = \sum_{i=1}^P \lambda_i e_i e_i^T \quad (19)$$

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{i1} & \sigma_{i2} & \dots & \sigma_{ip} \end{bmatrix} \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{i1} & e_{i2} & \dots & e_{ip} \end{bmatrix} \quad \mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_p \end{bmatrix}$$

Considerando a matriz $\mathbf{\Sigma}$ positiva definida, ou seja, $\mathbf{\Sigma}^{-1}$ exista, assim, $\mathbf{\Sigma}e = e\lambda$ e consequentemente, $\mathbf{\Sigma}^{-1}e = e\frac{1}{\lambda}$. Deste modo, da mesma forma que (λ, e) é um par de autovalor-autovetor para a matriz $\mathbf{\Sigma}$, $(\frac{1}{\lambda}, e)$ é o par autovalor-autovetor para $\mathbf{\Sigma}^{-1}$. A partir destas considerações é possível deduzir que (TIMM, 2002; JOHNSON e WICHERN, 2007):

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}^T \mathbf{\Sigma}^{-1} \mathbf{x} \\ & \mathbf{x}^T \left(\sum_{i=1}^p \left(\frac{1}{\lambda_i} \right) e_i e_i^T \right) \mathbf{x} \\ & \mathbf{x}^T \left[\frac{1}{\lambda_1} e_1 e_1^T + \frac{1}{\lambda_2} e_2 e_2^T \right] \mathbf{x} \\ & \frac{1}{\lambda_1} (\mathbf{x}^T e_1)^2 + \frac{1}{\lambda_2} (\mathbf{x}^T e_2)^2 = c^2 \\ & \frac{1}{c^2 \lambda_1} (\mathbf{x}^T e_1)^2 + \frac{1}{c^2 \lambda_2} (\mathbf{x}^T e_2)^2 = 1 \end{aligned} \tag{20}$$

Considerando casos bidimensionais e a elipse centrada na origem $O = (0,0)$, os semieixos da elipse de densidade constante estão na mesma direção dos autovetores de $\mathbf{\Sigma}^{-1}$. Desta maneira, quando $e_2 = 0$, $\frac{1}{\lambda_1} (\mathbf{x}^T e_1)^2 = c^2$, logo $\mathbf{x}^T e_1 = c\sqrt{\lambda_1}$. Por outro lado, quando $e_1 = 0$, $\frac{1}{\lambda_2} (\mathbf{x}^T e_2)^2 = c^2$, logo $\mathbf{x}^T e_2 = c\sqrt{\lambda_2}$ (TIMM, 2002; JOHNSON e WICHERN, 2007). Consequentemente, obtém-se o comprimento dos semieixos, ilustrado na Figura 27.

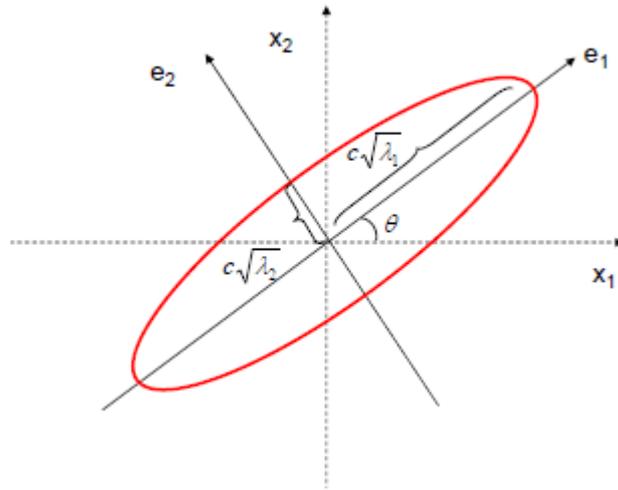


Figura 27. Elipse constante da distribuição normal bivariada, centrada na origem (0, 0).

Fonte: Adaptado Almeida et al. (2020a).

A partir da Eq. (13) da função densidade normal multivariada, centrada no vetor de médias (Figura 28), Almeida et al. (2019), desenvolvem o elipsoide realizando a decomposição espectral da matriz Σ , demonstrado na Eq. (19). Além disso, a função densidade normal multivariada é igual a c^2 , conforme provado na Eq. (18). Utilizando as informações anteriores tem-se:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) &= c^2 \\
 (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{P} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \mathbf{P}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) &= c^2 \\
 [\mathbf{P}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})]^T \boldsymbol{\Lambda}^{-1/2} \boldsymbol{\Lambda}^{-1/2} [\mathbf{P}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})] &= c^2 \\
 \sqrt{[\mathbf{P}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})]^T \boldsymbol{\Lambda}^{-1/2} \boldsymbol{\Lambda}^{-1/2} [\mathbf{P}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})]} &= \sqrt{c^2} \\
 \boldsymbol{\Lambda}^{-1/2} [\mathbf{P}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})] &= \sqrt{\chi^2}
 \end{aligned} \tag{21}$$

Sendo a matriz de autovetores de Σ é ortonormal, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 [\mathbf{P}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})] &= \sqrt{\chi^2} \boldsymbol{\Lambda}^{1/2} \\
 [\mathbf{P}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})] &= \sqrt{\chi^2} \boldsymbol{\Lambda}^{1/2} \\
 (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) &= \mathbf{P} \left[\sqrt{\chi^2} \boldsymbol{\Lambda}^{1/2} \right]
 \end{aligned}$$

As relações entre os autovetores e o ângulo de rotação no sentido anti-horário são descritas como:

$$\operatorname{sen}\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = \operatorname{sen}\theta \cos\frac{\pi}{2} + \operatorname{sen}\frac{\pi}{2} \cos\theta = \cos\theta \quad (23)$$

$$\cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = \cos\theta \cos\frac{\pi}{2} - \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen}\frac{\pi}{2} = -\operatorname{sen}\theta \quad (24)$$

Utilizando as relações trigonométricas descritas Eq. (23 e 24), é possível afirmar que (RENCHEER, 2002; TIMM, 2002):

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta \\ \operatorname{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (25)$$

De acordo com a Figura 30, a elipse é uma região geométrica compreendida entre duas circunferências de raios iguais aos semi-eixos. Sendo (a) o semi-eixo maior e (b) o semi-eixo menor, qualquer ponto Q entorno da região elíptica pode ser representado pela relação trigonométrica entre as três figuras.

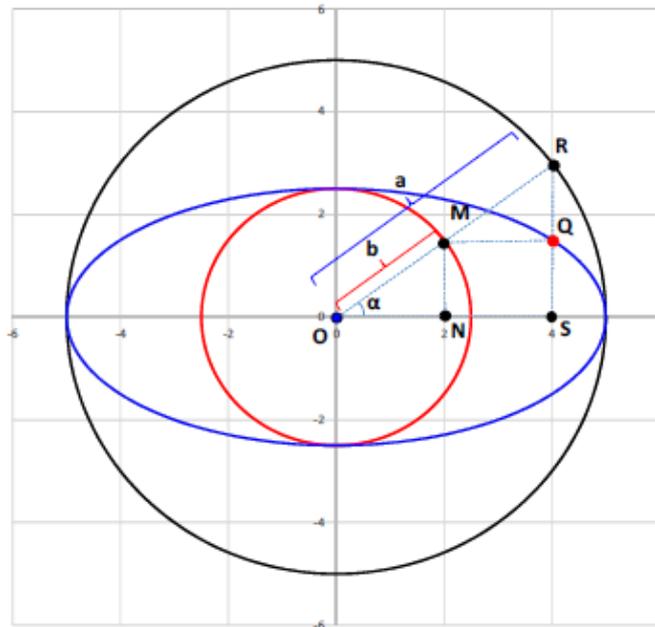


Figura 30. Construção da elipse a partir de duas circunferências.

Fonte: Almeida et al. (2019, 2020b).

Segundo Almeida et al. (2019; 2020b), a partir da relação entre as duas circunferências e a elipse é possível deduzir que:

$$\begin{aligned}\overline{OS} &= x \therefore x = (a)\cos\gamma \\ \overline{MN} &= y \therefore y = (b)\sen\gamma\end{aligned}$$

$$Q = \begin{bmatrix} (a)\cos\gamma \\ (b)\sen\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\sqrt{\lambda_1}\cos\gamma \\ c\sqrt{\lambda_2}\sen\gamma \end{bmatrix} \text{ para } 0 \leq \gamma \leq 2\pi \quad (26)$$

De acordo com Almeida et al. (2020b), considerando as Eq. (22, 25 e 26) tem-se: $\mathbf{x} = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{P}[\sqrt{\chi^2} \boldsymbol{\Lambda}^{1/2}]$ onde $P = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sen\theta \\ \sen\theta & \cos\theta \end{bmatrix} e \boldsymbol{\Lambda}^{1/2} = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix}$.

A partir dos dados é obtida a Eq. (30) da elipse rotacionada (θ) e paramétrica (γ), na qual o ângulo (θ) representa a inclinação da elipse, relacionada com a correlação dos dados e com os autovetores (\mathbf{e}) da matriz ($\boldsymbol{\Sigma}$). O ângulo (γ) traduz qualquer ponto da elipse em coordenadas trigonométricas e é usado para a construção da elipse em cada ponto do plano XY (ALMEIDA et al., 2019; ALMEIDA et al., 2020a; ALMEIDA et al., 2020b).

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sen\theta \\ \sen\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sqrt{\chi^2\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\chi^2\lambda_2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sen\theta \\ \sen\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sqrt{\chi^2\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\chi^2\lambda_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sqrt{\chi^2\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\chi^2\lambda_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \end{bmatrix} \text{ para } 0 \leq \gamma \leq 2\pi \quad (29)$$

Modelo geral:

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c\sqrt{\lambda_1}e_{11}\cos\gamma - c\sqrt{\lambda_2}e_{12}\sin\gamma \\ c\sqrt{\lambda_1}e_{21}\cos\gamma + c\sqrt{\lambda_2}e_{22}\sin\gamma \end{bmatrix} \text{ para } c = \sqrt{\chi_{p,\gamma/2}^2} e 0 \leq \gamma \leq 2\pi \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} + c \times \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} + \sqrt{\chi^2} \times \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{(n-1)p}{n(n-p)} F_{(p,n-p)}(\alpha)} \times \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (33)$$

sendo: p = número de variáveis analisadas e n = número de observações do conjunto de dados.

As elipses de confiança para os dados e para as médias (*shadows*) podem ser construídas de acordo com as Eq. 32 e 33, respectivamente. A região de confiança para $\boldsymbol{\mu}$, descrita na Eq. (34), também pode ser definida utilizando o vetor $\boldsymbol{\mu}$ a matriz $\boldsymbol{\Sigma}$ e confiança $100(1 - \alpha)\%$ (JOHNSON e WICHERN, 2007):

$$n(\boldsymbol{\mu} - \bar{\mathbf{y}})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\boldsymbol{\mu} - \bar{\mathbf{y}}) \leq \frac{(n-1)p}{(n-p)} F_{(p,n-p)}(\alpha) \quad (34)$$

onde: $F_{(p,n-p)}$ são os graus de liberdade, $100\alpha\%$ é o quartil superior da distribuição F. Essa região representa o hiperelipsoide de distância $\chi_{\alpha,p}^2/n$ constante entre $\boldsymbol{\mu}$ e $\bar{\mathbf{y}}$.

De acordo com Johnson e Wichern (2007) e Almeida et al. (2020a) as declarações de confiança simultâneas determinadas a partir das projeções das sombras da elipse de confiança para as médias (*shadow of ellipsoid*) são, normalmente, demasiado grandes. Assim, também é recomendado verificar se as elipses respeitam os intervalos dos limites bilaterais de Bonferroni, por serem mais precisos são adequados para confirmar os resultados obtidos.

A distância de Mahalanobis utilizada no indicador entropia/Mahalanobis, é um indicador de classificação que minimiza a distância entre o ponto central da elipse e a média dos dados. Quanto maior a proximidade do centro da elipse, menor a variabilidade e maior a probabilidade de ocorrência do resultado obtido. Além disso, a adoção das elipses de confiança possibilita confrontar e analisar graficamente os dados gerados nos diferentes cenários estudados.

3.5 *Multivariate Analysis of Variance (MANOVA)*

A Análise de Variância (ANOVA, do inglês *Analysis of Variance*) é usada para comparar as médias de três ou mais grupos de dados independentes, permitindo identificar se há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos dados analisados. Os tipos mais comuns de ANOVA são: (a) ANOVA *One-way*, utilizada para determinar o impacto de um fator em uma variável dependente ou variável de resposta; (b) ANOVA *Two-way*, neste caso, a ANOVA é utilizada para determinar como dois fatores impactam em uma variável dependente e se existe ou não interação dos fatores na variável dependente (STAHLE e WOLD, 1989; MONTGOMERY e RUNGER, 2011).

A MANOVA é a versão multivariada da ANOVA e uma extensão do teste de Hotelling (T^2) para mais de dois grupos, utilizada quando a análise envolve duas ou mais variáveis de resposta, correlacionadas. Semelhante a ANOVA, os tipos mais comuns são MANOVA *One-way* e *Two-way*, dependendo do número de fatores envolvidos na análise (STAHLE e WOLD, 1990).

Rencher (2002) ressalta que normalmente o número de grupos são três ou mais (Figura 31), mas o procedimento também acomodará dois grupos. Assim, o teste T^2 de duas amostras é, portanto, um caso especial de MANOVA.

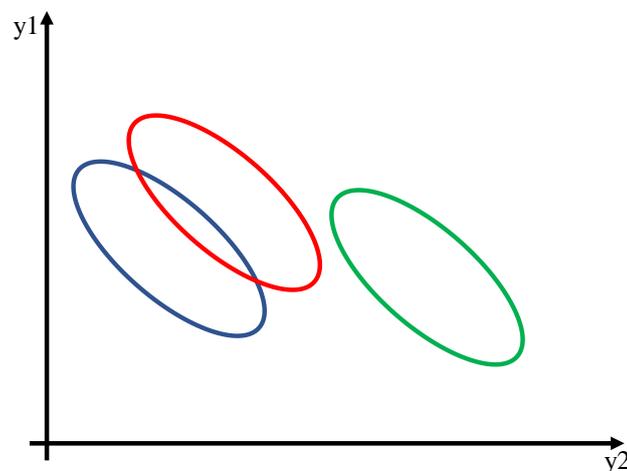


Figura 31. Dispersões bivariadas (elipses) de três grupos de objetos.

Fonte: Stahle e Wold (1990).

Stahle e Wold (1990), defendem a utilização da MANOVA para dados multivariados. A utilização da ANOVA, em casos multivariados, resultaria em conduzir uma série de análise separada para cada variável de resposta, podendo inflacionar o risco do erro Tipo 1 (falso positivo) e, além disso, não seria considerado a correlação presente nas variáveis de resposta.

A hipótese nula considerada é $H_0: \boldsymbol{\mu}_1 = \boldsymbol{\mu}_2 = \dots = \boldsymbol{\mu}_k$, onde o vetor $\boldsymbol{\mu}_i$ possui as dimensões $p \times 1, i \in \{1, 2, \dots, k\}$. Sendo \mathbf{Y}_{ij} a j -ésima observação da i -ésima população, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ e $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ e assumindo $\mathbf{Y}_{ij} \sim N_p(\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma})$, o modelo para as observações é dado por (JOHNSON e WICHERN, 2007; JOHNSTONE e NADLER, 2017):

$$\mathbf{Y}_{ij} = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\alpha}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \boldsymbol{\mu}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \quad (34)$$

onde: $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ são variáveis $N_p(\mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma})$ independentes, o vetor de parâmetro $\boldsymbol{\mu}$ é uma média geral, $\boldsymbol{\alpha}_i$ representa o i -ésimo efeito do tratamento e $\boldsymbol{\mu}_i = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\alpha}_i$ é a média da i -ésima população.

Com base na Eq. (34), as matrizes de somas de quadrados referentes ao tratamento (*Between*), ao erro experimental (*Within*) e ao total corrigido pela média, denotadas respectivamente por \mathbf{B} , \mathbf{W} e $\mathbf{B} + \mathbf{W}$, são definidas (JOHNSTONE e NADLER, 2017):

$$\mathbf{B} = n \sum_{i=1}^k (\bar{\mathbf{Y}}_i - \bar{\mathbf{Y}})(\bar{\mathbf{Y}}_i - \bar{\mathbf{Y}})^T \quad (35)$$

$$\mathbf{W} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (\mathbf{Y}_{ij} - \bar{\mathbf{Y}}_i)(\mathbf{Y}_{ij} - \bar{\mathbf{Y}}_i)^T \quad (36)$$

$$\mathbf{B} + \mathbf{W} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (\mathbf{Y}_{ij} - \bar{\mathbf{Y}})(\mathbf{Y}_{ij} - \bar{\mathbf{Y}})^T \quad (37)$$

Em analogia a ANOVA, uma razão é formada entre a dispersão entre grupos (*Between*) e a dispersão dentro do grupo (*Within*). Porém, na MANOVA a dispersão aparece na forma matricial, cuja relação é $\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}$. Para fornecer um teste global de significância, a função do $\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}$ deve ser considerada. As principais estatísticas de testes utilizadas para a MANOVA,

todas baseadas nos autovalores da matriz ($\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}$), são quatro (STAHLE e WOLD, 1990): (1) lambda de Wilks; (2) raiz máxima de Roy; (3) Lawley-Hotelling; e (4) traço de Pillai.

Proposto originalmente por Wilks (1932), o teste da razão de verossimilhança de $H_0: \boldsymbol{\mu}_1 = \boldsymbol{\mu}_2 = \dots = \boldsymbol{\mu}_k$ é dado por:

$$\Lambda = \frac{|\mathbf{W}|}{|\mathbf{B} + \mathbf{W}|} \quad (38)$$

O lambda (Λ) de Wilks compara o determinante da soma dos quadrados da matriz \mathbf{W} (*Within*), com o determinante da soma dos quadrados da matriz $(\mathbf{B} + \mathbf{W})$ (total). A estatística informa o quanto a matriz de variância \mathbf{W} representa da variância total $(\mathbf{B} + \mathbf{W})$. Semelhante ao teste- F univariado que compara a soma dos quadrados *Between* com a soma dos quadrados *Within* (JOHNSON e WICHERN, 2007).

Ao usar determinantes, a estatística de teste é reduzida a um escalar. Assim, a informação multivariada em \mathbf{W} e \mathbf{B} sobre a separação dos vetores de média $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2 \dots \bar{Y}_k$ é canalizado para uma única escala, na qual podemos determinar se a separação dos vetores de média é significativa, típico de testes multivariados em geral. Diferente da estatística F na ANOVA, no teste lambda de Wilks rejeita-se H_0 quando $\Lambda \leq \Lambda_{\alpha, p, vH, vE}$. Vale ressaltar que a rejeição é para valores pequenos de Λ (RENCHEER, 2002).

Os parâmetros para a distribuição de lambda de Wilks são: p = número de variáveis ou dimensão; vH = graus de liberdade para hipóteses; e vE = graus de liberdade para erro. Além disso, para que os determinantes do teste de Wilks sejam positivos deve-se atender $vE \geq p$, qualquer modelo MANOVA One-way apresenta $vH = (k - 1)$ e $vE = k(n - 1)$ e os parâmetros p e vH podem ser trocados, a distribuição de $\Lambda_{p, vH, vE} = \Lambda_{vH, p, vE + vH - p}$ (RENCHEER, 2002).

O teste estatístico lambda de Wilks também pode ser expresso em termos de autovalores $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ de $\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}$, representado por:

$$\Lambda = \prod_{i=1}^s \frac{1}{1 + \lambda_i} \quad (39)$$

Os vetores de médias ocupam um espaço de dimensão $s = \min(p, vH)$, onde são possíveis várias configurações desses vetores (RENCHEER, 2002). Isso leva a conclusão que, de acordo com a característica dos dados, alguns testes estatísticos podem ser mais adequados do que o Λ de Wilks (OLSON, 1976; STEVENS, 1979).

Segundo Johnstone e Nadler (2017), para testar $H_0: \boldsymbol{\mu}_1 = \boldsymbol{\mu}_2 = \dots = \boldsymbol{\mu}_k$, com base em λ_1 , usamos o teste de união-interseção de Roy, ou teste de raiz máxima de Roy. A estatística de teste é dada por:

$$\theta = \max \text{autovalor } \mathbf{W}(\mathbf{B} + \mathbf{W})^{-1} = \frac{\lambda_1}{1 - \lambda_1} \quad (40)$$

Rejeita-se H_0 se $\theta \geq \theta_{\alpha, s, m, N}$, os parâmetros s , m e N são definidos como: $s = \min(p, vH)$; $m = \frac{1}{2}(|vH - p| - 1)$; e $N = \frac{1}{2}(vE - p - 1)$. Por utilizar apenas o maior autovalor (λ_1), com frequência a estatística de Roy superestima o efeito. Deste modo, dentre as quatro estatísticas de teste, se apenas a de Roy for significativa, é possível que seja um falso positivo (RENCHEER, 2002).

Existem outros dois testes para $H_0: \boldsymbol{\mu}_1 = \boldsymbol{\mu}_2 = \dots = \boldsymbol{\mu}_k$ baseado nos autovalores $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ de $\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}$, são Lawley-Hotelling e Pillai. A estatística Lawley-Hotelling é definida como (LAWLEY, 1938; HOTELLING, 1951):

$$U^{(s)} = \text{tr}(\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}) = \sum_{i=1}^s \lambda_i \quad (41)$$

Também conhecida como estatística T^2 generalizada de Hotelling, rejeita-se H_0 para grandes valores da estatística de teste. Observa-se que nessa estatística de teste, se $p \leq vH$ e $p \leq vE$, usa-se a distribuição $U^{(s)}$ com os parâmetros (p, vH, vE) . Caso $p > vH$, usase os parâmetros $(vH, p, vE + vH - p)$ no lugar de (p, vH, vE) , esse mesmo padrão nos parâmetros ocorre no teste Λ de Wilks. O teste de Lawley-Hotelling calcula o traço da matriz $\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}$. Se \mathbf{B}

é grande em comparação a \mathbf{W} , o traço é significativamente grande e rejeita-se H_0 , diferente do Λ de Wilks (RENCHEER, 2002).

Assim como na estatística de Lawley-Hotelling, a estatística de Pillai calcula o traço de uma matriz, no caso $(\mathbf{W} + \mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}$. Este teste é o análogo matricial da razão entre a soma dos quadrados do tratamento (*Between*) e a soma total dos quadrados. Deste modo, se \mathbf{B} for grande em comparação à matriz de variância total $\mathbf{W} + \mathbf{B}$, o traço de Pillai será grande e rejeita-se a hipótese nula. O traço de Pillai é dado por (PILLAI, 1955; MIJARES, 1990):

$$V^{(s)} = tr[(\mathbf{W} + \mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}] = \sum_{i=1}^s \frac{\lambda_i}{1 - \lambda_i} \quad (42)$$

A estatística de teste de Pillai é uma extensão da estatística de Roy $\theta = \lambda_1/(1 - \lambda_1)$. Rejeita-se H_0 para $V^{(s)} \geq V_{\alpha,s,m,N}^{(s)}$. Indexados por s , m e N , assim como no teste de Roy.

Rencher (2002), afirma que quando H_0 é verdadeiro todos os vetores de médias estão no mesmo ponto, portanto todas as estatísticas de teste para MANOVA possuem a mesma taxa de erro Tipo I (α), ou seja, todos os testes apresentam a mesma probabilidade de rejeição quando H_0 é verdadeira. No entanto, quando H_0 é falsa os quatro testes apresentam probabilidades diferentes de rejeição, desta forma em uma amostra os quatro testes não precisam concordar, um teste poderia rejeitar H_0 e outros aceitar.

Para casos multivariados os vetores de médias são pontos nas dimensões $s = \min(p, vH)$. Nesse sentido, o poder (probabilidade de rejeitar H_0 quando H_0 falsa) relativos das quatro estatísticas de teste está relacionada com configuração dos vetores de médias $\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2, \dots, \boldsymbol{\mu}_k$, no espaço s -dimensional. Assim, um teste será mais poderoso do que outro para uma determinada configuração de vetores de médias (RENCHEER, 2002).

Johnson e Wichern (2007) complementam que para amostras extremamente grandes os quatro testes se mostram equivalentes, mas para amostras de tamanho moderado, considerando um limite de casos estudados por simulação, os testes de lambda de Wilks, Lawley-Hotelling, e o traço de Pillai, apresentam poder (probabilidade de rejeitar H_0 quando H_0 falsa) semelhante, enquanto a raiz máxima de Roy se comporta de forma diferente. No teste de Roy, o poder é o melhor apenas quando existe um único autovalor diferente de zero.

Duas possíveis configurações dos vetores de médias no espaço dimensional (Figura 32), os pontos podem ocupar uma linha (uma dimensão) ou um plano duas dimensões. Um padrão dos vetores de médias é dado pelo autovalor de $W^{-1}B$, para um autovalor grande e outros pequenos, os vetores de médias se aproximam de uma linha, caso haja dois autovalores grande os vetores de médias ocupam duas dimensões. Deste modo, por usar o máximo autovalor de $W^{-1}B$, o teste de Roy é mais poderoso quando os vetores de médias são colineares. Por outro lado, quando os vetores são difusos os outros testes (lambda de Wilks, Lawley-Hotelling, e o traço de Pillai) têm maior poder (RENCHEER, 2002; JOHNSTONE e NADLER, 2017).

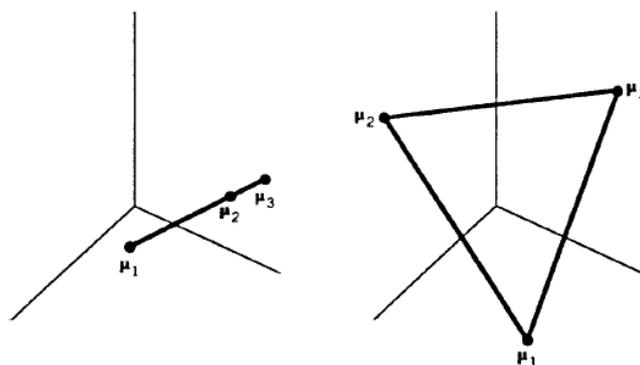


Figura 32. Duas configurações dos vetores de médias.

Fonte: Rencher (2002).

Um problema prático da MANOVA é que as quatro estatísticas de teste nem sempre coincidem, o poder dos testes é diferente sob várias condições. No caso colinear, a ordem de poder é $\theta \geq U^{(s)} \geq \Lambda \geq V^{(s)}$, em casos difusos e intermediários (colinear-difuso) a ordem de poder é invertida $V^{(s)} \geq \Lambda \geq U^{(s)} \geq \theta$. A última ordem também vale para a precisão do erro Tipo I quando as matrizes de covariância da população não são iguais (não homogêneas), nesse caso o teste de Pillai ($V^{(s)}$) aparentemente é o mais robusto (OLSON, 1976; STEVENS, 1979).

Rencher (2002) sugere o *Box' M-test* para testar a homogeneidade da matriz de covariância. Para Johnson e Wichern (2007), o traço de Pillai apresenta mais robustez contra a não normalidade, mas sugerem transformações nos dados originais quando os resíduos não forem normais. Para verificar se os dados multivariados são normalmente distribuídos pode-se usar o teste *Shapiro-Wilk*.

Segundo Rencher (2002), historicamente o lambda de Wilks desempenha um papel dominante nos testes de significância em MANOVA, pois foi o primeiro teste a ser derivado e apresenta aproximações χ^2 e F , distribuições bem conhecidas, mas nem sempre é o teste mais poderoso. No entanto, é provável que Wilks continuará a desempenhar o seu papel dominante devido à sua flexibilidade e precedência histórica.

Dessa forma o uso do teste de Roy só é recomendado no caso colinear. Em caso difuso, se os dados vierem de populações não normais, exibindo assimetria e curtose positiva os outros três testes terão desempenho aceitável. Quando há heterogeneidade na matriz de covariância o teste de Pillai é superior aos outros dois. A maioria dos softwares destinados a cálculos estatísticos rotineiramente calculam as quatro estatísticas de teste e normalmente chegam a mesma conclusão. Caso contrário devem ser avaliadas as conclusões conflitantes (RENCHE, 2002).

Neste trabalho, a combinação das elipses de confiança com a MANOVA permite uma análise gráfica acrescida de resultados estatísticos mais detalhados como *p-value* e *F-value* que permitem melhor comparação entre os cenários analisados.

4 MODELAGEM DAS VARIÁVEIS DO PROBLEMA

4.1 Fluxo de modelagem

A criação do modelo para a simulação dos resultados foi dividida em etapas (Figura 33), para melhor organizar o fluxo de modelagem e detalhar pontos importantes em cada etapa de construção.

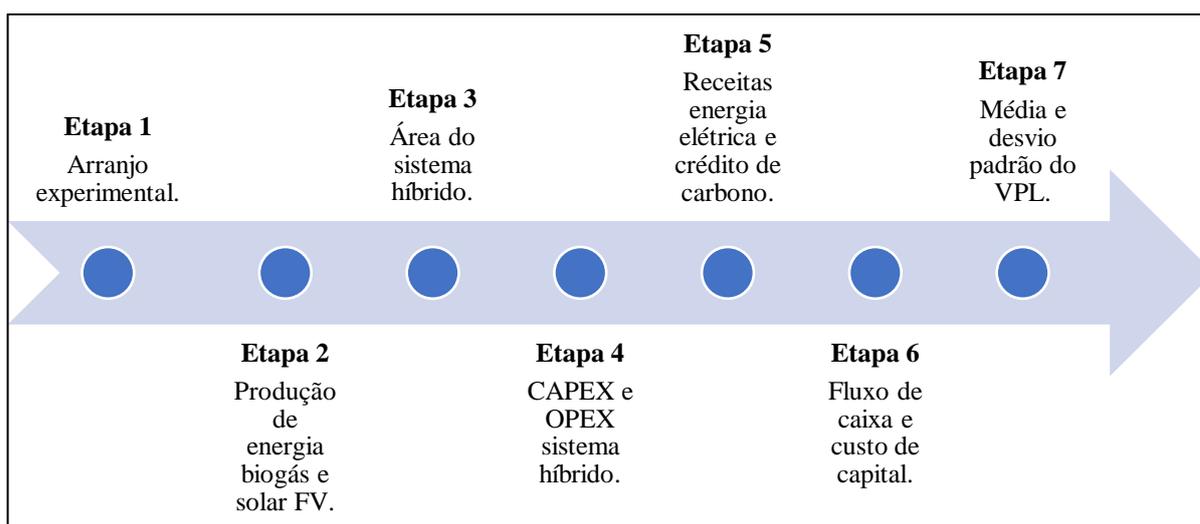


Figura 33. Etapas da modelagem.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023).

4.2 Planejamento de experimentos

Um experimento é um teste ou uma série de testes. Experimentos são realizados em todas as disciplinas científicas, são importantes para entender o funcionamento dos sistemas e processos. A validade das conclusões de um experimento está relacionada com a condução do experimento. Neste sentido, o desenho experimental tem um papel importante na solução do problema que motivou o experimento (MONTGOMERY e RUNGER, 2011).

Nesse trabalho, o primeiro passo para a criação de um modelo de simulação foi definir os experimentos a serem realizados. De acordo com a característica do problema utilizou-se o arranjo de misturas, para gerar as combinações de potência instalada biogás-solar FV no sistema

híbrido. A matriz experimental foi gerada por meio do *software Minitab®*, foi criado um design simplex lattice, com dois componentes, cinco graus de liberdade e foram inclusos o ponto central e pontos axiais, os valores dos experimentos, contendo o percentual simulado para cada variável de entrada (potência instalada de cada fonte renovável) estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2. Matriz experimental.

Fração biogás		Fração solar FV	
1,00	75kW	0,00	0kW
0,80	60kW	0,20	15kW
0,60	45kW	0,40	30kW
0,40	30kW	0,60	45kW
0,20	15kW	0,80	60kW
0,00	0kW	1,00	75kW
0,50	37,5kW	0,50	37,5kW
0,75	56,25kW	0,25	18,75kW
0,25	18,75kW	0,75	56,25kW

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023).

O arranjo experimental e a definição das variáveis de entrada, neste caso a potência instalada das fontes biogás solar FV, é o ponto de partida para a construção do modelo de simulação e obtenção das variáveis de resposta.

4.3 Variáveis de Entrada

4.3.1 Produção de energia sistema híbrido

4.3.1.1 Produção de energia proveniente de biogás da suinocultura

Para a modelagem da produção de energia elétrica proveniente do biogás da suinocultura, serão utilizados procedimentos semelhantes ao do estudo de Bernardes et al. (2022). Os cálculos para o sistema híbrido partem do arranjo de misturas, onde a capacidade máxima instalada é de 75 kW (limite superior para a microgeração distribuída), para a construção da ferramenta de simulação, o cenário inicial com 100% da fonte de biogás foi

utilizado, a partir deste foram derivados os outros cenários do arranjo de misturas, com frações menores da fonte de biogás.

O primeiro passo para a construção da ferramenta foi estimar a produção de biogás necessária para atender as faixas de potência simuladas no arranjo de misturas. Para tal foi utilizada a técnica de análise de regressão para os dados de potência instalada de motogeradores (kW) e a faixa de vazão de biogás (m³/h) necessária para atender a demanda do motogerador, conforme especificado na Tabela 3 (CIBIOGÁS, 2019a).

Tabela 3. Relação potência, vazão e rendimento.

Potência (kW)	Faixa de Vazão (m ³ /h)	Rendimento (%)
10	10,0	13,54
24	19,0	17,10
36	23,4	20,85
48	32,0	20,30
57	34,9	22,09
72	43,0	22,67
86	50,9	22,89

Fonte: Adaptado de CIBiogás (2019a).

A função obtida apresenta bom ajuste ($R^2 = 99,63\%$ e R^2 (adj) = 99,56%) e é representada por:

$$V_b = 5,29892 + 0,52885 \times P_m \quad (43)$$

onde: V_b é a vazão de biogás (m³/h) e P_m é a potência instalada do motogerador.

A partir da vazão do biogás é calculada a produção total de biogás por ano (P_{tb}), considerando o tempo de operação da planta 12h por dia e 365 dias no ano, tem-se (CIBIOGÁS, 2019a):

$$P_{tb} = 12 \times 365 \times V_b \quad (44)$$

De acordo com Bernardes et al. (2022), o volume de biogás produzido por categoria de animais em uma granja de ciclo completo, obedece a relação descrita na Tabela 4.

Tabela 4. Produção de biogás por categoria.

Animais por Categoria	Produção de biogás	Produção por categoria (P_{cb})
Matrizes	14,87%	14,87% P_{tb}
Fêmeas jovens	0,69%	0,69% P_{tb}
Reprodutores	0,26%	0,26% P_{tb}
Leitões (maternidade)	2,10%	2,10% P_{tb}
Leitões (creche)	7,78%	7,78% P_{tb}
Animais (recria)	25,23%	25,23% P_{tb}
Animais (terminação)	49,07%	49,07% P_{tb}

Fonte: Adaptado de Bernardes et al. (2022).

Com a produção de biogás estimada, o próximo passos é o estimar o volume de dejetos em uma granja de ciclo completo (criação desde o nascimento até o abate), necessário para a obtenção da produção de biogás anual estipulada. Bernardes et al. (2022) consideraram o potencial de produção de biogás por animal em cada categoria de acordo com a metodologia AMS.III.D e parâmetros das instituições United Nations Framework Convention of Climate Change (UNFCCC), CIBiogás e International Panel on Climate Change (IPCC). A metodologia e os parâmetros são descritos nas Eq. (45 e 46) e na Tabela 5 (UNFCCC, 2017; EMBRAPA, 2018; IPCC, 2006):

$$VSLTy = \left(\frac{W'}{W} \right) \times VS \times ndy \quad (45)$$

onde: $VSLTy$ = sólidos voláteis por classe animal em um ano, W' = peso médio por classe de animais estudados, W = peso médio da classe de animais definida, VS = desvio padrão para a taxa de excremento sólido volátil por dia com base em material seco para as populações definidas (kg de matéria seca/animal/d), e ndy = número de dias por ano que o biodigestor deve operar (300 dias).

Tabela 5. Sólidos voláteis por classe de animais.

Animais por Categoria	<i>W'</i>	<i>W</i>	<i>VS</i>	<i>VSLT_y</i>
Matrizes	215	198	0,46	149,85
Fêmeas jovens	105	198	0,46	73,18
Reprodutores	215	198	0,46	149,85
Leitões (maternidade)	4	50	0,28	6,72
Leitões (creche)	16	50	0,28	26,88
Animais (recria)	45,5	50	0,28	76,44
Animais (terminação)	88,5	50	0,28	148,68

Fonte: Adaptado de IPCC (2006) e EMBRAPA (2018).

A partir manipulação dos componentes das Eq. (46) é possível obter o número de animais por categoria na granja de suínos de acordo com a potência instalada da fonte de biogás no sistema híbrido.

$$P_{cb} = NLT_y \times VS_d \times MS\%_{Bl,j} \times ndy \times B_0 \times 0.78 \quad (46)$$

sendo: P_{cb} = volume de produção de biogás por categoria; NLT_y = número médio de suínos por classe em um ano; VS_d = relação entre $VSLT_y$ e ndy ; $MS\%_{Bl,j}$ = parcela de resíduos tratados no sistema “j” na linha de base que 100% dos resíduos produzidos e tratados $MS\%_{Bl,j} = 1$; B_0 = taxa de biogás por sólidos voláteis ($0,38 \text{ m}^3$ biogás/kg); e 78% de eficiência, há uma perda de gases do biodigestor para a atmosfera de aproximadamente 22% (EMBRAPA, 2018; IPCC, 2006; MONTEIRO et al., 2015).

Para facilitar o cálculo do volume de dejetos foi criada uma média de produção de dejetos por animal ano em uma granja de ciclo completo, baseado nos dados compilados de Bernardes et al. (2022). A média obtida foi de aproximadamente $2,42 \text{ m}^3/\text{ano}$ (EMBRAPA, 1993; 2004; 2011a; 2011b), o cálculo leva em conta o número de animais por categoria e a produção de dejetos em cada fase de produção, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Produção de dejetos em cada fase de produção.

Animais por Categoria	Dejetos (m³/animal)
Matrizes (gestação, reposição e reserva)	0,0162
Matrizes (maternidade + leitões)	0,027
Reprodutores	0,009
Leitões (creche)	0,0014
Animais (recria e terminação)	0,007

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (1993, 2004, 2011a, 2011b).

Obtido o número de animais por categoria é calculado o número total de suínos na granja em um ano (NT_y) e, com isso, é obtido o total de m³ de dejetos produzidos em um ano (V_d):

$$V_d = NT_y \times 2,42 \quad (47)$$

O cálculo de volume de dejetos é utilizado para dimensionar o biodigestor, definir as medidas e a área ocupada pelo biogás no sistema híbrido.

Por fim, foi estimado o cálculo da produção de energia elétrica. No entanto, o potencial elétrico do biogás depende da concentração de metano e do rendimento do grupo moto gerador. Neste trabalho, foram simuladas concentrações de metano entre (55%-65%), sendo a média 60%, a incerteza atrelada a concentração de metano é representada por uma distribuição triangular. Para rendimento do motor ciclo Otto na GD, foi realizada uma regressão baseada nos dados de rendimento por potência instalada, obedecendo a relação da Tabela 2 (CIBIOGÁS, 2019a), cujos resultados mostram um ajuste de $R^2 = 96,09\%$ e $R^2(\text{adj}) = 94,14\%$, a função que calcula o rendimento do grupo moto gerador (R_{GMG}) é:

$$R_{GMG} = 0,107923 + 0,003187 \times P_m - 0,000021 \times P_m^2 \quad (48)$$

Utilizando o rendimento e a concentração de metano no biogás obtém-se o fator de conversão de biogás para energia elétrica em kWh/m³:

$$F_c = 9,9 \times C_m \times R_{GMG} \quad (49)$$

onde: F_c = fator de conversão; C_m = concentração de metano; e 9,9 é o potencial bruto de produção de energia (kWh/m³) para um gás com 100% de metano (CIBIOGÁS, 2019a).

A produção de eletricidade esperada do biogás (E_{eb}) é estimada, como em Bernardes et al. (2022) por:

$$E_{eb} = F_c \times V_b \quad (50)$$

sendo: F_c = fator de conversão e V_b é a vazão de biogás (m³/h).

Após estimar a produção de biogás, dejetos e energia para a fração de biogás do sistema híbrido é possível dimensionar o tamanho da estrutura para todas as frações de biogás no sistema híbrido propostas no arranjo de misturas.

4.3.1.2 Produção de energia solar FV

No que concerne à estimativa da produção de energia solar FV, o presente estudo segue o mesmo procedimento aplicado em Rocha et al. (2017a). A geração solar FV ocorre pela conversão da radiação solar por meio de painéis FV. Nesse sentido, a tensão e a corrente para a geração de energia elétrica dependem da radiação e da tecnologia utilizada para a conversão (SHUKLA, SUDHAKAR e BAREDAR, 2016).

Uma vez que a geração de energia FV está diretamente associada ao nível de irradiação solar, para um adequado planejamento técnico-econômico do sistema solar FV, é importante estimar corretamente a energia gerada pelo sistema, considerando as variáveis do ambiente onde o sistema será instalado (NAVABI et al., 2015). Os cálculos da produção de energia de um painel FV é dado pela Eq. (51) (JARDIM et al., 2004):

$$E_p = \eta \cdot I_m \cdot A \quad (51)$$

onde: E_p = é a energia gerada (kWh); η = eficiência do painel FV (adimensional); I_m = irradiação média no período (kWh/m²); A = área do painel FV (m²).

A produção de energia do sistema FV é dada pelo produto da potência do painel, com a irradiação local e a área ocupada pelo sistema, entretanto também deve-se levar em consideração a redução de desempenho causada por: perdas nos inversores; sombreamento; poeira e sujeira nos módulos; perdas no cabeamento; eficiência reduzida devido à exposição a altas temperaturas; perdas por indisponibilidade; e diferenças nas curvas características dos módulos (ABINEE, 2012).

Para tal, conforme indicado por Elibol et al. (2017), foi considerado o valor de 81% como índice de desempenho (ρ), além da taxa de degradação indicada em Jordan et al. (2016) e equivalente a 0,8% ao ano.

$$E'_p = E_p \cdot \rho \cdot (1 - \varphi)^{n-1} \quad (52)$$

onde: E'_p = energia produzida após as perdas de desempenho (kWh); ρ = taxa de desempenho; φ = taxa de degradação (%) por ano; n = período atual referente à vida útil do equipamento.

Dessa forma o número de placas (n_{pl}) é obtido pela divisão da potência instalada total do sistema FV no sistema híbrido pela potência de uma placa 465W. A energia elétrica esperada produzida pelo sistema FV (E_{es}) é:

$$E_{es} = E'_p \times n_{pl} \quad (53)$$

Para melhor representar a produção de energia FV, foi inserida a incerteza sobre o nível de irradiação local. Para tanto, são utilizadas distribuições de probabilidade para representar as incertezas e, avaliar seu impacto na produção energética anual (PEA). Os valores de produção de energia considerando o efeito das incertezas da irradiação são estimados conforme a Eq. (54).

$$PEA = \int E'_p(I_m) \quad (54)$$

As equações definidas para o cálculo da energia produzida para a fonte FV, possibilitam realizar simulações para todas as faixas de potência solar FV no sistema híbrido. Além disso, a partir do número de placas obtido pode-se dimensionar a área ocupada pela fração da fonte solar FV no sistema híbrido.

4.3.2 Área ocupada pelo sistema híbrido

Para estimar a área ocupada pelo sistema de biogás Eq. (55), inicialmente é necessário dimensionar o volume em m³ da câmara do biodigestor de lagoa coberta (V_{tb}), baseado no volume diário em m³ de resíduos (V_d), multiplicado pelo tempo de retenção hidráulico (TRH), sendo recomendado 30 dias para a biodigestão de resíduos orgânicos. Vale destacar que para o modelo de biodigestor de lagoa coberta a tolerância de sólidos totais é de até 2% (CIBIOGÁS, 2019a).

$$V_{tb} = V_d \cdot TRH \quad (55)$$

De acordo com Alves (2017), a partir do volume da câmara do biodigestor (V_{tb}) pode ser calculado o volume geométrico da câmara (V_{gb}) e suas dimensões, considerando que a câmara apresenta formato de trapézio invertido Eq. (56). Além disso, Bartholomeu et al. (2007) sugere que o volume geométrico da câmara do biodigestor de lagoa coberta seja acrescido de 30%, possibilitando um volume adicional de segurança.

$$V_{gb} = 1,3 \cdot V_{tb} = \frac{(a + b)}{2} \cdot h \cdot L \quad (56)$$

onde: a = largura da base maior do trapézio (m); b = largura da base menor do trapézio (m); h = altura do trapézio (m); L = comprimento do biodigestor (m).

Para Feiden et al. (2004), a razão entre o comprimento (L) e a largura (a) do biodigestor deve ser de 5:1, não podendo ser menor do que 2:1. A altura da câmara obedece às relações propostas na Tabela 7.

Tabela 7. Relação volume e altura da câmara do biodigestor.

Volume do biodigestor (m ³)	Altura (m)
Até 100	1,5
Entre 100 e 500	2,5
Entre 500 e 2000	3,5
Acima 2000	4,5

Fonte: Adaptado Alves (2017).

O volume da caixa de entrada (V_{cxe}) deve ser 20% maior do que o volume de resíduos gerados por dia (V_d) e o volume da caixa de saída (V_{cxs}) deve ser três vezes o volume da caixa de entrada (ALVES, 2017). As caixas devem ser quadradas e possuir altura de 1 m (GONÇALVES, 2018). As Eq. (57 e 58) representam as fórmulas para o cálculo do volume das caixas de entrada e saída.

$$V_{cxe} = V_d \cdot 1,2 = h_{cxe} \cdot L_{cxe}^2 \quad (57)$$

$$V_{cxs} = 3 \cdot V_{cxe} = h_{cxs} \cdot L_{cxs}^2 \quad (58)$$

onde: V_{cxe} = volume da caixa de entrada (m³); V_d = volume de resíduo orgânico diário (m³); h_{cxe} = altura da caixa de entrada (m); L_{cxe} = comprimento da caixa de entrada (m); V_{cxs} = volume da caixa de saída (m³); h_{cxs} = altura da caixa de saída (m); L_{cxs} = comprimento da caixa de saída (m).

A área total ocupada pelo sistema de biogás é dada pela Eq. (60) e envolve a área ocupada pelo biodigestor, a área da caixa de entrada e a área da caixa de saída.

$$A_{Sbio} = A_{bio} + A_{cxe} + A_{cxs} \quad (59)$$

$$A_{Sbio} = (a \cdot L) + L_{cxe}^2 + L_{cxs}^2 \quad (60)$$

sendo: A_{Sbio} = área total ocupada pelo sistema de biogás (m^2); A_{bio} = área ocupada pela câmara do biodigestor (m^2); A_{cxe} = área ocupada pela caixa de entrada (m^2); A_{cxs} = área ocupada pela caixa de saída (m^2); a = largura da base maior do trapézio (m); L = comprimento do biodigestor (m); L_{cxe} = comprimento da caixa de entrada (m); L_{cxs} = comprimento da caixa de saída (m).

Por meio das relações de volume e área do biodigestor pode-se dimensionar o biodigestor para as diversas faixas de potências presentes no arranjo de misturas e, por meio do tamanho da estrutura estimar o CAPEX e OPEX da planta de biogás.

Por sua vez, a estimativa da área ocupada pelo sistema solar FV é mais simples, sendo obtida pelo produto entre altura das placas (h_{pl}) com o comprimento (L_{pl}) e, pelo número de placas instaladas (n_{pl}).

$$A_{SFV} = h_{pl} \times L_{pl} \times n_{pl} \quad (61)$$

onde: A_{SFV} = área total ocupada pelo sistema solar FV (m^2); h_{pl} = altura das placas FV (m); L_{pl} = comprimento das placas FV (m), sendo a área da placa ($h_{pl} \times L_{pl}$) aproximadamente 2,19 m^2 .

4.3.3 CAPEX e OPEX sistema híbrido

O investimento inicial (CAPEX) para a produção de energia elétrica por meio de biogás de dejetos de suínos é dividido em pré-tratamento, escavações e obras civis, biodigestor e grupo motor-gerador (BERNARDES et al., 2022).

O valor do CAPEX para a fração de biogás obedece a uma economia de escala, ou seja, quanto maior o sistema, menor é o valor de CAPEX por kW instalado. Nesse sentido, os investimentos em tecnologias de pré-tratamento dos dejetos são descritos de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8. Pré-tratamento - Tanque receptor com agitador homogeneizador.

Volume do biodigestor	Valor (R\$)
> 1.000 m ³	26.479,31
> 500 m ³	17.652,87
< 500 m ³	8.826,44

Fonte: Adaptado Bernardes et al. (2022).

As simulações dos valores de escavações e obras civis são realizadas de acordo com o volume do biodigestor e das caixas de entrada e saída, sendo valor dos investimentos em escavações R\$12,25/m³ e das obras civis R\$ 17,80/m³ (BERNARDES et al., 2022). Além disso, é necessário a construção da casa de máquinas no valor de R\$ 16.000,00, considerado fixo independentemente do tamanho do sistema de biogás. Os valores de CAPEX para biodigestor de lagoa coberta são definidos conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Biodigestor.

Componentes biodigestor	Dados
Geomembrana fossa (PVC 1,00 mm)	R\$ 21,40/m ²
Geomembrana manta (PVC 1,25 mm)	R\$ 31,50/m ²
Fixação da lona	R\$ 4,27/m ³
Mão de obra	R\$ 24,68/m ³
Agitador homogeneizador - L2 10 CV + Painel	Invariável – 1Un. R\$ 24.877,00
Tubulação	> 750 m ³ - 2 Un. / < 750 m ³ - 1 Un. (R\$ 535,00/Un.)
Válvula biogás	> 750 m ³ - 2 Un. / < 750 m ³ - 1 Un. (R\$ 1.819,00/Un.)
Saída de biogás	> 1.000 m ³ - 3 Un. / > 500 m ³ - 2 Un. / < 500 m ³ - 1 Un. (R\$ 535,00/Un.)
Flare queimador de excesso	Invariável – 1Un. R\$ 12.600,00

Fonte: Adaptado Bernardes et al. (2022) e Berhorst (2018).

O último item do CAPEX da fração de biogás é o grupo motor-gerador que segue os parâmetros detalhados na Tabela 10.

Tabela 10. Grupo motor-gerador.

Componentes grupo motor-gerador	Dados
Grupo motor-gerador + Filtro H ₂ S	R\$ 2.368,49/kW instalado
Material elétrico	Invariável – R\$ 6.000,00
Painel – proteção GD	R\$ 716,00/kW instalado
Projeto GD	Invariável – R\$ 15.000,00

Fonte: Adaptado Coelho et al. (2018).

O OPEX, custos de operação e manutenção da fração de biogás, é composto pelo salário e os encargos de um operador no valor de R\$ 30.373,06 por ano, independente da potência instalada de biogás, e, segundo Berhorst (2018), uma taxa de 6% sobre o CAPEX para cobrir custos de manutenção, seguros e causalidades.

Na fração solar FV do sistema híbrido, o CAPEX segue os valores da instalação de placas FV no solo propostos pela Greener (2023). A Tabela 11 mostra os valores simulados de acordo com a faixa de potência, incluindo os ganhos de escala.

Tabela 11. Preço do sistema FV por Wp.

Potência sistema	Valor por Wp
≤ 2 kWp	6,23
≤ 4 kWp	5,05
≤ 8 kWp	4,51
≤ 12 kWp	4,22
≤ 30 kWp	3,86
≤ 50 kWp	4,29
≤ 75 kWp	4,42

Fonte: Adaptado Greener (2023).

De acordo com Holdermann, Kissel e Beigel (2014), o OPEX, custos de operação e manutenção, para a fonte FV é uma taxa de 0,5% ao ano estimada sobre o valor do CAPEX.

4.3.4 Receitas

As receitas são estimadas a partir da última tarifa cobrada em dezembro de 2022, para três cidades em três diferentes estados Uberlândia (MG), Agudos (SP) e Toledo (PR), por se tratar de GD foram utilizadas tarifas executadas pela concessionária que atende cada cidade, nesse caso Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e Companhia Paranaense de Energia (COPEL), os valores de tarifas para cada kWh são R\$ 0,65313, R\$ 0,66192 e R\$ 0,56974 respectivamente (ANEEL, 2022).

Além disso, de acordo com a lei 14.300, Marco Legal da GD, foi considerado o desconto escalonado do Fio B de acordo com a Tabela 12 (PLANALTO, 2022). De acordo com dados da ANEEL (2023c), o percentual de desconto para o Fio B é de 39,1463%.

Tabela 12. Escalonamento desconto Fio B.

Ano	Escalonamento	Fio B	Desconto GD
2023	15%	39,1463%	5,8719%
2024	30%	39,1463%	11,7439%
2025	45%	39,1463%	17,6158%
2026	60%	39,1463%	23,4878%
2027	75%	39,1463%	29,3597%
2028	90%	39,1463%	35,2317%
2029	100%	39,1463%	39,1463%

Fonte: Adaptado PLANALTO (2022); ANEEL (2023c).

Os incentivos fiscais, como a isenção de ICMS, ocorrem de forma distinta entre os estados no *net-metering* brasileiro (BERNARDES et al., 2022). No caso do estado de Minas Gerais, o governo renovou a isenção de ICMS por mais 10 anos, até 2032. No entanto, a partir de 2029, esses benefícios serão reduzidos em 20% ao ano, conforme prevê o Convênio ICMS-68/2022 (ABSOLAR,2023). De acordo com as disposições do Convênio ICMS-68/2022, tal como disposto na Lei Complementar 186/2021, a isenção total do ICMS ocorre nos 6 primeiros anos (18%), ou seja, até 2028, depois do sexto ano o incentivo decresce 20% ao ano até 2032, reduzindo para 14,4%, 10,8%, 7,2% até 3,6% no décimo ano. Do décimo primeiro ano do projeto em diante não é mais concedido isenção de ICMS (CONFAZ, 2022).

Para projetos instalados em São Paulo, também há a isenção de ICMS sobre 50% da parcela da tarifa de energia, mas durante todo ciclo de vida do projeto. Por outro lado, os menores incentivos fiscais ocorrem no estado do Paraná, onde apenas metade do ICMS (9%) é isento nos quatro primeiros anos de operação da planta (CONFAZ, 2018; COELHO et al., 2021).

Buscando simular os possíveis cenários de receitas neste trabalho, também foi estimado um crescimento para a tarifa de acordo com Holdermann, Kissel e Beigel (2014) de 2,3% ao ano. O valor do crescimento foi considerado como uma variável estocástica e obedece a uma distribuição triangular.

Complementando as receitas foi considerado o crédito de carbono gerado pelo sistema híbrido de acordo com a energia produzida pela composição de cada fonte. A Eq. (63) mostra o cálculo para a apuração do crédito de carbono produzido pelo sistema híbrido e sua conversão para moeda corrente, neste caso real (MCTI, 2022).

$$E_{eh} = E_{eb} + E_{es} \quad (62)$$

$$V_{cc} = E_{eh} \times F_{em} \times V_e \times C_e \quad (63)$$

onde: E_{eh} = energia produzida no sistema híbrido em MWh; V_e = valor dos créditos de carbono em reais; F_{em} = fator de emissão de CO₂ de 0,3406 (MCTI, 2022); V_e = preço do crédito de carbono em euro; C_e = cotação do euro.

Utilizou-se a série histórica de cotação semanal de preços do crédito de carbono do ano de 2022 para realizar as simulações do complemento das receitas do projeto.

4.3.5 Fluxo de caixa e custo de capital

Para a análise de viabilidade de investimento, o fluxo de caixa do projeto é estruturado de acordo com as entradas e saídas de caixa para projetos de híbrido biogás-solar FV. No entanto, como se trata de GD para pessoa física, não compõem o fluxo de caixa as contas de

imposto de renda e depreciação. As entradas e saídas de dinheiro para a apuração do fluxo de caixa estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5. Fluxo de caixa

(+) Economia na conta de energia
(-) ICMS
(-) FIO B
(+) Crédito de Carbono
(-) O & M
(-) Despesas Financeiras (Juros)
(=) Lucro Líquido
(-) Amortização de Dívidas
(-) Investimentos (CAPEX)
(+) Liberação Financiamento
(=) Fluxo de Caixa

Fonte: Adaptado Bernardes et al. (2022).

Uma vez que o fluxo de caixa calculado é o fluxo de caixa do acionista, a taxa de desconto utilizada no VPL é obtida por meio da estimativa do custo do capital próprio. Deste modo, em estudos relacionados a investimentos renováveis, o *Capital Asset Pricing Model* (CAPM) é dominante (STEFFEN, 2020). Este modelo, descrito na Eq. (64), foi originalmente proposto por Sharpe (1964), Lintner (1965) e Mossin (1966) para o cálculo do custo de capital próprio. Nesse modelo K_e = custo de capital próprio; r_f = taxa livre de risco; β = coeficiente de risco; PRM = prêmio de risco.

$$K_e = r_f + \beta \cdot PRM \quad (64)$$

O CAPM considera que, em um mercado competitivo, o prêmio de risco varia proporcionalmente a um risco não diversificável, que é afetado por cenários políticos, recessões, fugas de capitais, etc., representados pelo beta (β), bem como a expectativa de mercado representada pelo prêmio de risco (PRM) e, o retorno esperado de um prêmio teoricamente livre de risco. No presente estudo, o prêmio da taxa livre de risco (r_f) foi tomado como o de um título do tesouro do governo brasileiro a Nota do Tesouro Nacional - Série B

(NTN-B) com prazo de vencimento de 25 anos (TESOURO DO BRASIL, 2023). O *PRM* foi obtido a partir de dados publicados para o mercado brasileiro em 2022 (FGV-EESP, 2023).

O coeficiente beta é o quociente entre a covariância do retorno do ativo e o retorno da carteira composta por todos os ativos do mercado, dividido pela variância do mercado. Neste estudo, o valor beta (β) é a média dos valores das empresas do setor elétrico negociadas no mercado de capitais brasileiro. Os dados foram obtidos por meio do programa *Economática*®. O r_f e o *PRM* foram descontados pela inflação usando o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), que foi de 5,79% ao ano em 2022 (IBGE, 2023). Os dados coletados para as estimativas do CAPM foram os valores de dezembro de 2022, conforme resumido na Tabela 13.

Tabela 13. Parâmetros para taxa de desconto.

Parâmetros	Valores
r_f	6,28% ao ano
B	0,70
PRM	5,61% ao ano
$K_e (i)$	11,77% ao ano

Fonte: Adaptado Tesouro do Brasil (2023), FGV-EESP (2023), IBGE (2023).

No que diz respeito às premissas de financiamento, considerou-se as condições de financiamento do apoio financeiro do Programa de Financiamento a Sistemas de Produção Agropecuária Sustentáveis (Renovagro), do BNDES. As condições de financiamento desses empréstimos até o final de 2022 estão descritas na Tabela 14, com a taxa de juros já descontada pela inflação no período (BNDES, 2023).

Tabela 14. Condições de financiamento.

Parâmetros	Valores
CAPEX financiado	80% do total
Taxa de juros	2,56% ao ano
Amortização	10 anos
Prazo de Carência	5 anos

Fonte: Adaptado BNDES (2023).

Após a definição de todas as variáveis que compõem o fluxo de caixa, foram definidas as variáveis de resposta, neste caso a média e o desvio padrão do VPL.

4.4 Variáveis de Resposta

4.4.1 Média e desvio padrão do VPL

No presente estudo, o critério de decisão considerado é o VPL, que se baseia na estimativa do valor presente dos fluxos de caixa futuros, descontados a um custo de capital, subtraído ao valor do fluxo de caixa na data zero. Quando o resultado de NPV é maior que zero, considera-se aceitável o investimento, sendo que quando o VPL é menor que zero, recomenda-se rejeitar o investimento. O VPL é dado pela Eq. (65) (NREL, 1995).

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0 \quad (65)$$

sendo: FC_0 = fluxo de caixa verificado na data zero; FC_j = representa o valor do saldo de entradas e saídas de caixa prevista para cada intervalo de tempo j ; i = é a taxa de desconto (custo de capital); n = horizonte de planejamento.

O cálculo do VPL associado aos experimentos do projeto em cada cenário, será obtido a partir da Simulação de Monte Carlo. Para estimar o resultado o VPL, são modeladas as distribuições de probabilidade para atribuir incertezas nos valores que impactam as principais variáveis de entrada do fluxo de caixa. Por meio da distribuição cumulativa do VPL é possível avaliar as probabilidades de ocorrências de resultados de VPL desejados, neste caso VPL maior que zero Eq. (66) (NREL, 1995).

$$P(X > x) = 1 - \int_{-x}^x f(u) du \quad (66)$$

onde: $P(X > x)$ = probabilidade cumulativa do valor do NPV desejado; x = é o valor mínimo que o VPL desejado pode assumir (neste caso, zero); $f(u)$ = é função densidade de probabilidade do VPL (representada pela curva de probabilidades geradas pelo VPL simulado).

Após ter sido feito o dimensionamento do sistema híbrido biogás-solar FV é possível construir as etapas seguintes da análise de viabilidade de forma estocástica. Para tanto, é necessário representar as incertezas nas variáveis que o comportamento aleatório pode impactar nos resultados do VPL.

Neste projeto, foram consideradas como variáveis de incerteza nas simulações a concentração de metano na produção do biogás, a irradiação solar, o crescimento da tarifa de energia elétrica e a cotação do crédito de carbono.

A distribuição triangular foi utilizada para as variáveis concentração de metano e crescimento da tarifa de energia elétrica. Para a concentração de metano utilizou-se os parâmetros (mínimo = 55%; mais provável = 60%; máximo = 65%), na variável de o crescimento da tarifa utilizou-se (mínimo = 0%; mais provável = 2,3%; máximo = 2,3%).

A distribuição adotada para a irradiação solar, foi definida utilizando o histórico de irradiação solar de cada uma das cidades analisadas no período de 1984 a 2021 e, a partir do teste de Anderson Darling, o resultado de *goodness-of-fit* com grau de significância de 5% indicou que distribuição Weibull é a que melhor representaria a incerteza da irradiação, a parametrização por estado é detalhada na Tabela 15.

Tabela 15. Parâmetros distribuição Weibull por cidade.

Cidade	Distribuição Weibull
Uberlândia – MG	(Local = 4,76; Escala = 0,74; Forma = 5,93)
Agudos – SP	(Local = 4,47; Escala = 0,73; Forma = 5,92)
Toledo – PR	(Local = 4,46; Escala = 0,52; Forma = 3,29)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023).

Da mesma forma, a cotação do crédito de carbono foi parametrizada, neste caso, utilizando a série histórica semanal da cotação do crédito de carbono em 2022, a distribuição mais adequada no teste de Anderson Darling foi a Lognormal com os valores (Local = -46.372,04; Média = 81,46; Desvio Padrão = 7,84).

Utilizando o modelo desenvolvido foram simulados 5.000 resultados de VPL para cada experimento do arranjo de misturas em cada cenário analisado, por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC) realizada no *software Crystal Ball®*, possibilitando o cálculo da média e desvio padrão do VPL, definidos como variáveis de resposta do modelo. Com base nas variáveis de respostas foram realizadas as comparações entre os cenários, utilizando as técnicas de estatística multivariada e, para o melhor cenário avaliado foi realizada a otimização, permitindo obter a melhor composição biogás-solar FV para o sistema híbrido.

5 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA E PASSO A PASSO

5.1 Classificação da pesquisa

Este estudo visa à solução de um problema específico que trata da configuração ótima para um sistema híbrido de GD biogás-FV para a produção de energia elétrica em uma granja de suínos. A pesquisa caracteriza-se por sua natureza aplicada, uma vez que os resultados serão utilizados para solucionar um problema real. Segundo Appolinário (2006), a pesquisa aplicada é originada por objetivos comerciais, por meio do desenvolvimento de processos ou produtos para suprir uma demanda de mercado.

Quanto a seus objetivos, a pesquisa pode ser classificada como explicativa, pois visa identificar os fatores que influenciam a ocorrência de um fenômeno e aprofundar o conhecimento da realidade (TURRIONI e MELLO, 2012). Neste caso, busca-se desenvolver uma visão mais detalhada sobre variáveis a configuração de usinas híbridas solar biogás-FV por meio da criação de um modelo para simular a geração de energia de ambas as fontes, controlando as variáveis de entrada e, otimizando as variáveis de resposta.

A pesquisa adota uma abordagem quantitativa, na qual as informações e os resultados do projeto serão traduzidos em números, utilizando-se recursos e técnicas estatísticas (BERTRAND e FRANSOO, 2002). Assim, será avaliada a configuração ótima do sistema biogás-FV que obedeça às restrições impostas para o sistema e que melhore os atributos desejados como resultado.

Por fim, o método de pesquisa utilizado é a modelagem e simulação. Segundo Chung (2004), a modelagem e simulação é o processo de experimentar um modelo físico por meio de um modelo computadorizado, sem que haja interferência na realidade. Martins, Mello e Turrioni (2014) caracterizam um sistema como um grupo de componentes ou processos que possuem interação, recebendo entradas e gerando resultados para algum propósito.

5.2 Metodologia de suporte a decisão passo a passo

A metodologia adotada nesse trabalho busca dar suporte a decisão de configurar sistemas híbridos biogás-FV para GD no Brasil. Para tal, é utilizada a programação multiobjetivo em conjunto com um leque de ferramentas e técnicas. O passo a passo para construção da metodologia proposta é descrito na Figura 34.

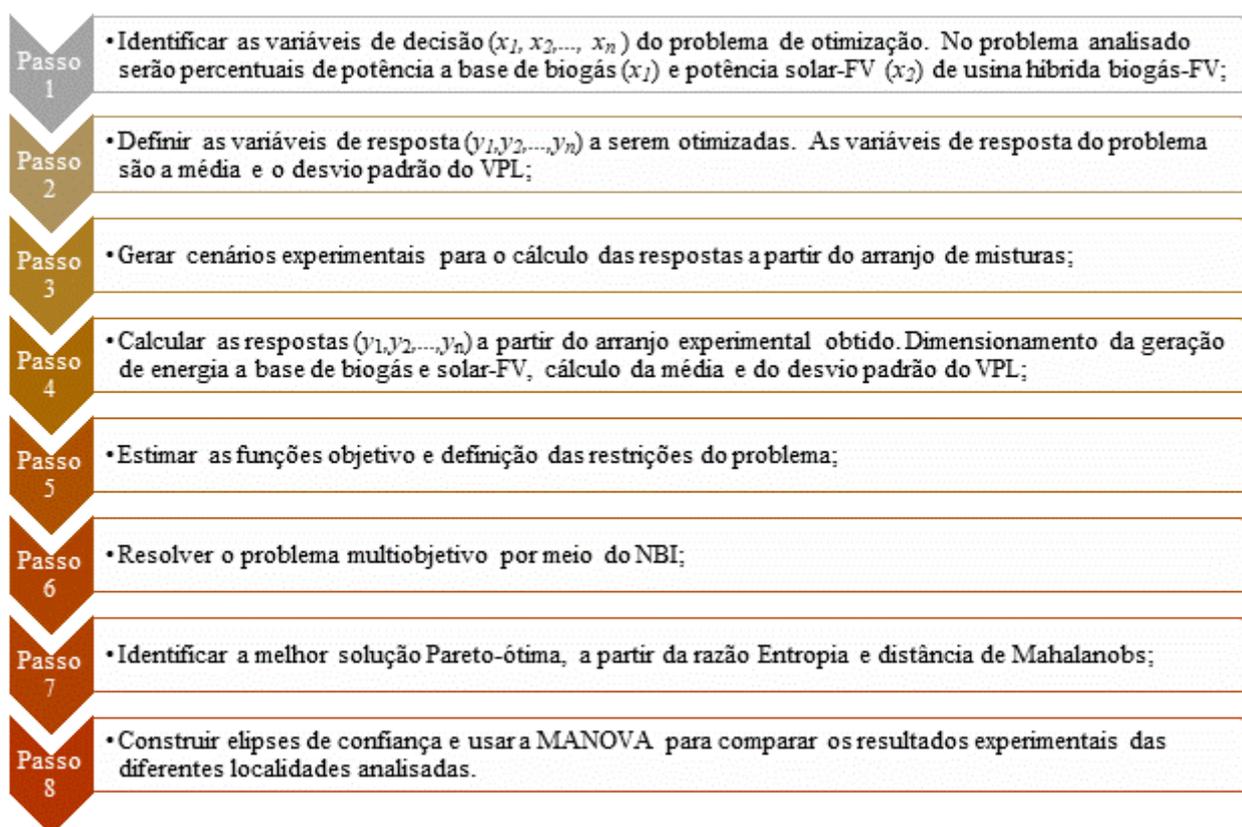


Figura 34. Passo a passo da construção da metodologia.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023).

Seguindo o passo a passo descritos, o Capítulo 6 é dedicado a divulgar os resultados obtidos iniciando pelos valores de média e desvio padrão do VPL encontrados para cada experimento em cada uma das cidades avaliadas (Uberlândia - MG, Agudos - SP e Toledo – PR).

6 RESULTADOS

6.1 Passos do 1 ao 3

Na Capitulo 4 foram descritas as variáveis de decisão do problema, sendo o percentual da fonte de biogás (x_1) e o percentual da fonte solar FV (x_2), as variáveis que compõem um sistema híbrido (Passo 1). Posteriormente foi especificada a construção do modelo de simulação para obter as variáveis de resposta média (y_1) e desvio padrão (y_2) do VPL (Passo 2). Por meio do arranjo experimental foram definidas as frações biogás-solar FV simuladas (Passo 3). Nas próximas subseções os passos de 4 a 8 serão detalhados, como resultados da pesquisa desenvolvida.

6.2 Definição das funções objetivo

Os resultados obtidos de média (y_1) e desvio padrão (y_2) do VPL para cada cidade, utilizando o modelo de simulação de sistema híbrido biogás-FV desenvolvido e obedecendo o planejamento de experimentos (Passo 4), estão detalhados na Tabela 16.

Tabela 16. Resultado de média e desvio padrão do VPL por cidade (em mil R\$).

Fração Biogás	Fração Solar FV	Uberlândia - MG		Agudos - SP		Toledo - PR	
		M. VPL	D.P. VPL	M. VPL	D.P. VPL	M. VPL	D.P. VPL
75kW	0kW	916,68	58,70	893,68	60,67	634,89	49,51
60kW	15kW	769,00	52,32	740,74	54,78	507,38	42,88
45kW	30kW	596,26	44,56	563,12	45,50	358,26	36,42
30kW	45kW	407,46	36,92	368,67	37,32	191,79	29,43
15kW	60kW	281,21	30,00	235,41	30,66	79,73	24,10
0kW	75kW	528,00	24,15	475,77	24,30	344,94	18,36
37,5kW	37,5kW	493,36	40,25	456,41	42,13	266,89	33,06
56,25kW	18,75kW	725,72	51,01	696,67	52,40	467,66	41,37
18,75kW	56,25kW	304,93	31,33	261,02	32,12	101,06	25,23

Apesar de ter sido desenvolvido os passos de 1 a 4 até o momento, já é possível destacar alguns pontos observados antes da definição das funções objetivo (Passo 5). Ao analisar os dados entre a média e o desvio padrão do VPL identifica-se um *trade-off* independente da cidade, onde frações mais elevadas de biogás, na maioria dos cenários, melhoram a média do VPL, por outro lado frações maiores da fonte solar FV reduzem o desvio padrão do VPL, melhorando o risco.

Além disso, as cidades Uberlândia e Agudos apresentam valores próximos de média e desvio padrão, enquanto Toledo mostra valores inferiores. Mesmo considerando diversas possibilidades de combinação de sistema biogás-solar FV e também cenários puros com 100% biogás ou 100% solar FV, nenhuma combinação experimentada apresentou resultados de VPL abaixo de zero.

No presente trabalho, a utilização do delineamento de experimentos proporcionou aprendizado sobre o sistema analisado, permitindo a obtenção de dados para modelar o seu comportamento (MONTGOMERY, 2009). Nesse sentido, os valores das variáveis de resposta obtidos foram usados para definir as funções objetivo, por meio de regressão utilizando o *software Minitab®*. As equações com as funções objetivo e os valores de R^2 e R^2 (adj) por cidade estão detalhados na Tabela 17 e 18, destaca-se que as variáveis de entrada x_1 e x_2 são as frações de biogás e solar FV no sistema híbrido. As funções objetivo foram estimadas a partir de regressão linear, cujo modelo é representado pela Eq. (4).

Tabela 17. Função objetivo para y_1 em cada cidade.

Cidade	R^2 - R^2 (adj)	y_1 - Média VPL
Uberlândia – MG	88,34% - 84,46%	$989,79x_1 + 426,44x_2 - 947,66x_1x_2$ (67)
Agudos – SP	89,13% - 85,50%	$966,78x_1 + 374,16x_2 - 942,24x_1x_2$ (68)
Toledo – PR	84,84% - 79,78%	$706,03x_1 + 243,53x_2 - 926,60x_1x_2$ (69)

Tabela 18. Função objetivo para y_2 em cada cidade.

Cidade	R^2 - R^2 (adj)	y_2 - Desvio Padrão VPL
Uberlândia – MG	99,70% - 99,60%	$59,51x_1 + 23,56x_2 - 3,18x_1x_2$ (70)
Agudos – SP	99,62% - 99,50%	$61,66x_1 + 23,71x_2 - 2,99x_1x_2$ (71)
Toledo – PR	99,94% - 99,93%	$49,71x_1 + 18,26x_2 - 3,86x_1x_2$ (72)

O R^2 representa a quantidade de variabilidade nos dados explicada ou contabilizada pelo modelo de regressão (MONTGOMERY e RUNGER, 2011). Quanto mais próximo R^2 for de 100%, melhor é o ajuste do modelo de regressão (funções objetivo) aos dados. Deste modo, pode-se afirmar que as funções objetivo para y_1 e y_2 modeladas pela regressão, representam um bom ajuste aos dados, uma vez que os valores de R^2 e R^2 (adj) apresentam ajuste acima de 79% para y_1 e acima de 99% para y_2 .

6.3 Construção da fronteira de Pareto por meio do NBI e obtenção da solução Pareto-ótima

Após a definição das funções objetivo para as três cidades analisadas, utilizando o NBI é construída a construída fronteira de Pareto, com todas as soluções Pareto-ótimas (Passo 6). Para tal, é elaborada a matriz *pay-off* (Eq. 8) de cada cidade a partir dos valores de utopia e pseudo-nadir de cada função objetivo. Além disso, os pesos atribuídos às funções objetivo para construção da fronteira variam com incremento de 0,05. Posteriormente, o problema de otimização multi-objetivo é resolvido pelo método do NBI, conforme apresentado na Eq. (7), permitindo a obtenção de um conjunto de soluções Pareto-ótimas distribuída em uma fronteira equiespaçada.

Em seguida, foi calculada a razão da entropia (Eq. 10) relacionada aos pesos (w_i) atribuídos às funções objetivo e a distância de Mahalanobis (Eq. 13), possibilitando a definição da melhor solução Pareto-ótima em cada uma das cidades analisadas (Passo 7). As Figuras 35, 36 e 37 mostram os resultados obtidos.

A escolha da entropia atrelada aos pesos da função objetivo permite a obtenção de um equilíbrio entre risco e retorno no ponto de ótimo. Além disso, como existem um *trade-off* entre as variáveis de resposta, a utilização da entropia também irá resultar na diversificação das fontes biogás-solar FV, contribuindo para diversificação da matriz elétrica brasileira. Quanto a distância de Mahalanobis, é um indicador de classificação que busca minimizar a distância ente o ponto e a média dos dados, quanto mais próximo da média menor a variabilidade e maior a probabilidade de ocorrência de um cenário.

A relação entropia e distância de Mahalanobis resulta em um indicador onde a maximização da entropia e a minimização da distância de Mahalanobis apontarão a melhor solução Pareto-ótima. Observa-se que pela relação matemática criada pelos dois indicadores selecionados o índice (entropia/Mahalanobis) resultante deve ser maximizado, ou seja, a escolha do melhor ponto de ótimo da fronteira será obtido pelo maior valor entropia/Mahalanobis.

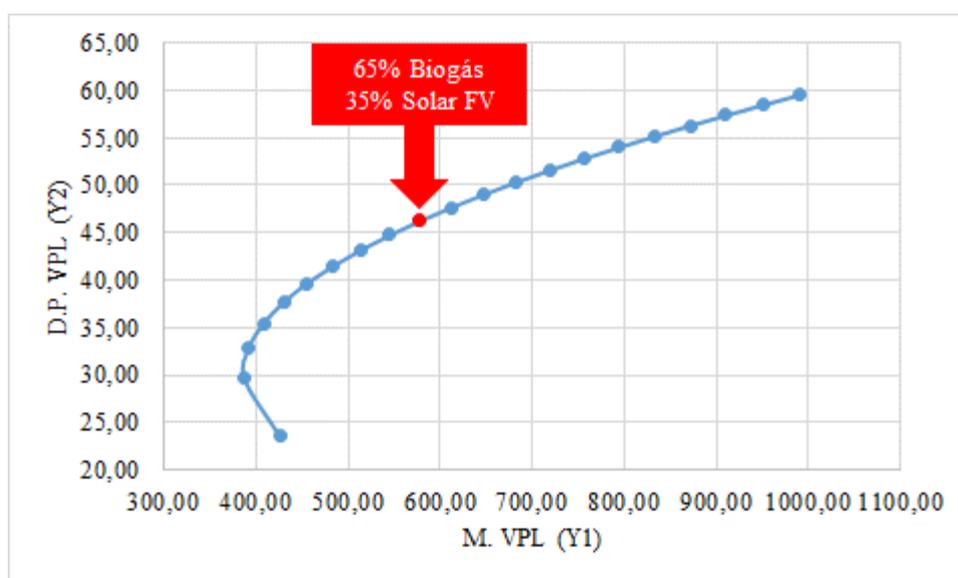


Figura 35. Melhor ótimo Uberlândia – MG (em mil R\$).

A seleção do melhor ponto ótimo na fronteira de Pareto, mostra que o modelo é capaz identificar a potência instalada para a fonte a base de biogás e para a fonte solar-FV, obtendo a configuração ótima para o sistema híbrido para cada cidade avaliada. Embora os percentuais definidos sejam próximos, não são idênticos, e os valores de y_1 e y_2 são bastante distintos entre as cidades, o que destaca algumas vantagens relacionadas às características de cada local e também a diferença de incentivos de um estado para outro.

Em Uberlândia-MG, a configuração ótima indica que o sistema híbrido deve ter 65,11% da potência instalada oriunda do biogás, sendo complementada com 34,89% pela fonte solar FV, isso equivale a aproximadamente 49kW de biogás e 26kW solar FV. No ponto ótimo, os valores de y_1 e y_2 são respectivamente iguais a 577.976,44 e 46.241,28.

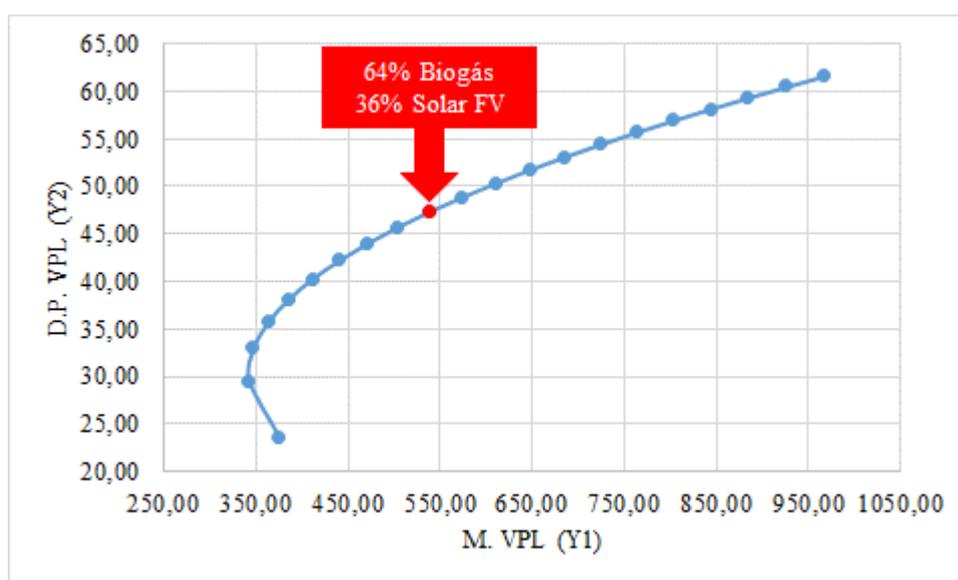


Figura 36. Melhor ótimo Agudos – SP (em mil R\$).

No caso de Agudos-SP, a configuração ótima indica uma relação biogás-solar FV de 64,18% e 35,82%, equivalendo em potência instalada a cerca de 48kW e 37kW respectivamente. Além disso, os valores de média e desvio padrão de VPL (y_1 e y_2) representam 537.898,31 e 47.377,17, na configuração ótima do sistema híbrido.

Deste modo, ao compararmos os resultados obtidos entre as cidades de Uberlândia e Agudos é possível destacar que Uberlândia apresenta média de VPL superior e desvio padrão de VPL inferior a Agudos, isso significa que, no ponto de ótimo, o projeto realizado em Uberlândia apresentaria maior retorno e menor risco do que o mesmo projeto na cidade de Agudos.

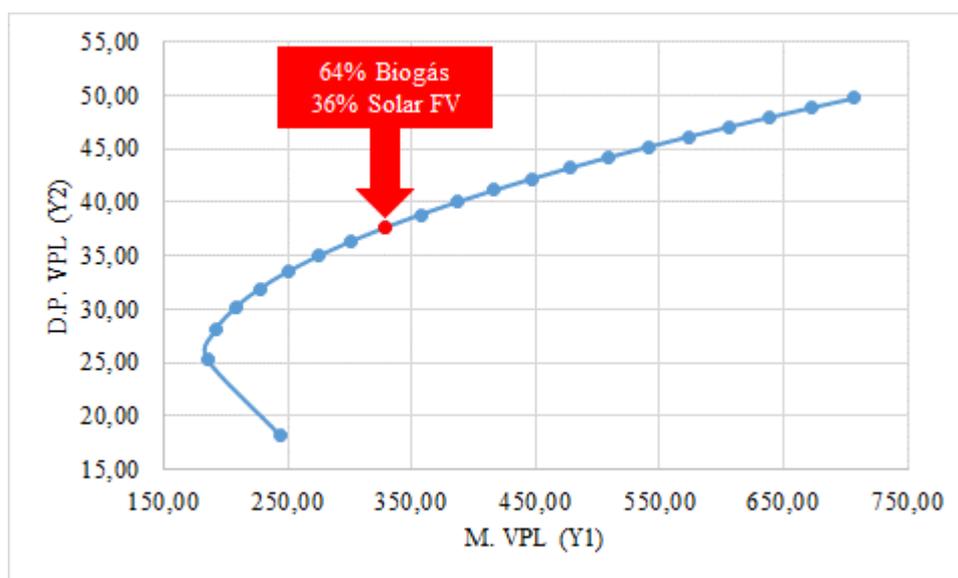


Figura 37. Melhor ótimo Toledo – PR (em mil R\$).

Os resultados de Toledo-PR, apontam o ponto de ótimo com 64,38% da fonte de biogás e 35,62% de solar FV, ou seja, potência instalada biogás-solar FV de 48kW e 27kW. Embora a configuração ótima em Toledo seja parecida com a encontrada nas outras duas cidades, os resultados de y_1 e y_2 , no ponto de ótimo, apresentam as maiores diferenças. Os valores de média e desvio padrão do VPL são 328.786,67 e 37.622,07. Neste caso, quando comparada às outras cidades a simulação do projeto em Toledo, possui o menor risco, porém também possui o menor retorno.

As diferenças encontradas entre os resultados, se originam de três principais fatores: (1) tarifa de energia elétrica executada pelas concessionárias que atendem cada uma das cidades analisadas; (2) irradiação solar em cada localidade; e (3) isenção de ICMS de cada estado.

Deste modo, ao analisar o primeiro fator, vale destacar que quanto maior for a tarifa executada pelas concessionárias maior será a economia na conta de energia elétrica e por consequência melhor os resultados no fluxo de caixa. A maior tarifa é executada pela CPFL-Paulista em Agudos-SP, cujo valor é de 661,92 R\$/MWh, seguida da CEMIG concessionária que atende Uberlândia e todo estado de Minas Gerais (653,13 R\$/MWh) e a tarifa mais baixa executada pela COPEL que atende Toledo-PR (569,74 R\$/MWh).

Outro ponto importante é a irradiação solar, pelo fato do Brasil ser um país com grande extensão territorial, apresenta variações consideráveis na irradiação. Neste caso, a média de

irradiação solar em cada cidade, dada em kWh/m², foi: 5,44 em Uberlândia, 5,15 em Agudos e 4,93 em Toledo. Como a irradiação solar está diretamente ligada com a produção de energia FV, cidades com maior irradiação ganham em viabilidade na fração solar FV do sistema híbrido.

O incentivo de ICMS por estado tem impacto relevante nos resultados obtidos, o estado do Paraná oferece aos investidores isenção de metade do ICMS (9%) apenas nos quatro primeiros anos de projeto, sendo o menor incentivo comparado aos outros dois casos analisados. Em São Paulo, há a isenção de metade do ICMS (9%), mas durante todo o ciclo de vida do projeto. No caso de Minas Gerais a isenção de ICMS foi prorrogada por mais 10 anos (2032). No entanto a partir de 2029 haverá uma redução de 20% ano no benefício conforme previsto no Convênio ICMS-68/2022. Dessa forma, os benefícios de ICMS de 18% anteriormente projetados por todo o ciclo de vida do projeto, foram reduzidos para 18% nos primeiros 6 anos e do sexto ano em diante uma redução de 20% ao ano representando valores de 14,4%, 10,8%, 7,2% até 3,6% no décimo ano.

Mesmo com a alteração da isenção do ICMS em Minas Gerais, ainda é o estado que possui o maior incentivo, seguido de São Paulo e Paraná. A isenção de ICMS impacta de forma expressiva nos resultados obtidos haja visto a diferença entre os resultados de Uberlândia e Agudos para Toledo. Como forma de demonstrar a relevância de políticas de incentivos fiscais, em alguns arranjos experimentais simulados em Toledo, quando é considerado apenas o VPL inerente a produção de energia elétrica, os valores são menores do que zero.

Bernardes et al. (2022), destacam em seus resultados a importância de incrementos na isenção de ICMS, para prosumidores, fabricantes de tecnologias para FER e oferta de isenção de ICMS para as modalidades geração compartilhada e múltiplas unidades consumidoras.

Complementando as análises, os percentuais obtidos de biogás-solar FV na configuração ótima do sistema nas três cidades, mostra uma maior concentração de capacidade instalada na fonte de biogás, aproximadamente 65%, possibilitando maior segurança ao sistema em termos de fornecimento contínuo de energia elétrica. Devido a capacidade de armazenamento do biogás há redução de intermitência oriunda da fonte solar FV que nesse caso representa está reduzida à aproximadamente 35% da capacidade instalada do sistema.

Além disso, a Tabela 19 detalha os pesos utilizados nas funções objetivo (y_1 e y_2) na melhor solução Pareto-ótima em cada cidade e a relação y_1/y_2 que permite ordenar as cidades

de acordo com a relação retorno e risco. Nesse sentido, em Uberlândia e Agudos a configuração ótima se situa em um ponto da fronteira onde os pesos para maximizar y_1 são de 45% e para minimizar y_2 55%. Já em Toledo os pesos no ponto de melhor ótimo são de 40% para y_1 e 60% para y_2 . A partir dos resultados da Tabela 19 também é possível concluir que a melhor relação retorno e risco é apresentada por Uberlândia - MG, seguida de Agudos - SP e Toledo - PR.

Tabela 19. Peso das funções objetivo no ponto de configuração ótima do sistema híbrido.

Cidades	w1	w2	y1	y2	y1/ y2
Uberlândia – MG	45%	55%	577,98	46,24	12,49
Agudos – SP	45%	55%	537,90	47,38	11,35
Toledo – PR	40%	60%	328,79	37,62	8,74

Embora não tenha sido utilizada como uma variável de resposta, a área ocupada pelo sistema é outro ponto importante a ser discutido. Quando simulado o sistema apenas a base de biogás para geração de energia elétrica a área ocupada é de 751,15 m², igual para os três cenários analisados. Considerando a configuração híbrida, no ponto de ótimo selecionado, a área ocupada reduz para 651,40 m² em Uberlândia, 647,58 m² em Agudos e 648,85 m² em Toledo, com as placas FV instaladas no solo, conforme utilizado nas simulações deste estudo.

No entanto, caso o empreendimento possua estruturas que suportem as placas-FV, a área ocupada pelo sistema pode ser ainda menor, representada por valores de 526,79 m², 520,79 m², 522,06 m², para as cidades de Uberlândia, Agudos e Toledo respectivamente. Representando uma economia de área utilizada na ordem de 100m², para o sistema instalado no solo, e de aproximadamente 230 m² para instalação em telhados ou coberturas que suporte o peso das placas FV, a redução da área ocupada, mantendo a mesma produção de energia é uma das vantagens da utilização do sistema híbrido biogás-solar FV e representa uma economia valiosa para os produtores, pelo fato de muitas vezes serem utilizadas áreas nobres da propriedade rural, ou até mesmo reduzindo o custo de aluguel das terras quando o produtor arrenda o terreno.

O projeto do sistema híbrido também contribuí para a redução de GEE, nos três cenários avaliados Uberlândia, Agudos e Toledo a estimativa das emissões reduzidas no ponto de ótimo, descontadas para a data zero, foram em média de 648,79 tCO₂/MWh, 636,20 tCO₂/MWh e

632,71 tCO₂/MWh respectivamente. As emissões reduzidas de CO₂ contribuem com as agendas climáticas que têm chamado a atenção de países no mundo todo.

Neste trabalho, para que as reduções de GEE fossem precificadas, foi considerada a comercialização dos créditos de carbono no mercado voluntário, dessa forma cada tonelada de CO₂ evitada é considerado 1 crédito de carbono, o VPL obtido por meio do crédito de carbono, no ponto de ótimo, considerando a média dos valores, é de 297.444,16 (Uberlândia), 291.670,70 (Agudos) e 290.072,98 (Toledo). Os incrementos de VPL possibilitados pela comercialização de crédito de carbono é bastante significativo na viabilidade dos projetos, mas o mercado de crédito de carbono ainda é pouco desenvolvido no Brasil, fazendo que o reconhecimento da redução de GEE venha do mercado voluntário, criado a partir do Protocolo de Kyoto, onde são mais atuantes países da Europa e o Japão. Atualmente, no Brasil, está em discussão o Projeto de Lei 412/2022, que busca criar um mercado regulado de redução de emissões de CO₂ (SENADO, 2022).

Da mesma forma, os incentivos financeiros são relevantes para aumentar a viabilidade do projeto, considerando o VPL da geração de energia no ponto de ótimo para as três localidades, com e sem linha de financiamento subsidiada, obtém-se os resultados detalhados na Tabela 20.

Tabela 20. Resultado de VPL com e sem financiamento.

Cidades	VPL com financiamento	VPL sem financiamento
Uberlândia – MG	412.354,42	265.535,75
Agudos – SP	376.729,21	230.132,47
Toledo – PR	155.513,50	8.869,78

Os resultados mostram que há uma redução considerável no VPL dos projetos quando não é utilizada a linhas de financiamento subsidiada do governo. O incentivo financeiro ainda se mostra mais relevante na avaliação do projeto do sistema híbrido em Toledo, onde os incentivos fiscais são menores. Face ao exposto, identifica-se a necessidade de moldar uma política de incentivo financeiro de acordo com a região, compensando a diferença entre os incentivos fiscais e tornando os investimentos em determinados locais mais atrativos, além de contribuir para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva de relacionada as tecnologias renováveis em uma região específica.

Na Figura 38 estão plotadas as fronteiras de Pareto das três cidades avaliadas, possibilitando uma análise conjunta dos resultados de ótimo em cada experimento realizado. Percebe-se uma equivalência de resultados obtidos em Uberlândia e Agudos, pois as fronteiras quase se sobrepõem, no entanto quando se analisa a fronteira de Toledo os valores se mostram inferiores tanto em relação à média do VPL, quanto em relação ao desvio padrão do VPL.

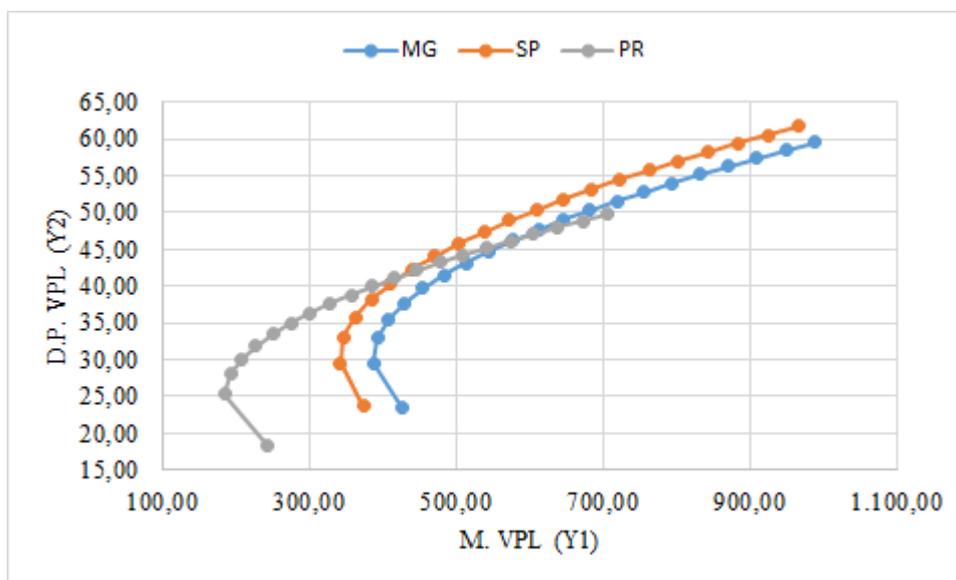


Figura 38. Fronteiras de Pareto das três cidades analisadas.

O modelo criado para otimizar a configuração de sistemas híbridos biogás-solar FV, pode auxiliar no planejamento de novas granjas de suínos e em granjas já existentes que pretendem se expandir, mesmo que em alguns casos sejam criados projetos denominados falsos híbridos, projetos que não utilizam a mesma entrada para injetar a energia na rede (EPE, 2018).

Ao planejar desde o início a adoção da FER híbrida biogás-solar FV na constituição de uma nova granja de suínos, é possível definir o número de animais necessário para que os dejetos produzidos sejam adequados para suprir a produção de biogás no ponto ótimo, obter a produção de energia pela fonte solar FV e melhorar a viabilidade do investimento no geral. Em granjas já existentes seria difícil a adequação do número de animais à demanda do biodigestor no ponto ótimo, entretanto, em um momento de expansão da granja a adequação pode ser realizada evitando que os volume de dejetos excedentes tenham outro tipo de tratamento como destino.

Também é importante ressaltar que para algumas granjas de pequeno porte o investimento apenas na produção de biogás não seria viável. Uma vez que o volume de dejetos produzidos não atenderia a demanda mínima necessária para viabilizar o projeto. Nesse sentido a Tabela 21 mostra a simulação do ponto de equilíbrio (PE), utilizando apenas a fonte de biogás nas três cidades analisada. São obtidos valores mínimos de capacidade instalada e número mínimo de animais no plantel de granjas de ciclo completo, considerando apenas os resultados de VPL inerentes a economia de energia elétrica.

Tabela 21. Ponto de equilíbrio da fonte de biogás por cidade.

Cidade	Capacidade instalada	Nº de animais
Uberlândia – MG	31,61 kW	3.486
Agudos – SP	32,11 kW	3.528
Toledo – PR	42,67 kW	4.412

Face ao exposto, pequenas granjas poderiam viabilizar os investimentos nas estruturas para a produção de biogás (biodigestor, motogerador e outros), por meio da utilização do sistema híbrido, complementando a capacidade instalada necessária com a fonte solar FV. Nesse sentido, a granja desfrutaria dos benefícios do biodigestor no tratamento adequado dos resíduos (dejetos) de suínos, evitando poluição hídrica, geraria economia na conta de energia elétrica e também poderia utilizar os efluentes do biodigestor como biofertilizante, vantagem não considerada nas análises deste trabalho.

6.4 Construção de elipses de confiança e MANOVA

Visando analisar os resultados obtidos pela ótica estatística, foram construídas elipses de confiança utilizando os dados das variáveis de resposta. Foi realizada a construção das elipses para os dados (Eq. 31) e para a média dos dados (Eq. 32), considerando 95% de confiança, p bidimensional e n igual a 9 (número de experimentos simulados em cada cidade). A Figura 39 ilustra as elipses de confiança para os dados e para a média dos dados, nas situações onde são plotados os dados e a fronteira de Pareto com a solução Pareto-ótima obtida.

A distância de Mahalanobis utilizada para escolha do melhor ponto de ótimo, é um indicador de classificação que busca minimizar a distância ente o ponto e a média dos dados. Nesse sentido, analisando os gráficos fica claro a proximidade do ponto de ótimo para o ponto central da elipse (média). Além disso, quanto maior a proximidade do centro, menor a variabilidade e maior a probabilidade de ocorrência.

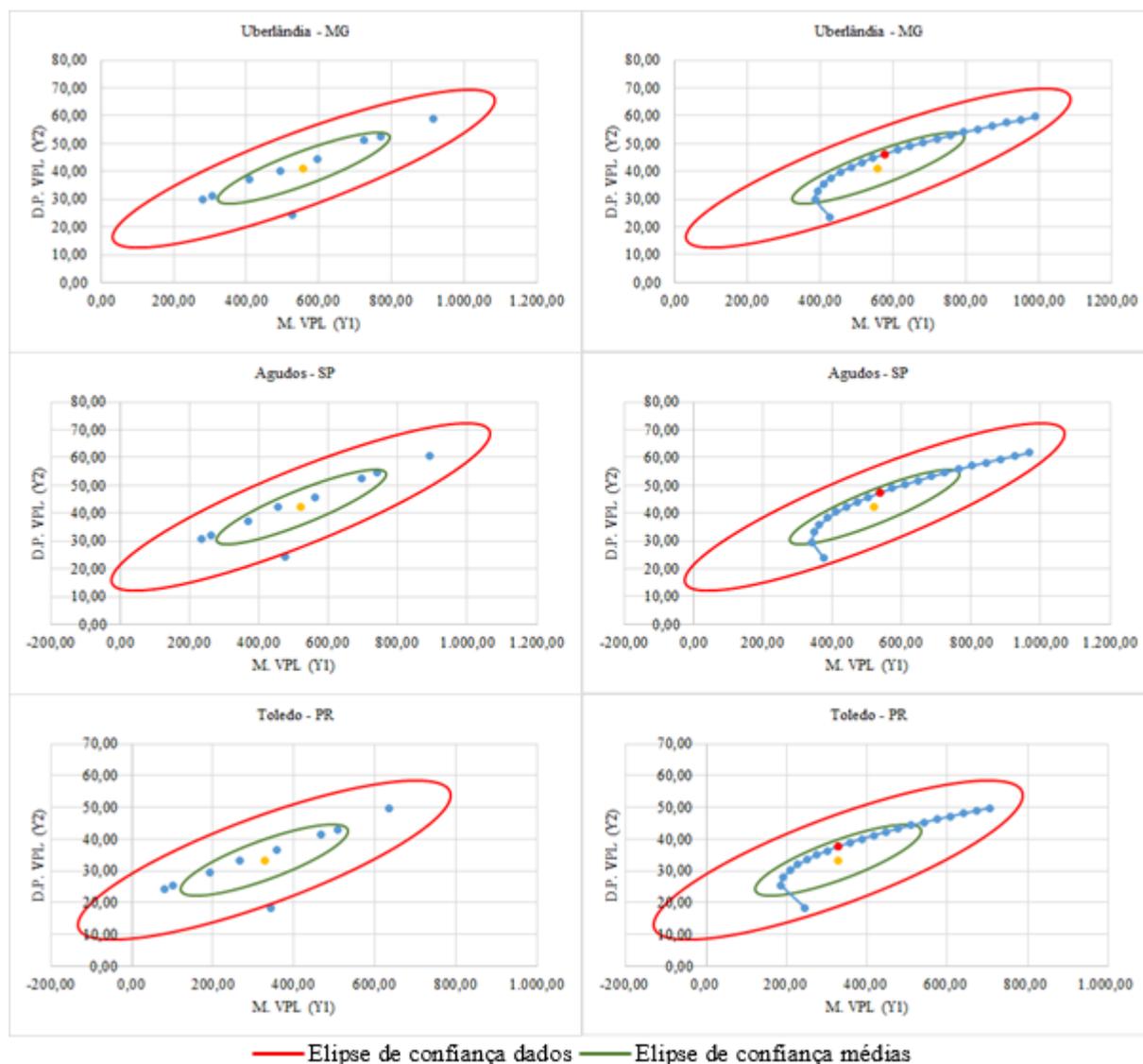


Figura 39. Elipses de confiança para dados e médias (em mil R\$).

Para confrontar os resultados entre as cidades, considerando todo o conjunto de dados obtidos, são avaliados os intervalos de confiança simultâneos, utilizando as elipses de confiança para as médias (*shadows ellipses*) e os intervalos de confiança simultâneos de Bonferroni,

considerados mais precisos (JOHNSON e WICHERN, 2007). A Figura 40 mostra os intervalos simultâneos para as três cidades avaliadas e a comparação entre os intervalos de confiança das três localidades.

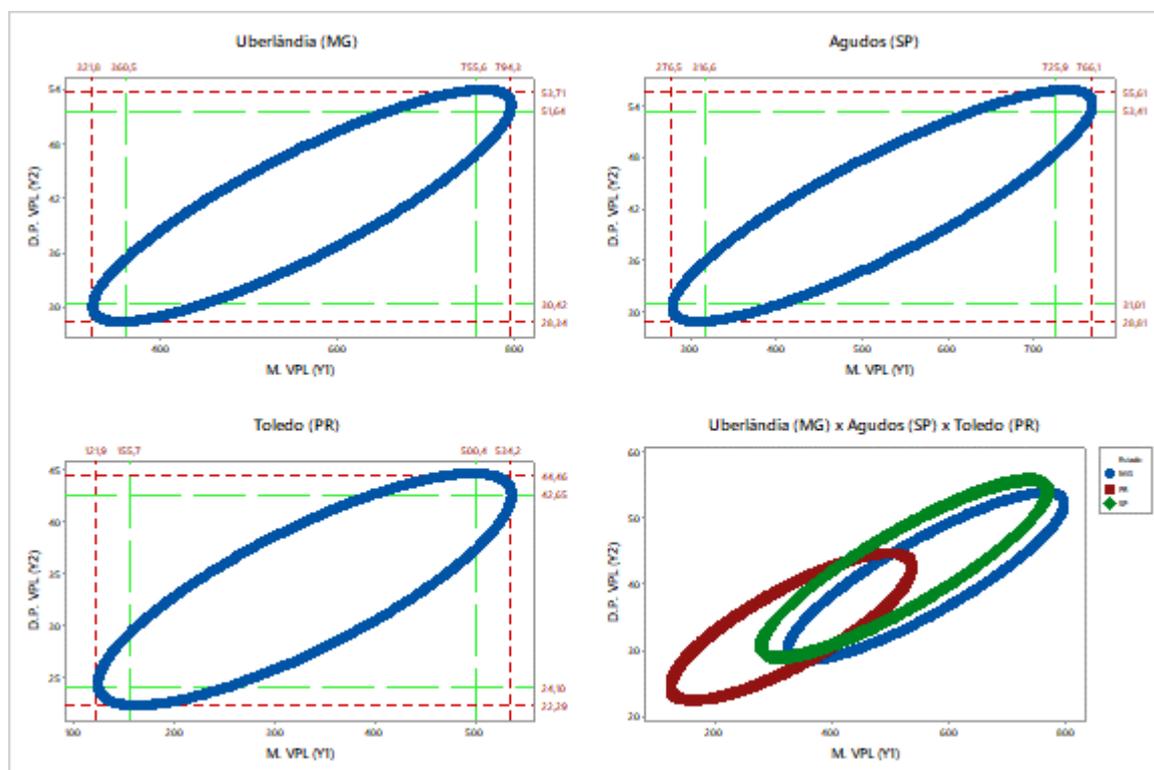


Figura 40. Shadows e Bonferroni (em mil R\$).

A partir dos gráficos é possível afirmar que as elipses de médias se sobrepõem, ou seja, quando é avaliado o conjunto de dados obtidos a partir dos experimentos em cada uma das cidades e confrontamos por meio das elipses de confiança de médias os dados não apresentam diferença estatística significativa. Mesmo analisando os intervalos simultâneos de Bonferroni os valores de limites inferiores das elipses de Uberlândia e Agudos se entrelaçam com os valores superiores obtidos em Toledo, a Tabela 22 apresenta os limites *Shadows* e Bonferroni.

Tabela 22. Limites dos intervalos de confiança simultâneos *Shadows* e Bonferroni (em mil R\$).

Cidades	<i>Shadows</i>				Bonferroni			
	Limite Superior		Limite Inferior		Limite Superior		Limite Inferior	
	M.	D.P.	M.	D.P.	M.	D.P.	M.	D.P.
Uberlândia - MG	794,33	53,71	321,80	28,34	755,62	51,63	360,51	30,42
Agudos - SP	766,05	55,60	276,50	28,81	725,95	53,41	316,61	31,01
Toledo - PR	534,18	44,46	121,95	22,29	500,41	42,64	155,72	24,10

Complementando as análises, foi utilizada a MANOVA com teste comparativo ente as médias das três cidades avaliadas. A Tabela 23 detalha os resultados encontrados pelos critérios estatísticos de Wilks, Lawley-Hotelling e Pillai. O teste de Roy não foi utilizado, pois os vetores de médias não são colineares (RENCHER, 2002).

Tabela 23. Resultados MANOVA.

Estatística de teste	<i>F-value</i>	<i>p-value</i>
Wilks	1,772	0,151
Lawley-Hotelling	1,774	0,151
Pillai	1,763	0,152

Neste caso, o resultado para o três teste utilizado na MANOVA são convergentes e possuem *p-values* muito próximos. Os valores de *p-value* > 0,05 e *F-value* < 1,96, mostram que não há diferença estatística significativa ao comparar os resultados de média e desvio padrão do VPL das cidades de Uberlândia - MG, Agudos - SP e Toledo - PR. Dessa forma, os resultados das análises obtidas pelas elipses de confiança e pela MANOVA são iguais.

Por meio do gráfico das elipses observa-se que as elipses de médias de Uberlândia e Agudos estão quase sobrepostas, mostrando uma proximidade grande entre os resultados. Nesse sentido, todos os resultados de configuração do sistema híbrido analisado e suas variações inerente as incertezas presentes na geração a base de biogás e solar FV, apresentam resultados muito próximos e não apresentam diferença estatística significativa.

Quando comparada as elipses de Uberlândia e Agudos com Toledo observa-se que as elipses se confundem e criam uma intersecção. Percebe-se que na intersecção que os projetos em Uberlândia e Agudos tendem a apresentar uma configuração de sistema híbrido com frações

maiores de solar FV, já no caso de Toledo, no intervalo elíptico comum as três cidades, a configuração do sistema híbrido apresenta a tendência de possuir maiores frações de biogás.

Considerando que projetos reais de sistemas híbridos biogás-solar FV podem apresentar todas as configurações ótimas na fronteira de Pareto, e até configurações que não estejam na fronteira de soluções ótimas, conforme observado nas elipses, pode se afirmar que os resultados obtidos são possíveis e como os projetos híbridos em Uberlândia, Agudos e Toledo podem apresentar casos de média e desvio padrão do VPL semelhantes, não se pode concluir que, dentre as três cidades analisada uma se sobrepõe em relação as outras para se realizar esse tipo de investimento. As análises de elipses de confiança e MANOVA reforçam os resultados de que não há diferença estatística significativa entre os resultados dos projetos realizados nas três cidades.

7 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo definir a configuração ótima para o sistema híbrido biogás-solar FV e compara os resultados obtidos por meio de elipses de confiança e da MANOVA, considerando o esquema *net-metering*, a geração de energia pelas fontes biogás e solar FV, complementado pelo incentivo fiscal de isenção de ICMS, incentivo financeiro e a venda de créditos de carbono sob diferentes circunstâncias impostas em três cidades brasileiras.

Para tanto, foram definidas como variáveis de decisão a capacidade instalada a base de biogás (x_1) e solar FV (x_2). Em seguida, o dimensionamento preciso da energia produzida por ambas as fontes com a adição de incertezas, traduzido em um modelo, foi fundamental para garantir um resultado de viabilidade confiável. O delineamento de experimentos foi utilizado para definir os percentuais biogás-solar FV simulados no modelo para obter as variáveis de resposta média (y_1) e desvio padrão (y_2) do VPL e para obter as funções objetivo. Adotou-se o NBI para construir a fronteira de Pareto e a solução Pareto-ótima foi selecionada pelo indicador entropia/Mahalanobis. Os dados resultantes do modelo também foram avaliados pela ótica estatística, utilizando elipses de confiança e a MANOVA.

Ao definir a composição ótima do sistema híbrido biogás-solar FV, no ponto de ótimo a relação risco retorno do investimento em Uberlândia se mostrou melhor do que nas outras localidades. Os principais fatores responsáveis pelas diferenças encontradas de média e desvio padrão do VPL entre as cidades avaliadas são: (1) preço da tarifa de energia elétrica; (2) irradiação solar; e (3) isenção de ICMS.

Observa-se no ponto de ótimo que as localidades com maior incentivo fiscal como Uberlândia - MG e Agudos - SP, apresentam maiores valores de VPL, e conseqüentemente uma melhor relação risco retorno, do que em Toledo - PR. Em Uberlândia - MG onde as tarifas locais são elevadas, e a isenção de 100% do ICMS se concentra no início do fluxo de caixa, os valores de VPL são maiores. Por sua vez, em Toledo - PR observa-se que o menor nível de isenção de ICMS não oferece tantos incentivos aos novos prosumidores para GD, visto que há uma considerável chance de inviabilidade do investimento e médias negativas de retorno quando não há suporte de financiamento e não são considerados os resultados de venda do crédito de carbono. No caso de Toledo - PR, incrementos na oferta da isenção de ICMS podem ser uma alternativa para alavancar o número de prosumidores em GD. Sabendo que o estado do

Paraná é um dos principais polos de criação de suínos no Brasil, se trata de uma alternativa válida de ser analisada. Em Agudos - SP, condições melhores de isenção de ICMS torna o conjunto de políticas de incentivo benéfico a novos prosumidores para GD.

As linhas de financiamento subsidiadas reduzem os desembolsos com o CAPEX na data zero, sendo que o pagamento das prestações com baixa taxa de juros nas datas futuras se torna atrativa aos prosumidores, contribuindo com incrementos nos retornos e redução de risco dos projetos híbridos. No entanto, é necessário moldar uma política de incentivo financeiro de acordo com cada região, para que haja compensação em locais que possuem baixo incentivo fiscal, tornando os investimentos mais atrativos em determinadas regiões.

Os resultados obtidos também destacam que o projeto híbrido biogás-solar FV contribui para a redução de GEE, além da poluição de hídricas e outras que podem ser evitadas com o processo de biodigestão. Baseado na redução de GEE, a venda do crédito de carbono se mostrou outro mecanismo de incentivo importante para a viabilidade dos projetos híbridos. No entanto, a comercialização dos créditos de carbono é dificultada por ser realizada em mercado voluntário, devido à ausência de um mercado regulado no país.

A adoção do sistema híbrido biogás-solar FV apresenta a vantagem da redução significativa da área do sistema, quando avaliada no ponto de ótimo a fração solar FV contribui para a redução da área ocupada. Além disso, considerando o ponto de equilíbrio de projetos de GD a base de biogás de suínos é possível inferir que, para granjas de menor porte onde os dejetos produzidos não são suficientes para produção de energia elétrica o projeto pode ser complementado com a fração solar FV para obter a viabilidade e permitir que os produtores possam usufruir de outros benefícios por terem o processo de biodigestão, como o tratamento adequado dos dejetos e o biofertilizante.

É válido ressaltar que no Brasil, a isenção de ICMS não é ofertada para algumas modalidades de GD, tais como a geração compartilhada e as múltiplas unidades consumidoras, o que pode explicar o baixo número de adesão de prosumidores a esta modalidade. Estudos futuros avaliando o conjunto de potenciais políticas de incentivo para prosumidores destas modalidades são de grande valia. Além disso, uma vez que a cadeia produtiva solar FV está mais desenvolvida, a desoneração de impostos sobre a cadeia de produção de biodigestores e motogeradores, também podem ser favoráveis aos prosumidores de sistemas GD híbridos

biogás-solar FV e, portanto, estudos futuros avaliando o impacto de possíveis políticas neste sentido também são válidas.

Deve se destacar a importância de se desenvolver mais linhas de financiamento direcionadas para arranjos de GD, considerando as diferentes condições de cada região e modalidade de geração. Ainda vale destacar que no Brasil, existem projetos de lei em tramitação que reconhecem a importância de incentivos fiscais e financeiros para o desenvolvimento das tecnologias e produção de biogás como é o caso do Projeto de Lei 2193/20 (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2020).

Destaca-se também como formas de incentivo a GD a Consulta Pública 39/2023 com o objetivo de obter subsídios para inserção de sistema de armazenamento no SEB (ANEEL, 2023b) e o Projeto de Lei 412/22 (SENADO, 2023) que busca criar um regulamenta para desenvolver o mercado brasileiro de redução de emissões. Por outro lado, algumas decisões reduzem os incentivos a GD, como a Lei 14.300 (PLANALTO, 2022) e a recente mudança nos incentivos de ICMS em Minas Gerais (ABSOLAR,2023; CONFAZ, 2022).

Do ponto de vista estatístico, quando analisado por meio de elipses de confiança o conjunto de dados obtidos das variáveis de resposta, contemplando todas as configurações do sistema híbrido biogás-solar FV e as simulações nas variáveis de incerteza para as três cidades, conclui-se que as elipses de confiança para as médias se sobrepõem e os intervalos de confiança simultâneos *Shadows* e Bonferroni, bem como a MANOVA mostram que não há diferença significativa dos resultados do sistema híbrido entre as cidades.

Deste modo, considerando todas as possibilidades de projetos híbridos nas três cidades avaliadas, identifica-se uma intersecção entre as elipses de médias, onde projetos com maior fração da fonte solar FV nas cidades de Uberlândia e Agudos, apresentam média e desvio padrão do VPL próximos a projetos com maior fração da fonte de biogás em Toledo, como existem projetos híbridos com resultados iguais nas três localidades não pode-se afirmar que há diferença significativa.

Dentre outras sugestões de trabalho futuro, vale mencionar a necessidade de avaliações econômicas mais completas com enfoque em outros atributos do biogás, como o aproveitamento do calor gerado na queima do biogás e a produção de biofertilizantes. Estes dois produtos podem ser considerados oportunidades de receitas adicionais ao prosumidor que investe em um sistema híbrido biogás-solar FV. Sugere-se também a investigações relacionadas

as mudanças recentes no incentivo fiscal de Minas Gerais e qual o impacto desta mudança para a GD no estado. A partir deste estudo, outros sistemas híbridos que utilizem a fonte de biogás poderiam ser investigados, como por exemplo biogás-solar FV-bateria. Além disso, as análises realizadas neste estudo, podem ser replicadas para outros tipos de substratos para produção de biogás, tais como: resíduos da agricultura, pecuária e agroindústria; resíduos sólidos urbanos; projetos de codigestão, que se trata da combinação de mais de um tipo de resíduo orgânico.

Próximos trabalhos poderiam abordar o problema com outras variáveis de resposta, dentre elas podem ser citadas área ocupada pelo sistema híbrido e medidas de produtividade. A partir do modelo bivariado desenvolvido neste estudo, sugere-se a criação de outros modelos com três ou mais variáveis de resposta. Em relação a obtenção da solução pareto-ótima, destaca-se que este trabalho utilizou a relação entropia/Mahalanobis devido a necessidade de diversificação encontrada, mas outras técnicas poderiam ser empregadas para se obter e analisar novos pontos de ótimo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKADER A.; RABEH, A.; ALI, D. M.; MOHAMED, J. Multi-objective genetic algorithm based sizing optimization of a stand-alone wind/PV power supply system with enhanced battery/ supercapacitor hybrid energy storage. **Energy**, v. 163, p. 351-363, 2018.

ABDOMOULEH, Z.; ALAMMARI, R. A. M.; GASTLI, A. Review of policies encouraging energy integration & best practices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 249-262, 2015.

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Brasileira 2012**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 15 de outubro de 2022.

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **ABiogás divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro**, 2021. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>>

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **O potencial de biogás no Brasil**, 2020. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2020/11/NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf>.

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **Notícias do setor**. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/setor/>>. Acesso em: 23 de maio de 2022a.

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **Sobre nós**. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/sobre-nos/>>. Acesso em: 23 de maio de 2022b.

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Minas Gerais renova isenção de ICMS para energia solar até 2032**. <<https://www.absolar.org.br/noticia/minas-gerais-renova-isencao-de-icms-para-energia-solar-ate-2032/>>. Acesso em: 19 de outubro de 2023.

ACKERMAN, T.; ANDERSON, G.; SOLDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power system Research**, v. 57, p. 195-204, 2011.

ANDRADE, J. V. B.; RODRIGUES, B. N.; SANTOS, I. F. S.; HADDAD, J.; FILHO, G. L. T. Constitutional aspects of distributed generation policies for promoting Brazilian economic development. **Energy Policy**, v. 143, p. 111555, 2020.

ADEKUNLE, K. F.; OKOLIE, J. A. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 6, p. 205-212, 2015.

AGHAEI, J.; AMJADY, N.; SHAYANFAR, H.A. Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method. **Applied Soft Computing**, v.11, p.3846-3858, 2011.

AKULA, V. R. Wetland biomass-suitable for biogas production?, 2013.

AL-MASRI, H. M.; AL-SHARQI, A. A. Technical design and optimal energy management of a hybrid photovoltaic biogas energy system using multi-objective grey wolf optimization, **IET Renewable Power Generation**, v. 14, p. 2765-2778, 2020.

AL-MASRI, H. M.; AL-SHARQI, A. A.; MAGABLEH, S. K.; AL-SHETWI, A. Q.; ABDOLRASOL, M. G.; USTUN, T. S. Optimal Allocation of a Hybrid Photovoltaic Biogas Energy System Using Multi-Objective Feasibility Enhanced Particle Swarm Algorithm, **Sustainability**, v. 14, p. 685, 2022.

ALAMI, A. H.; RABAIA, M. K. H.; SAYED, E. T.; RAMADAN, M.; ABDELKAREEM, M. A.; ALASAD, S.; OLABI, A-G. Management of potential challenges of PV technology proliferation. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 51, p. 101942, 2022.

ALMEIDA, F. A.; LEITE, R. R.; GOMES, G. F.; GOMES, J. H. F.; PAIVA, A. P. Multivariate data quality assessment based on rotated factor scores and confidence ellipsoids. **Decision Support Systems**, v. 129, p. 113173, 2020a.

ALMEIDA, F. A.; FILHO, J. M.; AMORIM, L. F.; GOMES, J. H. D.; PAIVA, A. P. Enhancement of discriminatory power by ellipsoidal functions for substation clustering in voltage sag studies. **Electric Power Systems Research**, v. 185, p. 106368, 2020b.

ALMEIDA, F. A.; GOMES, G. F.; GAUDÊNCIO, J. H. D.; GOMES, J. H. F.; PAIVA, A. P. A new multivariate approach based on weighted factor scores and confidence ellipses to precision evaluation of textured fiber bobbins measurement system **Precision Engineering**, v. 60, p. 520–534, 2019.

ALVES, A. M. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular**. 2017. 105 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2017.

AMMARI, C.; BELATRACHE, D.; TOUHAMI, B.; MAKHLOUFIA S. Sizing, optimization, control and energy management of hybrid renewable energy system —A review. **Energy and Built Environment**, v. 3, p. 399–411, 2022.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Conexões em geração distribuída no Brasil**, 2023a. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>>. Acesso em: 23 de outubro de 2023.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Consulta Pública 39/2023**, 2023b. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p_auth=LAWaDnAF&p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_ideParticipacaoPublica=3828&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_javax.portlet.action=visualizarParticipacaoPublica>. Acesso em: 24 de outubro de 2023.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Planilha percentual Fio B**, 2023c. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_lifera/tarifa/>. Acesso em: 30 de outubro de 2023.

ANEEL. - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração - ANEEL 2021**, Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 482/2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012481.pdf>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 687/2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 786/2017**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.

APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da ciência – filosofia e prática da pesquisa**. São Paulo: Editora Pioneira Thomson Learning, 2006.

AQACHMAR, Z.; SASSI, H. B.; LAHRECH, K.; BARHDADI, A. Solar technologies for electricity production: An updated review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, p. 30790-30817, 2021.

AQUILA, G.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; JUNIOR P. R.; FONSECA, M. N. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1090-1098, 2017.

AQUILA, G.; QUEIROZ, A. R.; ROTELA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; PAMPLONA, E. O.; BALESTRASSI, P. P. Contribution for bidding of wind-photovoltaic on grid farms based on NBI-EFA-SNR method. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 40, p. 100754, 2020.

AQUILA, G.; ROCHA, L. C. S.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; ROTELA JUNIOR, P.; BALESTRASSI, P. P.; FONSECA, M. N. Proposed method for contracting of wind-photovoltaic projects connected to the Brazilian electric system using multiobjective programming. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, p. 377–389, 2018.

AYOUB, N.; YUJI, N. Governmental intervention approaches to promote renewable energies – Special emphasis on Japanese feed-in tariff. **Energy Policy**, v. 43, p. 191-201, (2012)2012.

BAMBOKELA, J. E.; BELAID, M.; MUZENDA, E.; NHUBU, T. Developing a Pilot Biogas-Solar PV System for Farming Communities in Botswana: Case of Palapye. **Procedia Computer Science**, v. 200, p. 1593–1604, 2022.

BAKKALOGLU, S.; LOWRY, D.; FISHER, R. E.; FRANCE, J. L.; BRUNNER, D.; CHEN, H.; NISBET, E. G. Quantification of methane emissions from UK biogas plants. **Waste Management**, v. 124, p. 82-93, 2021.

BARAKAT, S.; IBRAHIM, H.; ELBASET, A. A. Multi-objective optimization of grid-connected PV-wind hybrid system considering reliability, cost, and environmental aspects. **Sustainable Cities and Society**, v. 60, p. 102178, 2020.

BARIL, C.; YACOUT, S.; CLÉMENT, B. Design for Six Sigma through collaborative multiobjective optimization. **Computers & Industrial Engineering**, v. 60, n. 1, p. 43-55, 2011.

BARTHOLOMEU, M. B.; HORTENSE, T. C.; OLIVEIRA, G. T.; BARTHOLOMEU, D.; CAIXETA-FILHO, J. V. Formulação do modelo de otimização da qualidade do biogás em um biodigestor de modelo tubular: um estudo de caso no município de Conchas – SP, **Revista de Economia e Administração**, v. 6, n. 2, p. 215-235, 2007.

BEKELE, G.; TADESSE G. Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia. **Applied Energy**, v. 97, p. 5–15, 2012.

BEKELE, G.; PALM, B. Feasibility study for a standalone solar–wind-based hybrid energy system for application in Ethiopia. **Applied Energy**, v. 87, p. 487–495, 2010.

BERA, A. K.; PARK, S. Y. Optimal portfolio diversification using the maximum entropy principle, **Econom. Rev.**, v. 27, p. 484-512, 2008.

BERHORST, N. L. **Avaliação de retorno financeiro de um biodigestor com características pré-estabelecidas para dejetos suínos**. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de concentração em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Universität Stuttgart, Alemanha e SENAI-PR, Curitiba -PR, 114 p., 2018.

BERNARDES, P. A. C. S.; AQUILA, G.; PAMPLONA, E. O.; ROCHA, L. C. S.; ROTELA JUNIOR, P. 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.

BERTRAND, J, FRANSOO, J. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, 2002.

BEYENE, H. D.; WERKNEH, A. A.; AMBAYE, T. G. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. **Renewable Energy Focus**, v. 24, p. 1-11. 2018.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15384/1/BS47__Biogas__FECHADO.pdf>.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Apoio à agroindústria**. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-apoio-agroindustria>>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Renovagro - Programa de Financiamento a Sistemas de Produção Agropecuária Sustentáveis**, 2023. Disponível em: < <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/renovagro>>. Acesso em: 21 de outubro 2023.

BORGES, C. P.; SOBCZAK, JÉSSICA C.; SILBERG, T. R.; URIONA-MALDONADO, M.; VAZ, C. R. A systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, 110518, 2021.

BUMBIERE K.; GANCONE A.; PUBULE, J.; KIRSANOV V.; VASAREVICIUS S.; BLUMBERGA, D. Ranking of Bioresources for Biogas Production. **Environmental and Climate Technologies**, v. 24, n. 1, p. 368–377, 2020.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei PL 2193/2020**, 2020 Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2250615#:~:text=O%20Projeto%20de%20Lei%202193%2F20%20institui%20a%20Pol%C3%ADtica,em%20dois%20pilares%3A%20incentivos%20fiscais%20e%20financiamento%20%28...%29>>.

CAMIRAND, E. **Biogas Plant Development Handbook**, Biogas World, 2021. Disponível em: <<https://www.biogasworld.com/biogasplant-development-handbook/>>.

CAMPOCCIA, A.; DUSONCHET, L.; TELARETTI, E.; ZIZZO, G. An analysis of feed'in tariffs for solar PV in six representative countries of the European Union. **Solar Energy**, v. 107, p. 530-542, 2014.

CAMPOCCIA, A.; DUSONCHET, L.; TELARETTI, E.; ZIZZO, G. Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and wind systems: four representative European cases. **Solar Energy**, v. 83, p. 287-297, 2009.

CANAL BIOENERGIA. **Usinas híbridas de energia solar e biogás ampliam potencial energético de produtores rurais**, 2020. Disponível em: <<https://www.canalbioenergia.com.br/usinas-hibridas-de-energia-solar-e-biogas-ampliam-potencial-energetico-de-produtores-rurais/>>. Acesso em 17 de novembro de 2022.

CHAPMAN, C.; VERBIC, G. Dynamic distributed energy resource allocation for load-side emergency reserve provision. In: Proceedings of IEEE innovative smart grid technologies e Asia. **IEEE**, p. 1-6, 2016.

CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Management Models and Industrial Applications of Linear Programming**. v.1. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1961.

CHIRADEJA, P. Benefit of distributed generation: a line loss reduction analysis. In: Proceedings of IEEE/PES transmission and Distribution Conference & exhibition: asia and Pacific Dalian. **IEEE**, p. 1-5, 2005.

CHUNG, C.A. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. Florida: CRC Press, 2004.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **Meta 3: Manual de Tecnologias para Uso do Biogás**, Foz do Iguaçu, p. 202, 2019a.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **Meta 2: Manual para transporte e armazenamento do biogas**, Foz do Iguaçu, p. 93, 2019b.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **Panorama do Biogás no Brasil**, 2021. Disponível em: <<https://materiais.cibiogas.org/download-panorama-do-biogas-no-brasil-2021>>.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **Cases de sucesso**. Disponível em: <https://cibiogas.org/portfolio_category/cases-de-sucesso/>. Acesso em: 23 de maio de 2022a.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **Quem somos**. Disponível em: <<https://cibiogas.org/quem-somos/>>. Acesso em: 23 de maio de 2022b.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **BIOGASMAP - Panorama do Biogás - 2022**, 2023. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNDZiYTYyNGQtYzliYS00NTMyLTk1Y2EtOWZmZjE4OTgwY2VkIiwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9>>. Acesso em: 24 de outubro de 2023.

COELHO, E. O. P.; AQUILA, G., BONATTO, B. D.; BALESTRASSI, P. P.; PAMPLONA, E. O.; NAKAMURA, W. T. Regulatory impact of photovoltaic prosumer policies in Brazil based on a financial risk analysis. **Utilities Policy**, v. 70, 101214, 2021.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; JUNIOR, A. D. N. F.; SANTOS, M. M.; JOBERT, C. L. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: IEE-USP, 218 p., 2018.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H.; MARIANE, L.; BLEY JUNIOR, C. B. Brazilian case study for biogas energy: production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. **Renew. Sustain. Energy Rev**, v. 40, p. 826-839, 2014.

CONFAZ - Conselho Nacional de Política Fazendária. **Convênio ICMS 16**, 2015. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15>. Acesso em: 08 de maio de 2022.

CONFAZ - Conselho Nacional de Política Fazendária. **Convênio ICMS 16**, 2018. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2018/CV042_18>. Acesso em: 08 de maio de 2022.

CONFAZ - Conselho Nacional de Política Fazendária. **Convênio ICMS 68**, 2022. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2022/CV068_22>. Acesso em: 08 de outubro de 2023.

COMELLO, S.; REICHELSTEIN, S. Cost competitiveness of residential solar PV: the impact of net metering restrictions. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, v. 75, p. 46-57, 2017.

CORNELL, J. **Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 2002, 649 p.

CORONADO, M.; SEGADÃES, A. M.; ANDRÉS, A. Combining mixture design of experiments with phase diagrams in the evaluation of structural ceramics containing foundry by-products. **Applied Clay Science**, 2014.

COSTA, T. S.; VILLALVA, M. G. Technical Evaluation of a PV-Diesel Hybrid System with Energy Storage: Case Study in the Tapajós-Arapicuns Extractive Reserve, Amazon, Brazil. **Energies**, v. 13, p. 2969, 2020.

COUTURE, T.; GAGNON, Y. An analysis of feed-in tariff remunerations models: Implications for renewable energy investment, **Energy Policy**, v. 38, p. 955-965, 2010.

DAS, I.; DENNIS, J. E. Normal boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. **SIAM Journal on Optimization**, v.8, n.3, 631-657, 1998.

DAS, I.; DENNIS, J. E. A closer look at drawbacks of minimizing weighted sums of objectives for Pareto set generation in multicriteria optimization problems. **Structural Optimization**, v. 14, n. 1, p. 63-69, 1997.

DESHMUKH, M. K.; DESHMUKH, S. S. Modeling of hybrid renewable energy systems. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, v. 12, p. 235–249, 2008.

DING, H.; ZHOU, D. Q.; LIU, G. Q.; ZHOU P. Cost reduction or electricity penetration: government R&D-induced PV development and future policy schemes. **Renew Sustain Energy Rev.**, v. 124, 109752, 2020.

DOILE, G. N. D.; ROTELLA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; JANDA, K.; AQUILA, G.; PERUCHI, R. S.; BALESTRASSI, P. P. Feasibility of hybrid wind and photovoltaic distributed generation and battery energy storage systems under techno-economic regulation. **Renewable Energy**, v. 195, p. 1310-1323, 2022.

DOU - Diário Oficial da União. **Seção 1 – 7 de outubro de 2015, Página 1**, 2015. Disponível em:<<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=07/10/2015&jornal=1&pagina=2&totalArquivos=68>>. Acesso em: 08 de maio de 2022.

DOYLE, G. N. D.; ROTELLA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; CARNEIRO, P. F. G.; PERUCHI, R. S.; JANDA K.; AQUILA, G. Impact of regulatory changes on economic feasibility of distributed generation solar units in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, p. 101660, 2021.

DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. A comparative assessment of net metering and net billing policies. Study cases for Spain. **Energy**, v. 84, p. 684-694, 2015.

DUTRA, R.M; SZKLO, A.S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v. 33, p. 65-76, 2008.

DUQUE-ACEVEDO, M.; BELMONTE-URENA, L. J.; CORTÉS-GARCÍA, F. J.; CAMACHO-FERRE F. Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. **Global Ecology and Conservation**, v. 22, e00902, 2020.

EBA - European Biogas Association. **Biogas Basics**, 2019. Disponível em: <<https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2019/09/Biogas-Basics-EBA.pdf>>

EID, C.; RENESSES, J. G.; FRÍAS, P. M.; HAKVOORT, R. The economic effect of electricity net-metering with solar PV: consequences for network cost recovery, cross subsidies and policy objectives. **Energy Pol.**, v. 75, p. 244-254, 2014.

ELIBOL, E.; OZMEN, O. T.; TUTKUN, N.; KOYSAL, O. Outdoor performance analysis of different PV panel types. **Renew. Sust. Energy Rev.**, v. 67, p. 651-661, 2017.

EMBRAPA - Embrapa. Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos, 188p, 1993.

EMBRAPA - Embrapa Suínos e Aves. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas**, 109p, 2004.

EMBRAPA - Embrapa Suínos e Aves. **Boas práticas de produção de suínos**, 60p, 2006.

EMBRAPA - Embrapa Suínos e Aves, Associação Brasileira de Criadores de Suínos, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual brasileiro de boas práticas agropecuárias na produção de suínos**, 1º ed., 140p., 2011a.

EMBRAPA - Embrapa Suínos e Aves. **Uso racional da água na suinocultura**, 9p, 2011b.

EMBRAPA - Embrapa Suínos e Aves. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**, 52p., 2018.

ENERGYSAGE. **EnergySage 2023 Solar Panel Buyer's Guide**, 2023. Disponível em: <<https://www.energysage.com/solar-panels/?page=4>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Síntese do Relatório Final**, 2013. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2014 – Ano base 2013: Síntese do Relatório Final**, 2014. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Síntese do Relatório Final**, 2015. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2016 – Ano base 2015: Síntese do Relatório Final**, 2016. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017 – Ano base 2016: Síntese do Relatório Final**, 2017. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2018 – Ano base 2017: Síntese do Relatório Final**, 2018a. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2019 – Ano base 2018: Síntese do Relatório Final**, 2019. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2020 – Ano base 2019: Síntese do Relatório Final**, 2020. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021 – Ano base 2020: Síntese do Relatório Final**, 2021. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2022 – Ano base 2021: Síntese do Relatório Final**, 2022. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Estudos de Planejamento da Expansão de Geração: Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento**. 31p. Rio de Janeiro, 2018b.

ESKELINEN, P.; MIETTINEN, K. Trade-off analysis approach for interactive nonlinear multiobjective optimization. **OR Spectrum**, v. 34, p. 803-816, 2011.

ESTEVES, E. M. M.; HERRERA, A. M. N.; ESTEVES, V. P. P.; MORGADO, C. R. V. Life cycle assessment of manure biogas production: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 411-423, 2019.

FAN, D.; REN, Y.; FENG, Q.; LIU, Y.; WANG, Z.; LIN, J. Restoration of smart grids: Current status, challenges, and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, 110909, 2021.

FARH, H. M.; AL-SHAALAN, A. M.; ELTAMALY, A. M.; AL-SHAMMA, A. A. A novel crow search algorithm auto-drive PSO for optimal allocation and sizing of renewable distributed generation. **IEEE**, v. 8, p. 27807-27820, 2020.

FEIDEN, A. **Avaliação da eficiência de um biodigestor tubular na produção de biogás a partir de águas residuárias de suinocultura**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel – PR, 2004.

FERREIRA, D. F. **Estatística Multivariada**. 3 ed. Lavras: Editora UFLA, 2018, 662 p.

FGV-EESP - Centro de Estudos Quantitativos em Economia e Finanças. **Série de Equity Risk Premium**. Disponível em: <<https://ceqef.fgv.br/node/594>>, 2023. Acesso em: 21 de março 2023.

FONSECA, M. N.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; VALERIO, V. E. M.; AQUILA, G.; SILVA, S. R. Multi-objective optimization applied for designing hybrid power generation systems in isolated networks. **Solar Energy**, v. 161, p. 207–219, 2018.

FREITAS, F.; SOUZA, S. D.; FERREIRA L.; OTTO, R.; ALESSIO, F.; SOUZA, S. D.; VENTURINI, O., JUNIOR, O. A. The brazilian market of distributed biogas generation: overview, technological development and case study. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 101, p. 146-57, 2019.

GARCEZ, C. G. Distributed electricity generation in Brazil: an analysis of policy context, design and impact. **Util. Pol.**, v. 49, p. 104-115, 2017.

GAUTIER, A.; HOET, B.; JACQMIN, J.; DRIESSCHED, S.V. Self-consumption choice of residential PV owners under net-metering. **Energy Policy**, v. 128, p. 648-653, 2019.

GAUTIER, A.; JACQMIN, J.; POUDOU, J. C. The prosumers and the grid. **Journal of Regulatory Economics**, v. 53, p. 100-126, 2018.

GREENER. **Strategic Market Study: Distributed Generation Solar PV Market Brazil**, 2020. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Strategic-Market-Study-Distributed-Generation-2H-2020-1.pdf>>

GEENER. **Estudo Estratégico: Geração Distribuída no Mercado Fotovoltaico**, 2023. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-setembro-2023-dados-do-1o-semester-2023/#:~:text=O%20Estudo%20Estrat%C3%A9gico%20do%20Mercado%20Fotovoltaico%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o,informa%C3%A7%C3%B5es%20estrat%C3%A9gicas%20para%20os%20diversos%20players%20do%20setor>>.

GREENER. **Estudo Estratégico: Mercado de Armazenamento, Aplicações, Tecnologias e Análises Financeiras**, 2021. Disponível em: <https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/12882/1620069790Verso_Light_-_Estudo_Estrategico_do_Mercado_de_Armazenamento_de_Energia_no_Brasil.pdf>

GHAFOURI, A.; MILIMONFARED, J.; GHAREHPETIAN, G. B. Coordinated control of distributed energy resources and conventional power plants for frequency control of power systems. **IEEE Trans Smart Grid**, v. 6, 104e14, 2015.

GHOSH, R.; BHATTACHERJEE, S. A review study on anaerobic digesters with an Insight to biogas production. **International Journal of Engineering Science Invention**, v. 2, n. 3, p. 08-17, 2013.

GONÇALVES, A. D.; SANTOS, D. M.; OLIVEIRA, G. S. P.; FERREIRA, J. I. C.; GABRIEL, L. C. Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e econômica de um biodigestor tubular. **Instituto Federal de Minas Gerais - MG**, 31p., 2018.

GONZÁLEZ, A.; RIBA, J-R.; RIUS, A. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic–wind–biomass power system. **Sustainability**, v. 7, p. 12787-12806, 2015.

GRUBB, M.; BUTLER, L.; TWOMEY, P. Diversity and security in UK electricity generation: the influence of low-carbon objectives, **Energy Policy**, v. 34, p. 4050-4062, 2006.

HE, Y.; GUO, S.; ZHOU, J.; WU, F.; HUANG, J.; PEI, H. The quantitative techno-economic comparisons and multi-objective capacity optimization of wind-photovoltaic hybrid power system considering different energy storage technologies. **Energy Conversion and Management**, v. 229, p. 113779, 2021.

HICKEY, E. A.; CARLSON, J. L.; LOOMIS, D. Issues in the determination of the optimal portfolio of electricity supply options. **Energy Policy**, v. 38, p. 2198-2207, 2010.

HIRTH, L.; STECKEL, J. C. The role of capital costs in decarbonizing the electricity sector. **Environmental Research Letters**, v. 11, 114010, 2016.

HOLDERMANN, C.; KISSEL, J.; BEIGEL, J. Distributed photovoltaic generation in Brazil: an economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors, **Energy Policy**, v. 67, p. 612-617, 2014.

HONG, S.; YANG, T.; CHANG, H. J.; HONG, S. The effect of switching renewable energy support systems on grid parity for photovoltaics: Analysis using a learning curve model. **Energy Policy**, v. 138, 111233, 2020.

HORVÁTH, I. S.; TABATABAEI, M.; KARIMI, K.; KUMAR, R. Recent updates on biogas production - a review. **Biofuel Research Journal**, v. 10, p. 394-402, 2016.

HOTELLING, H. A Generalized T Test and Measure of Multivariate Dispersion, **Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability**, v. 1, p. 23-41, 1951.

I17 - Instituto 17. **Biogás no Brasil: Potencial Oferta a Curto Prazo**, 2021. Disponível em: <<https://i17.org/documents/Biogas-Brasil-Potencial-Oferta-a-Curto-Prazo.pdf>>

IBÁÑES-FORÉS, V.; BOVEA, M. D.; PÉREZ-BELIS, V. A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective. **Journal of Cleaner Production**, v.70, p.259-281, 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População Estimada 2019**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 8 de abril 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Série Histórica IPCA**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=series-historicas>>, 2023. Acesso em: 21 de março 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa da Pecuária Municipal 2019**. Disponível em:

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2019_v47_br_informativo.pdf>, 2019. Acesso em: 21 de março 2021.

IEA - International Energy Agency. **Electricity Market Report e July 2021**, 2021a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/electricity-marketreport-july-2021>>.

IEA - International Energy Agency. **Renewables 2020 - Analysis and forecast to 2025**, 2020. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1a24f1fe-c971-4c25-964a-57d0f31eb97b/Renewables_2020-PDF.pdf>.

IEA Bioenergy - International Energy Agency Bioenergy. **Task 37 - A perspective on the state of the biogas industry from selected member countries**, 2022. Disponível em: <<http://task37.ieabioenergy.com/>>.

IEA - International Energy Agency. **Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy**, 2014. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e78cd964-9859-48c8-89b5-81fb4a1423b3/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf>.

IEA - International Energy Agency. **World Energy Outlook**, 2021b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>>.

IGLESIAS, C.; VILAÇA, P. On the regulation of solar distributed generation in Brazil: A look at both sides. **Energy Policy**, v. 167, p. 113091, 2022.

IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Emissions from livestock and manure management - agriculture, forestry and other land use**, 87p, 2006.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Innovation landscape brief: Renewable mini-grids**, 2019. Disponível em: <https://cms.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Renewable_mini-grids_2019.ashx?la=en&hash=90EFC3E57E0691BBA1C9E2C64CEEDE9945366BFE>.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy Statistics**, 2021. Disponível em: <<https://irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-2021>>.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy Statistics**, 2022. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>>.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy Statistics**, 2023. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>>.

IRENA - International Renewable Energy Agency, **Renewable Power Generation Costs in 2019**, 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/>>

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf>.

JANA, P.; ROY, T. K.; MAZUMDER, S. K. Multi-objective mean-variance-skewness model for portfolio optimization, **Adv. Model Optim.**, v. 9, p. 181–193, 2007.

JANNUZZI, G. M.; MELO, C. A. Grid-connected photovoltaic in Brazil: policies and potential impacts for 2030. **Energy Sustain. Dev.**, v 17, 40-46, 2013.

JARDIM, C.S; SALAMONI, I., RUTHER, R.; KNOB, P.; DINIZ, A.S.C. O potencial dos sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica em áreas urbanas: dois estudos de caso. In: **Encontro de Energia no Meio Rural**, n.3, 2004, Campinas. Proceedings online. Disponível em:<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200029&lng=en&nrm=iso>.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6 ed. New Jersey: Pearson Prentice-Hall, 2007, 773 p.

JOHNSTONE, I. M.; NADLER, B. Roy's largest root test under rank-one alternatives, **Biometrika**. v. 104, p. 181-193, 2017.

JORDAN, D.C.; KRRTZ, S. R.; VANSANT, K.; NEWMILLER, J. Compendium of photovoltaic degradation rates. **Prog. Photovolt. Res. Appl.**, v. 24, p. 978-989, 2016.

JIA, X.; DU, H.; ZOU, H.; HE, G. Assessing the effectiveness of China's net-metering subsidies for household distributed photovoltaic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, 121161, 2020.

JIANG, X.; SOMMER, S. G.; CHRISTENSEN, K.V. A review of the biogas industry in China. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, p. 6073-6081, 2011.

JOSHI, A. S.; DINCER, I.; REDDY, B.V. Performance analysis of photovoltaic systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 1884–1897, 2009.

JUNGINGER, M.; VISSER, E.; HJORT-GREGERSEN, K.; KOORNNEEF, J.; RAVEN, R.; FAAIJ, A.; TURKENBURG, W. Technological Learning in Bioenergy Systems. **Energy Policy**, v. 34, p. 4024-4041, 2006.

KAABECHE, A.; BELHAMEL, M.; IBTIOUEN, R. Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system. **Energy**, v. 36, p. 1214-1222, 2011.

KAKRAN, S.; CHANANA, S. Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 524-535, 2018.

KAMOUN, A.; CHAABOUNI, M.; SERGENT, M.; PHAN-TAN-LUU, R. Mixture design applied to the formulation of hydrotropes for liquid detergents, **Chemometrics Intelligent Laboratory System**, v.63, p. 69–79, 2002.

KASINATH, A.; FUDALA-KSIAZEK, S.; SZOPINSKA, M.; BYLINSKI, H.; ARTICHOWICZ, W.; REMISZEWSKA-SKWAREK, A.; LUCZKIEWICZ, A. Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, 111509, 2021.

KUNATSA, T.; XIA, X. A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement. **Bioresource Technology**, v. 344, 126311, 2022.

KWON, T. Rent and rent-seeking in renewable energy support policies: Feed-in tariff vs. renewable portfolio standard. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 676-681, 2015.

LEAL, G. S.; ROMÃO, E. L.; REIS, D. L. P. E.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, A. P. A multiobjective portfolio optimization for energy assets using D-Optimal design and mixture design of experiment, **Production**, v. 32, e20210119, 2022.

LEE, K.M; GILMORE, D.F. Formulation and process modeling of biopolymer (polyhydroxyalkanoates: PHAs) production from industrial wastes by novel crossed experimental design. **Process Biochemistry**, v.40, p. 229–246, 2005.

LINTNER, J. The valuation of risk assets and the selection of risky investments in stock portfolios and capital budgets. **Review of Economics and Statistics**, v. 47, n. 1, p. 13–37, 1965.

LAWLEY, D. N. A Generalization of Fisher's Z-Test, **Biometrika**, v. 30, p. 180–187, 1938.

LYNG, K. A.; MODAHL, I. S.; MOLLER, H.; MORKEN, J.; BRISEID, T.; HANSSSEN, O. J. The biovalue chain model: a norwegian model for calculating environmental impacts of biogas value chains. **Int. J. Life Cycle Assess**, v. 20, n. 4, p. 490-502, 2015.

MA, T.; YANG, H.; LU, L. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 36, p. 304–315, 2014a.

MA, T.; YANG, H.; LU, L. A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island. **Applied Energy**, v. 121, p. 149–158, 2014b.

MABEE, W. E.; MANNION, J.; CARPENTER, T. Comparing the feed-in tariff incentives for renewable electricity in Ontario and Germany. **Energy Policy**, v. 40, p. 480-489, 2012.

MAGHANAKI, M. M.; GHOBADIAN B.; NAJAFI, G.; GALOGAH, R. J. Potential of biogas production in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 702-714, 2013.

MAHALANOBIS, P. C. On the Generalized Distance in Statistics, **Proceedings of the National Institute of Sciences of India**, v. 12, p. 49–55, 1936.

MAHMUDUL, H. M.; RASUL, M. G.; AKBAR, D.; MOFIJUR M. Opportunities for solar assisted biogas plant in subtropical climate in Australia: A review. **Energy Procedia**, v. 160, p. 683-690, 2019.

MAIA, P. R. **Método de Interseção Normal à fronteira por escores rotacionados em espaço elíptico de solução**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal. Itajubá – MG, 2020.

MAINALI, B.; DHITAL, R. “Chapter 15- Isolated and Mini-Grid Solar PV Systems: An Alternative Solution for Providing Electricity Access in Remote Areas (Case Study from Nepal),” **Solar Energy Storage**, p. 359 – 374, 2015.

MANESH, M. H. K.; REZAZADEH, A.; KABIRI, S. A feasibility study on the potential, economic, and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran. **Renewable Energy**, v. 159, p. 87-106, 2020.

MARTELLI, V.; CHIMENTI, P.; NOGUEIRA, R. Future scenarios for the Brazilian electricity sector: PV as a new driving force? **Futures**, v. 120, p. 102555, 2020.

MARTINS, R.; MELLO, C.H.; TURRIONI, J. B. **Guia para elaboração de Monografia e TCC em Engenharia de Produção**. São Paulo: Atlas, 2014.

MENDES, R. R. A.; PAIVA, A. P.; PERUCHI, R. S.; BALESTRASSI, P. P.; LEME, R. C.; SILVA, M. B. Multiobjective portfolio optimization of ARMA-GARCH time series based on experimental designs, **Computers & Operations Research**, v. 66, p. 434-444, 2016.

MERCURIO, P. J.; WU, Y.; XIE, H. An Entropy-Based Approach to Portfolio Optimization, **Entropy**, v. 22, n. 3, p. 332, 2020.

MIETTINEN, K. **Nonlinear multiobjective optimization**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

MIJARES, T. A. The normal approximation to the Bartlett-Nanda-Pillai trace test in multivariate analysis, **Biometrika**, v. 77, p. 230-233, 1990.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Fatores de emissão da margem de operação pelo método simples ajustado**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>. Acesso em: 6 de outubro de 2023.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica ProGD**, 2019. Disponível em:

<<http://antigo.mme.gov.br/documents/20182/6dac9bf7-78c7-ff43-1f03-8a7322476a08>>. Acesso em: 6 de abril de 2022.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 7 ed. New York: John Wiley & Sons, 2009, 665 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5 ed. John Wiley & Sons, 2011, 768 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 7 ed. New York: Wiley, 2019, 768.

MONTEIRO, M. K. D.; VIEIRA, A. S.; ARAGÃO, J. M. C.; SOARES, J. F. Proposta de um modelo matemático para mensuração dos créditos de carbono da suinocultura brasileira. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 9, p. 82–96, 2015.

MORETTI, M.; DJOMO, S. N.; AZADI, H.; MAY, K.; DE VOS, K.; VAN PASSEL, S.; WITTERS, N. A systematic review of environmental and economic impacts of smart grids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 888-898, 2017.

MOSSIN, J. Equilibrium in a capital asset market. **Econometrica**, v.34 n. 4, p. 768–83, 1966.

MUNDO-HERNÁNDEZ, J.; ALONSO, B. C.; HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, J.; CELIS-CARRILLO, B. An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 639–649, 2014.

MUTUNGWAZI, A.; MUKUMBA, P.; MAKAKA, G. Biogas digester types installed in South Africa: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 172-180, 2018.

MWIRIGI, J.; BALANA, B. B.; MUGISHA, J. Socio-economic hurdles to widespread adoption of small-scale biogas digesters in Sub-Saharan Africa: a review. **Biomass Bioenergy**, v. 70, p. 17-25, 2014.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON, C. M. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 3. ed. New Jersey: **John Wiley & Sons**, 2009.

MYERS, R.H; MONTGOMEY, D.C.; ANDERSON-COOK, C.M. **Response surface methodology: Process and Product Optimization Using Design Experiments**. 4ed. New York: Wiley, 2016.

NAVABI, R., ABEDI, S., HOSSEINIAN, S.H., PAL, R. On the fast convergence modeling and accurate calculation of PV output energy for operation and planning studies. **Energy Conversion Management**, v.89, p.497-506, 2015.

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S.J. **Numerical optimization**. 2 ed. New York: Springer, 2006, 683p.

NREL - National Renewable Energy Laboratory, **A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies**. 120p., 1995.

NWAIGWE, K. N.; MUTABILWA, P.; DINTWA, E. An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, p. 629–633, 2019.

OLIVEIRA, A. C. L.; MILAGRES, R. S.; ORLANDO JUNIOR, W. A.; RENATO, N. S. Evaluation of Brazilian potential for generating electricity through animal manure and sewage. **Biomass and Bioenergy**, v. 139, 105654, 2020.

OLIVEIRA, F.A.; PAIVA, A.P.; LIMA, J.W.M.; BALESTRASSI, P.P.; MENDES, R.R.A. Portfolio optimization using Mixture Design of Experiments: Scheduling trades within electricity markets. **Energy Economics**, v.33, p.24-32, 2011.

OLSON, C. H. On chasing a test-statistic in multivariate analysis of variance, **Psychological Bulletin**, v. 83, p. 579-586, 1976.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024.

OREE, V.; HASSEN, S.Z.S.; FLEMING, P.J. Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.69, p.790-803, 2017.

PACUDAN, R.; Feed-in tariff vs incentivized self-consumption: Options for residential solar PV policy in Brunei Darussalam. **Renewable Energy**, v. 122, p. 362-374, 2018.

PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. **Journal of Materials Processing Technology**, v.189, n.1-3, p.26-35, 2007.

PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1625–1636, 2011.

PENG, J.; LU, L., YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 255–274, 2013.

PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. S. The renewable energy market in Brazil: current status and potential. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 16, p. 3786-3802, 2012.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RUTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2.ed. São Jose dos Campos. INPE; 2017. p. 88p.

PILLAI, K. C. S. Some new test criteria in multivariate analysis, **Ann. Math. Statist.**, v. 26, p. 117-121, 1955.

PLANALTO. **Lei Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022**, 2022. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm>. Acesso em: 15 de maio de 2022.

SENADO. **Projeto de Lei nº 412, de 2022**, 2022. Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/151967/pdf#:~:text=Projeto%20de%20Lei%20n%C2%B0%20412%2C%20de%2022%20Iniciativa%3A,e%2013.493%20de%2017%20de%20outubro%20de%202017>>. Acesso em: 30 de outubro de 2023.

RAMÍREZ, F. J.; HONRUBIA-ESCRIBANO, A.; GÓMEZ-LÁZARO, E.; PHAM, D. T. Combining feed-in tariffs and net-metering schemes to balance development in adoption of photovoltaic energy: Comparative economic assessment and policy implications for European countries. **Energy Policy**, v. 102, p. 440-452, 2017.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009, 813 p.

RAZYKOV, T. M.; FERKIDES, C. S.; MOREL, D.; STEFANAKOS, E.; ULLAL, H. S.; UPADHYAYA, H. M. Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects. **Solar Energy**, v. 85, p. 1580-1608, 2011.

REDISKE, G.; SILUK, J. C. M.; MICHELS, L.; RIGO, P. D.; ROSA, C.B.; CUGLER, G. Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil. **Energy**, v. 197, p. 117167, 2020.

REN, X.; WU, Y.; HAO, D.; LIU, G.; ZAFETTI, N. Analysis of the performance of the multi-objective hybrid hydropower-photovoltaic-wind system to reduce variance and maximum power generation by developed owl search algorithm. **Energy**, v. 231, p. 120910, 2021.

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2017 global status report**, 2017. Disponível em: <https://ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf>.

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2018 global status report**, 2018. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2018_Full-Report_English.pdf>.

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2019 global status report**, 2019. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf>.

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2020 global status report**, 2020. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf>.

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2021 global status report**, 2021. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf>.

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2022 global status report**, 2022. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf>.

RENCHER, A. C. **Methods of Multivariate Analysis**. 2 ed. John Wiley & Sons, 2002, 708 p.

RIBEIRO, A. E. D.; AROUCA, M. C.; COELHO, D. M. Electric energy generation from small scale solar and wind power in Brazil: the influence of location, area and shape. **Renew Energy**, v. 85, p. 554-563, 2016.

RIGO, P. D.; SILUK, J.C.M.; LACERDA, D. P.; ROSA, C. B.; REDISKE, G. Is the success of small-scale photovoltaic solar energy generation achievable in Brazil? **Journal of Cleaner Production**, v. 240, 118243, 2019a.

RIGO, P.D.; SILUK, J. C. M.; LACERDA, D. P.; THOMASI, V.; REDISKE, G.; ROSA, C. B. Evaluation of the success of a small-scale photovoltaic energy system. **IEEE Lat. Am. Trans.**, v. 17, p. 1474-1481, 2019b.

RIGO, P. D.; SILUK, J. C. M.; LACERDA, D. P.; REDISKE, G.; ROSA, C. B. A model for measuring the success of distributed small-scale photovoltaic systems projects, **Sol. Energy**, v. 205, p. 241-253, 2020.

RIGO, P. D.; SILUK, J. C. M.; LACERDA, D. P.; SPELLMEIER, J. P. Competitive business model of photovoltaic solar energy installers in Brazil. **Renewable Energy**, v. 181, 39-50, 2022.

ROBERTS, J. J.; CASSULA, A. M.; SILVEIRA, J. L.; BORTONI, E. C.; MENDIBURU, A. Z. Robust multi-objective optimization of a renewable based hybrid power system. **Applied Energy**, v. 223, p. 52–68, 2018.

ROCHA, L. C.; AQUILA, G.; PAMPLONA, E.; PAIVA, A. P.; CHIEREGATTI, B. G.; LIMA, J. S. Photovoltaic electricity production in Brazil: a stochastic economic viability analysis for small systems in the face of net metering and tax incentives. **J. Clean Prod.**, v. 168, p.1448-1462, 2017a.

ROCHA, L. C. S.; PAIVA, A. P.; ROTELA JUNIOR, P.; BALESTRASSI, P. P.; CAMPOS, P. H. S. Robust multiple criteria decision making applied to optimization of AISI H13 hardened steel turning with PCBN wiper tool. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, v. 89, p. 2251–2268, 2017b.

ROCHA, L. C. S.; ROTELA JUNIOR, P.; AQUILA, G.; PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P. Toward a robust optimal point selection: a multiple-criteria decision-making process applied to multi-objective optimization using response surface methodology. **Eng. Comput.**, v. 37, p. 2735–2761, 2021.

ROCHA, L. C. S.; ROTELA JUNIOR, P.; AQUILA, G.; MAHERI, A. Multiobjective optimization of hybrid wind-photovoltaic plants with battery energy storage system: Current situation and possible regulatory changes. **Journal of Energy Storage**, v. 51, p. 104467, 2022.

ROSA, C. B.; WENDT, J. F. M.; CHAVES, D. M. S.; THOMASI, V.; MICHELS, L.; SILUK, J. C. M. Mathematical modeling for the measurement of the competitiveness index of Brazil south urban sectors for installation of photovoltaic systems, **Energy Pol.**, v. 136, 111048, 2020.

SAMADI, S. The experience curve theory and its application in the field of electricity generation technologies e a literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2346-2364, 2018.

SANTOS, A. J. L.; LUCENA, A. F. P. Climate change impact on the technical-economic potential for solar photovoltaic energy in the residential sector: a case study for Brazil. **Energy and Climate Change**, v. 2, p. 100062, 2021.

SARKAR, T.; BHATTACHARJEE, A.; SAMANTA, H.; BHATTACHARYA, K.; SAHA, H. Optimal design and implementation of solar PV-wind-biogas-VRFB storage integrated smart hybrid microgrid for ensuring zero loss of power supply probability. **Energy Conversion and Management**, v. 191, p. 102–118, 2019.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**. v. 129, p. 457–472, 2018.

SCHEFFÉ, H. Experiments with mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B**, London, v.20, n.2, p.344-360, 1958.

SCHEFFÉ, H. The simplex centroid design for experiments with mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B**, London, v.25, n.2, p.235-23, 1963.

SCHEUTZ, C.; FREDENSLUND A. Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants. **Waste Management**, v. 97, p. 38-46, 2019.

SCOPUS. **Document search results**, 2023. Disponível em: <<https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=Multiobjective+Programming+biogas+solar+photovoltaic&sid=bf3fc44d75ef13>>

ec0eb975303d7eb017&sot=b&sdt=b&sl=66&s=TITLE-ABS-KEY%28Multiobjective+Programming+biogas+solar+photovoltaic%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present>. Acesso em: 25 de outubro de 2023.

SENAI - Paraná Regional Department. **Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná**, 2016. Disponível em: <[https://www.sistemafiep.org.br/relacoes-internacionais/uploadAddress/Biogas\[73656\].pdf](https://www.sistemafiep.org.br/relacoes-internacionais/uploadAddress/Biogas[73656].pdf)>.

SEF-MG - Secretaria de Estado de Fazenda de Minas Gerais. **Lei N° 6763/1975 – 2/13**, 2013. Disponível em: <http://www.fazenda.mg.gov.br/empresas/legislacao_tributaria/leis/l6763_1975_02.html>. Acesso em: 08 de maio de 2022.

SEF-RJ - Secretaria de Estado de Fazenda do Rio de Janeiro. **Lei N° 8922/2020**, 2020. Disponível em: <http://www.fazenda.rj.gov.br/sefaz/faces/oracle/webcenter/portalapp/pages/navigation-renderer.jsp;jsessionid=mReBaDTKG2IWy4pHkqPKIDJ_pcvVZLBJj418HqiO0klzljvMDc-X!-2061905599?datasource=UCMServer%23dDocName%3AWCC42000009178&_adf.ctrl-state=18xqjnxmge_1&_afLoop=74802333659576027&_afWindowMode=0&_afWindowId=null>. Acesso em: 20 de junho de 2022.

SHAHRAKI, A. F.; NOOROSSANA, R. Reliability-based robust design optimization: A general methodology using genetic algorithm. **Computers & Industrial Engineering**, v. 74, p. 199-207, 2014.

SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. **The Bell System Technical Journal**, v. 27, p. 379-423, 1948.

SHARPE, W. Capital asset prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk. **The Journal of Finance**, v.19, n.3, p.425-442, 1964.

SHUKLA, A.K., SUDHAKAR, K., BAREDAR, P. Simulation and performance analysis of 110 kWp grid-connected photovoltaic system for residential building in India: A comparative analysis of various PV technology. **Energy Reports**, v.2, p.82-88, 2016.

SILVA, P. P.; DANTAS, G.; PEREIRA, G. I.; CÂMARA, L. CASTRO, N. J. Photovoltaic distributed generation – An international review on diffusion, support policies, and electricity sector regulatory adaptation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 30-39, 2019.

SILVA, R. C.; NETO, I. M.; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 59, p. 328-341, 2016.

SILVA, S. B.; SEVERINO, M. M.; OLIVEIRA, M. A. G. A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil. **Renewable Energy**, v. 57, p. 384-389, 2013.

SINGH, K.; JASH, T. Performance analysis of micro turbine-based grid connected biogas power plant in purulia in West Bengal, India. **Clean Technol. Environ. Policy**, v. 17, p. 789-795, 2015.

SINGH, S. P.; PRERNA, P., Review of recent advances in anaerobic packed-bed biogas reactors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1569-1575, 2009.

SIMIONI, T.; SCHAEFFER, R. Georeferenced operating-efficiency solar potential maps with local weather conditions – An application to Brazil. **Sol. Energy**, v. 184, p. 345–355, 2019.

SOLVASON, C. C.; CHEMMANGATTUVALAPPIL, N.; ELJACK, F. T.; EDEN, M. R. Efficient Visual Mixture of Experiments using property clustering Techniques. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 48, p. 2245-2256, 2009.

STAHL, L.; WOLD, S. Multivariate Analysis of Variance (MANOVA), **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 9, p. 127-141, 1990.

STAHL, L.; WOLD, S. Analysis of Variance (ANOVA), **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**. V. 6, p. 259-272, 1989.

STEVENS, J. Comment on Olson: Choosing a test statistic in multivariate analysis of variance, **Psychological Bulletin**, v. 86, p. 355-360, 1979.

STEFFEN, B. Estimating the cost of capital for renewable energy projects. **Energy Econ.**, v. 88, p. 104783, 2020.

SYNWOLDT, C.; REIS, A. Cost trends of Renewable Energy Technologies for the Power Generation, **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH**, Eschborn, 2011.

TAMoor, M.; TAHIR, M. S.; SAGIR, M.; TAHIR, M. B.; IQBAL, S.; NAWAZ, T. Design of 3 kW integrated power generation system from solar and biogas. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, p. 12711 -12720, 2020.

TESOURO DO BRASIL. **Histórico de preços e taxas**. Disponível em: <[https://sisweb.tesouro.gov.br/apex/f?p=2031:2:0:::~](https://sisweb.tesouro.gov.br/apex/f?p=2031:2:0:::)>, 2023. Acesso em: 21 de março 2023.

TEZER, O.; KARABAG, N.; ONGEN A.; O.; ÇOLPAN, C. O.; AYOL, A. Biomass gasification for sustainable energy production: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 15419-15433, 2022.

TIMM, N. H. **Applied Multivariate Analysis**. Springer-Verlag New York, 2002, p. 693.

TÖRNWALL, E.; PETTERSSON, H.; THORIN E.; SCHWEDE, S. Post-treatment of biogas digestate - An evaluation of ammonium recovery, energy use and sanitation. **Energy Procedia**, v. 142, p. 957-963, 2017.

TORRES, A. F.; ROCHA, F. B.; ALMEIDA, F. A.; GOMES, J. H. F.; PAIVA A. P.; BALESTRASSI, P. P. Multivariate Stochastic Optimization Approach Applied in a Flux-Cored Arc Welding Process, **IEEE Access**, v. 8, p. 61267 - 61276, 2020.

TRANNIN, M. Desafios e oportunidades para a geração de energia elétrica por fontes renováveis no Brasil: Estudo de caso sobre a Usina de Tacaratu (PE). **FGV Energia**, 2016.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. Itajubá: UNIFEI, 2012.

TYAGI, V. V; RAHIM, N. A.A.; RAHIM N. A.; SELVARAJ, J. A. L. Progress insolar PV technology: Research and achievement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 443–461, 2013.

UFA, R. A.; MALKOVA, Y. Y.; RUDNIK, V. E.; ANDREEV, M. V.; BORISOV, V. A. A review on distributed generation impacts on electric power system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 395, 2022.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **AMS-III.D. 21.0 - Small-scale methodology methane recovery in animal manure management systems**, 30p., 2017.

USTA, I.; KANTAR, Y. M. Mean-variance-skewness-entropy measures: a multiobjective approach for portfolio selection, **Entropy**, v. 13, p. 117-133, 2011.

VAN STAPPEN, F.; MATHOT, M.; DECRUYENAERE, V.; LORIER, A.; DELCOUR, A.; PLANCHON, V.; GOFFART, J. P.; STILMANT, D. Consequential environmental life cycle assessment of a farm-scale biogas plant. **J. Environ. Manag.** v. 175, p. 20-32, 2016.

VITA, V.; ALIMARDAN, T.; EKONOMOU, L. The impact of distributed generation in the distribution networks' voltage profile and energy losses. In: IEEE European modelling Symposium (EMS). **IEEE**, p. 260e5, 2015.

WATTS, D.; VALDÉS, M. F.; JARA, D.; WATSON, A. Potential residential PV development in Chile: The effect of Net Metering and Net Billing schemes for grid-connected PV systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1037-1051, 2015.

WBA - World Bioenergy Association. **Global Bioenergy Statistics**, 2021. Disponível em: <<https://www.worldbioenergy.org/uploads/211214%20WBA%20GBS%202021.pdf>>.

WILKS, S. S. Certain Generalizations in the Analysis of Variance, **Biometrika**, v. 24, p. 471-494, 1932.

WU, T.; BU, S.; WEI, X.; WANG, G.; ZHOU, B. Multitasking multi-objective operation optimization of integrated energy system considering biogas-solar-wind renewables. **Energy Conversion and Management**, v. 229, p. 113736, 2021.

YATCHEW, A.; BAZILIAUSKAS, A. Ontario feed in programs. **Energy Policy**, v. 39, p. 3885-3893, 2011.

ZHANG, W.; YANG, H. A study of the weighting method for a certain type of multicriteria optimization problem. **Computers & Structures**, v. 79, n. 31, p. 2741-2749, 2001.

ZHOU, R.; CAI, R.; TONG, G. Applications of entropy in finance: a review, **Entropy**, v. 15, p. 4909-4931, 2013.

ZHU, F.; ZHONG, P.; SUN, Y.; XU, B.; MA, Y.; LIU, W.; ZHANG, D.; DAWA, J. A coordinated optimization framework for long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid system: Nonlinear modeling, multi-objective optimization and robust decision-making. **Energy Conversion and Management**, v. 226, p. 113543, 2020.

APÊNDICE A – Produções Bibliográficas

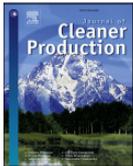
Journal of Cleaner Production 375 (2022) 134138



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro



Net metering and tax incentives for distributed generation in Brazil: Economic impact analysis for swine biogas

Pedro Alberto Chaib de Sousa Bernardes^a, Giancarlo Aquila^a, Edson de Oliveira Pamplona^a,
Luiz Célio Souza Rocha^b, Paulo Rotella Junior^{c,d,e,*}

^a Institute of Production Engineering and Management, Federal University of Itajuba, Itajuba, MG, Brazil
^b Department of Management, Federal Institute of Education, Science and Technology - North of Minas Gerais, Almenara, MG, Brazil
^c Department of Production Engineering, Federal University of Paraíba, Joao Pessoa, PB, Brazil
^d Faculty of Finance and Accounting, Prague University of Economics and Business, Prague, Czech Republic
^e Faculty of Social Sciences, Charles University, Prague, Czech Republic



Figura 41. Artigo publicado na revista *Journal of Cleaner Production*.



Environmental Technology >

Latest Articles

Submit an article
Journal homepage

Enter keywords, authors, DOI, ORCID etc

0 Views

0 CrossRef citations to date

0 Altmetric



Listen


Research Article

Energy and stochastic economic assessment for distributed power generation from manipueira biogas

Denner dos Santos Oliveira, Gabriel Costa Gomes, Luiz Célio Souza Rocha, Paulo Rotella Junior  , Giancarlo Aquila, Pedro Alberto Bernardes & ...[show all](#)

Accepted author version posted online: 15 Nov 2022

 Download citation
 <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2148569>
 Check for updates

Figura 42. Artigo publicado na revista *Environmental Technology*.

Technical-economic analysis of the impact of post-harvesting systems and subsidized loans for coffee 174
farms in Minas Gerais (Brazil)
Bernardes, P.A.C. de S.; Aquila, G.; Pamplona, E. de O.; Medeiros, A.L.; Nakamura, W.T.; Silva, A.S. da.
**Technical-economic analysis of the impact of post-harvesting systems and
subsidized loans for coffee farms in Minas Gerais (Brazil)**

Reception of originals: 05/25/2022
Release for publication: 04/03/2023

Custos e @gronegocio on line - v. 18, n. 4, Oct/Dec - 2022.
www.custoscagronegocioonline.com.br

ISSN 1808-2882

Figura 43. Artigo publicado na revista *Custos e @gronegocio on line*.