

revista brasileira de
ENERGIA



Sociedade Brasileira de
Planejamento Energético

Volume 29, Nº 4, 4º Trimestre de 2023

Diagramação

Kelly Fernanda dos Reis

Revisão

Arnaldo Walter

**Revista Brasileira de Energia
Vol. 29 - nº 4**

Itajubá, 2023 - SBPE

Editor: Arnaldo Walter
121 p.

1 - Energia - artigos

2 - Publicação científica

ISSN: 2317-6652

É permitida a reprodução parcial ou total da obra, desde que citada a fonte.

A Revista Brasileira de Energia tem como missão: “divulgar trabalhos acadêmicos, estudos técnicos e resultados de pesquisas relacionadas ao planejamento energético do país e das suas relações regionais e internacionais”.

Editor Responsável

Arnaldo Walter

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4931-1603>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1348339517901277>

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Comitê Editorial

Alexandre Salem Szklo

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Annemarlen Gehrke Castagna

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Edmilson Moutinho dos Santos

Universidade de São Paulo - USP

Helder Queiroz Pinto Junior

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Joaquim Eugênio Abel Seabra

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Kamyla Borges da Cunha

Instituto Clima e Sociedade - iCS

Luiz Augusto Horta Nogueira

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Mônica Cavalcanti Sá de Abreu

Universidade Federal do Ceará - UFC

Sergio Valdir Bajay

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Virgínia Parente

Universidade de São Paulo - USP

A Revista Brasileira de Energia (RBE) é uma publicação da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético (SBPE), editada trimestralmente.

Diretoria da SBPE

Presidente: Rubem César Rodrigues Souza

Vice-Presidente: Juliana Klas

Diretora de Eventos: Paula Meyer Soares

Diretor de Publicações: Arnaldo Walter

Diretor Administrativo: Edson da Costa Bortoni

Conselho Fiscal

Eduardo Mirko Valenzuela Tundera

Ivo Leandro Dorileo

Jamil Haddad

Conselho Consultivo

Afonso Henriques Moreira Santos

Célio Bermann

Edmilson Moutinho dos Santos

Ivan Marques de Toledo Camargo

Jamil Haddad

José Roberto Moreira

Luiz Pinguelli Rosa

Maurício Tiommo Tolmasquim

Oswaldo Lívio Soliano Pereira

Sergio Valdir Bajay

Secretaria Executiva da SBPE

Kelly Fernanda dos Reis

Endereço: Av. BPS, 1303 – Pinheirinho

Itajubá – MG – CEP:37.500-903

E-mail: exec@sbpe.org.br

Os artigos podem ser enviados por meio do site da SBPE

www.sbpe.org.br

ESTATÍSTICAS

Tempo para tomada de decisões

A partir do primeiro número publicado em 2022, a Revista Brasileira de Energia (RBE) vem apresentando estatísticas relativas ao processamento das submissões. Com a implantação de novos procedimentos gerenciais, foi possível a partir de outubro de 2020 reduzir o tempo para a avaliação dos artigos e tomada de decisões.

Entretanto, por conta das pendências então existentes, para o conjunto de submissões analisadas desde outubro de 2020 o tempo médio de tomada de decisão ainda é longo – 213 dias –, sendo apenas um pouco menor – 211 dias – para os artigos aceitos para publicação. O número de dias é contado da data de submissão até a data da decisão editorial final – aceitação ou rejeição –, e nessa avaliação não estão sendo considerados os artigos publicados em número especial (no volume 27, números 2 e 3, publicados em 2021) e os artigos de autores convidados.

Já para as submissões que ocorreram a partir de outubro de 2020 e, portanto, excluindo dos resultados as pendências que existiam até então, o tempo médio de tomada de decisão é de 136 dias, sendo de 160 dias para os artigos aceitos. Para os cinco artigos publicados neste número, o tempo médio entre a submissão e a decisão editorial final foi de 93 dias.

O compromisso assumido é de alcançar e manter o tempo de tomada de decisão abaixo de 150 dias e, com os resultados deste número, mais uma vez melhoramos os indicadores temporais em relação aos resultados anteriores. A RBE segue trabalhando para melhoria de seus procedimentos, e para que melhores resultados sejam alcançados.

Artigos mais acessados e os mais citados

Desde março de 2018, o gerenciamento das submissões à Revista Brasileira de Energia é feito pela plataforma Open Journal Systems (OJS). Todos os artigos já publicados pela RBE, desde 1989, estão disponíveis em formato eletrônico (ver <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/issue/archive>). A plataforma OJS registra, desde março de 2018, o número de consultas a *abstracts* e os *downloads* dos artigos publicados.

Em quase seis anos houve mais de 193 mil *downloads* de artigos publicados; o levantamento aqui apresentado foi feito na última semana de janeiro de 2024. Entre todos os artigos já publicados, os cin-

co mais acessados são apresentados na Tabela 1; não houve mudanças na lista em relação ao divulgado anteriormente, mas o número de *downloads* aumentou. Por outro lado, entre os artigos publicados a partir de 2020 (inclusive), os cinco mais acessados são apresentados na Tabela 2; neste caso, houve mudanças no ordenamento.

Em adição, utilizando a plataforma Google Acadêmico, no início de 2024 foram identificados os artigos da RBE com mais citações. Na Tabela 3 são apresentados os dez artigos mais citados, de acordo com o levantamento feito.

Tabela 1 - Artigos mais acessados dentre os já publicados; monitoramento a partir de março de 2018

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de downloads
Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização	Luís Cortez, Paulo Magalhães e Júlio Happ	1992	v. 02 n.02	10.264
Sistemas de armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes: características, oportunidades e barreiras	Yáscara F. F. Costa e Silva, e Edson C. Bortoni	2016	v. 22 n. 01	7.635
Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de Tubarão - SC	Osvaldo L. S. Pereira e Felipe F. Gonçalves	2008	v. 14 n. 01	7.486
<i>Investment analysis for wind energy projects</i>	Wagner Sousa de Oliveira e Antônio Jorge Fernandes	2013	v. 19 n.02	6.334
Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos	Alessandra Magrini	2011	v. 08 n. 01	4.185

Tabela 2 - Artigos mais acessados dentre os publicados a partir de 2020 (inclusive)

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de downloads
Emissões de gases de efeito estufa no setor de energia, no Brasil	Arnaldo Walter	2021	v. 27, n. 3	1.852
A multidimensionalidade da pobreza no Brasil: um olhar sobre as políticas públicas e desafios da pobreza energética	Antonella Mazzone, Talita Cruz, Paula Bezerra, Régis Rathmann, André F. P. Lucena, Roberto Schaeffer, Alexandre Szklo	2021	v. 27, n. 3	979

Tabela 2 - Artigos mais acessados dentre os publicados a partir de 2020 (inclusive) (cont.)

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de citações
Validação de dados de vento da reanálise ERA5-LAND para estimativa de potencial eólico no Estado do Rio de Janeiro	Rose Angela Hilda Wanzeler Braga, Eliane Barbosa Santos, Matheus Ferreira de Barros	2021	v. 27 n. 04	852
(In)Justiça energética: definição conceitual, parâmetros e aplicabilidade no caso do Brasil	Vinicius Eduardo Ribas, André Felipe Simões	2020	v. 26 n. 04	759
Fundamentos do planejamento energético centralizado e do descentralizado	Arthur Mendonça Quinhones Siqueira e Célio Bermann	2020	v. 26 n. 01	748

Tabela 3 - Artigos com mais citações acadêmicas; levantamento feito pelo Google Acadêmico na última semana de janeiro de 2024

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de citações
Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização	Luís Cortez, Paulo Magalhães e Júlio Happ	1992	v. 02 n.02	142
Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos	Alessandra Magrini	2001	v. 08 n. 01	117
O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas	Alexandre Uhlig, José Goldemberg, Suani Teixeira Coelho	2008	v. 14 n. 02	69
Reflexões sobre os principais programas em eficiência energética existentes no Brasil	Hamilton Moss de Souza, Paulo Augusto Leonelli, Carlos Alexandre Príncipe Pires, Valdir Borges Souza Júnior, Roberto Wagner Lima Pereira	2009	v. 15 n. 01	39
Energia solar fotovoltaica no Brasil: incentivos regulatórios	Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella, Carla Kazue Nakao Cavaliero, Ennio Peres da Silva	2008	v. 14 n. 01	38
Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de Tubarão – SC	Oswaldo L. S. Pereira, Felipe F. Gonçalves	2008	v. 14 n. 01	35
Mudança institucional e inovação na indústria brasileira de petróleo	André Tosi Furtado	2002	v. 09 n. 01	32
Planejamento energético: necessidade, objetivo e metodologia	Sérgio Valdir Bajay	1989	v. 01 n. 01	27

Tabela 3 - Artigos com mais citações acadêmicas; levantamento feito pelo Google Acadêmico na última semana de janeiro de 2024 (cont.)

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de citações
Impactos ambientais de reservatórios e perspectivas de uso múltiplo	Cruz Castro H., Fabriza M. P	1995	v. 04 n. 01	25
Processo de aprendizagem da Petrobrás: programas de capacitação tecnológica em sistemas de produção <i>offshore</i>	Adriana Gomes de Freitas, André Tosi Furtado	2001	v. 08 n. 01	23

Em nome do Comitê Editorial da RBE, agradeço a contribuição de todos os autores.

Arnaldo Walter

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

EDITORIAL

Este é o quarto número do volume 29, de 2023, da Revista Brasileira de Energia (RBE). Desde o primeiro fascículo de 2022 (Vol. 28, nº 1) estão sendo apresentadas estatísticas dos tempos de processamento das submissões, bem como dos registros de acesso às publicações. Quanto aos registros de acesso, estão sendo indicados os artigos mais acessados desde 2018, quando o monitoramento começou a ser feito, assim como os artigos mais acessados entre os publicados após 2020 (inclusive). Também estão sendo apresentados os resultados do levantamento de citações acadêmicas, entre todos os artigos já publicados pela RBE.

No presente número estão sendo publicados cinco artigos que passaram pelo processo regular de análise por pares. Os artigos estão publicados na sequência cronológica das submissões.

O artigo de Franciele Libero Espírito Santo e coautores apresenta a proposição de uma metodologia de análise da viabilidade da geração solar fotovoltaica em habitações populares. No artigo são apresentados os resultados de um estudo de caso em Adamantina-SP.

Já a contribuição de Alexandre Magno Ferreira Diniz e Manoel Barbosa dos Santos Neto é um estudo comparativo da microgeração solar fotovoltaica em duas localidades que têm condições climáticas distintas, uma no Ceará e outra no Paraná.

Gláucia Lorena Ferreira e coautores analisam pontos positivos e negativos da produção de biogás, e como a alternativa energética contribui para com o atendimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

O artigo assinado por Douglas Lamas Dias e Giuliano Arns Rampinelli versa sobre a modelagem, simulação e avaliação de desempenho de coletores solares fotovoltaicos mono e bifaciais, considerando instalações em locais em que os tipos de solo são distintos.

Por sua vez, o artigo de Felipe Braggio Molina e coautores apresenta resultados de uma análise bibliográfica sobre metodologias de desenvolvimento de projetos energéticos com emprego de fontes renováveis e não renováveis.

A RBE agradece aos colaboradores. A todos os leitores deste número da Revista Brasileira de Energia, desejo bom proveito.

Arnaldo Walter

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

SUMÁRIO

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM HABITAÇÕES POPULARES.....11

Franciele de Libero Espírito Santo, Carmen Luísa Barbosa Guedes, Juliani Chico Piai Paiva

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE O DESEMPENHO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM LOCALIDADES DE CLIMAS DISTINTOS.....32

Alexandre Magno Ferreira Diniz, Manoel Barbosa dos Santos Neto

BIOGÁS: ANÁLISE DOS PONTOS POSITIVOS E NEGATIVOS E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA ATINGIR OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS).....46

Glauca Lorena Ferreira, Sandra Regina Masetto Antunes, Eder Carlos Ferreira de Souza

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA PLANTA SOLAR COM MÓDULOS MONO E BIFACIAIS EM DISTINTOS TIPOS DE SOLO.....68

Douglas Lamas Dias, Giuliano Arns Rampinelli

PROJECT DEVELOPMENT METHODOLOGIES APPLIED TO CAPITAL PROJECTS FOCUSED ON NON-RENEWABLE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES: BIBLIOMETRIC ANALYSIS.....92

Felipe Braggio Molina, Fernando Henriques Salina, Reynaldo Palacios-Bereche, Adriano Viana Ensinas

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM HABITAÇÕES POPULARES

Franciele de Libero Espírito Santo¹
Carmen Luísa Barbosa Guedes¹
Juliani Chico Piai Paiva¹

¹Universidade Estadual de Londrina

DOI: 10.47168/rbe.v29i4.815

RESUMO

A busca pela eficiência energética, tanto no uso final, quanto na geração de energia elétrica, tem sido impulsionada em todo o mundo. No Brasil, desde 2007, a Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) decidiu consolidar sua posição, não só como produtora de Habitação de Interesse Social (HIS), mas como uma agente promotora de sustentabilidade do setor construtivo no estado de São Paulo. Pensando a energia elétrica, a primeira iniciativa foi a instalação de Sistemas de Aquecedores Solares (SAS) de água para o uso do chuveiro. O segundo passo consistiria na implementação de painéis fotovoltaicos para gerar eletricidade no local. Dessa forma, as HIS se tornariam menos dependentes da eletricidade da rede de distribuição, elevando a qualidade de vida das famílias através da redução das despesas. Sendo assim, o presente trabalho propõe uma metodologia de avaliação da viabilidade técnica e econômica para a instalação associada de painéis fotovoltaicos e aquecimento solar de água em habitações populares já construídas. Para isso, foi realizado um estudo de caso em um conjunto habitacional, localizado na cidade de Adamantina - São Paulo. O resultado obtido foi positivo, indicando que não são necessárias adequações construtivas e a Taxa de Retorno do Investimento (TIR) é maior que o custo de oportunidade de um investimento em renda fixa. Além disso, a metodologia desenvolvida para a avaliação de viabilidade pode ser replicada em diferentes empreendimentos e, se verificada a praticabilidade de implantação da geração fotovoltaica, associada as medidas de eficiência energética já regulamentadas, será um avanço na garantia dos direitos sociais das famílias de baixa renda.

Palavras-chave: Geração Distribuída; Habitação de interesse social; Baixa renda; Viabilidade econômica.

ABSTRACT

The search for energy efficiency, both in end use and in the generation of electrical energy, has been promoted throughout the world. In Brazil, since 2007, the Housing and Urban Development Company (CDHU) decided to consolidate its position, not only as a producer of Social Interest Housing (HIS), but as an agent promoting sustainability in the construction sector in the state of São Paulo. Thinking about electrical energy, the first initiative was the installation of Solar Water Heater Systems (SAS) for water use in the shower. The second step would consist of implementing photovoltaic panels to generate electricity on site. In this way, HIS would become less dependent on electricity from the distribution network, increasing families' quality of life by reducing expenses. Therefore, the present work proposes a methodology for evaluating the technical and economic feasibility for the associated installation of photovoltaic panels and solar water heating in popular housing already built. For this, a case study was carried out in a housing complex, located in the city of Adamantina - São Paulo. The result obtained was positive, indicating that no constructive adjustments are necessary and the Investment Return Rate (IRR) is greater than the opportunity cost of an investment with pre determined income. Furthermore, the methodology developed to assess viability can be replicated in different projects and, if the feasibility of implementing photovoltaic generation is verified, associated with already regulated energy efficiency measures, it will be a step forward in guaranteeing the social rights of low-income families. income.

Keywords: Distributed Generation; Social Interest Housing; Low Income; Economic Viability.

1. INTRODUÇÃO

Considerando o aumento das atividades sociais e econômicas em todo o mundo, a demanda por energia elétrica está em constante crescimento (SAMPAIO, 2017). Para atender tal demanda, as alternativas energéticas renováveis têm se tornado o foco de muitas pesquisas na busca pelo desenvolvimento sustentável (SILVA; SHAYANI; DE OLIVEIRA, 2018).

Neste caminho, nos últimos anos a energia solar fotovoltaica tem apresentado um crescimento significativo no Brasil (PEREIRA, 2019). Devido à sua localização geográfica privilegiada, o Brasil apresenta um vasto potencial para a produção de eletricidade por meio da luz solar, com uma incidência significativa de radiação solar em todo o seu território (MORAIS et al., 2021). Além disso, existem programas de incentivo, com diversas políticas públicas e iniciativas para estimular a produção e o consumo da energia fotovoltaica, entre elas destacam-

se os leilões de energia renovável (DIAS et al., 2017).

A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) divulgou que, em 2023, o Brasil atingiu um marco significativo ao atingir uma capacidade instalada de 26 gigawatts em energia solar fotovoltaica, equivalente a cerca de 11,6% da produção total de energia elétrica do país. A expectativa é que esta capacidade aumente no futuro, como resultado de novos investimentos e iniciativas políticas (RÖNNAU, 2023). O mercado de geração distribuída é um dos responsáveis por esse crescimento. Nele, os consumidores de baixa tensão instalam painéis solares em suas propriedades para gerar energia e reduzir seus custos com eletricidade. Esse mercado tem se expandido rapidamente nos últimos anos, impulsionado pela queda dos preços dos equipamentos e pelo aumento das tarifas de energia elétrica.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desde 2012 tem fomentado a implementação da energia solar fotovoltaica no Brasil, definindo diretrizes gerais para a microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica (TELES, 2015). Com base na resolução, os consumidores poderiam gerar energia elétrica e fornecer o excedente para a rede local, compensando o uso nos horários em que a geração não consegue atender a demanda da edificação.

Em novembro de 2015, a discussão em torno da REN nº 482 foi retomada com a publicação da REN nº 687. Uma nova intervenção visava simplificar o processo de conexão e ampliar o público-alvo abrangido pela REN nº 482. Além disso, em 18 de agosto de 2021, a Câmara dos Deputados aprovou o Projeto de Lei nº 5.829 de 2019, buscando revisar vários critérios atuais para projetos de micro e minigeração distribuída. O objetivo principal desse projeto era garantir a segurança jurídica e promover o desenvolvimento desse tipo de geração no cenário brasileiro, com destaque para a reforma do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Por fim, em 2022 foi formalizado o Marco Legal da Geração Distribuída, por meio da Lei nº 14.300 (SCHULTZ, 2021). Dentre outras características, ela estabelece uma fase transitória para a cobrança de tarifas de microgeradores e minigeradores pelo uso do sistema de distribuição garantindo que, até 2045, os geradores já existentes pagarão apenas tarifas com base na diferença entre o que é consumido e o que é produzido e injetado na rede de distribuição.

Com a regulamentação do setor, o uso da energia solar passou a ser incentivado também nas Habitações de Interesse Social (HIS) no Brasil. Primeiramente, através do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), criado em julho de 2009, foram estimulados os projetos incluindo sistemas de energia solar térmica, preferencialmente nas regiões sul, sudeste e centro-oeste (MAIA; LIMA; DE CARVALHO GOMES, 2019). Considerada uma experiência de sucesso pelo Governo Federal, a implantação do Sistema de Aquecimento Solar (SAS) tor-

nou-se obrigatória no ano de 2011, na segunda fase do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV2), para as unidades urbanas unifamiliares em todo o Brasil (GALAN, 2016). Na sua terceira fase, em 2017, o programa tornou obrigatórias as medidas para reduzir o consumo de energia elétrica em residências de um só pavimento nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, através de energia solar, tanto por meio de SAS quanto de Sistemas Fotovoltaicos (SFV). No ano de 2020, o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) foi substituído pelo Programa Casa Verde e Amarela. Este novo programa tem como objetivo não apenas construir e financiar unidades habitacionais, mas também desempenhar um papel na regularização fundiária e na melhoria de residências e apartamentos já edificadas (LOPES, 2021). Conforme previsto na Portaria nº 959 de 18 de maio de 2021 do Ministro de Estado do Desenvolvimento Regional, a implantação de sistemas individuais de geração de energia elétrica fotovoltaica em unidades habitacionais de interesse social tornou-se obrigatória. No ano de 2023, com a reintrodução do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), foram formuladas novas diretrizes que abrangem famílias com renda total não superior a R\$ 2.640, possibilitando que um número maior de pessoas tenha acesso à casa própria (anteriormente, o limite de renda familiar era de R\$ 1.800) (ESCOSTEGUY et al., 2023).

Diante do exposto, o presente artigo propõe uma metodologia de avaliação da viabilidade de implantação de sistema fotovoltaico (SFV) nas Habitações de Interesse Social já construídas, uma vez que a nova fase do PMCMV possibilita a aquisição de imóveis usados. A estrutura do trabalho inicia-se com a análise de um estudo de caso conduzido em um empreendimento habitacional localizado na cidade de Adamantina, no estado de São Paulo. Esta etapa foi imprescindível para que se pudesse estabelecer um padrão de consumo de energia elétrica típico das famílias de baixa renda. Com isso, foi possível projetar um sistema fotovoltaico de referência. Na sequência, foi relatada a análise técnica que se concentra nas características construtivas, seguida pela análise econômica que se baseia no retorno do investimento. Por fim, é apresentado o método replicável de avaliação de implantação de SFV. Ressalta-se que a discussão desse tema transcende as esferas de combate ao déficit habitacional e de diversificação da matriz energética, representando um avanço em direção à garantia da inclusão social e dos direitos sociais das famílias.

2. ESTUDO DE CASO

Para a elaboração da metodologia foram realizados estudos de campo. Esta etapa é importante para o estabelecimento de critérios essenciais como faixa de consumo médio de energia elétrica é característica construtivas das edificações. Com base nas informações obti-

das, dimensionou-se um sistema fotovoltaico que atendesse a demanda da HIS, e o impacto desta nova instalação foi pensado em relação a edificação.

O estudo foi realizado em um conjunto habitacional denominado Adamantina O, localizado no bairro Parque Residencial Itamarati, município de Adamantina-São Paulo. Conforme informações do IBGE, o município abrange uma extensão de mais de 411.987 quilômetros quadrados e suas coordenadas geográficas são: 21° 40' 32" Sul, 51° 3' 47" Oeste. A população projetada em 2020 era de 35.111 pessoas, com densidade populacional de 85 pessoas por quilômetro quadrado (IBGE 2020). Trata-se de um empreendimento de 45 casas, com uma área construída de 48,81 m² por unidade. As unidades também respeitam e incorporam melhorias de qualidade no setor habitacional, como piso cerâmico em todos os cômodos, azulejos nas paredes hidráulicas, hidrômetros individuais, infraestrutura completa para acessibilidade e água quente solar para banho.

A obtenção de dados foi efetuada mediante consultas à Prefeitura do município e coleta de informações em campo. Foi obtido o processo de aprovação de projeto e o manual que é entregue ao proprietário com informações de plantas de arquitetura, hidráulica, elétrica e estrutural, memorial descritivo e cálculo, e o posicionamento do aquecedor de água solar. Além disso, para o projeto do Sistema de Geração Fotovoltaica (SFV), o consumo médio de energia elétrica das famílias é uma variável relevante. Por isso, foram visitadas as 42 residências já habitadas, dentre as 45 que formam o conjunto todo. Todas as famílias disponibilizaram sua fatura de energia, possibilitando o levantamento do histórico de consumo entre os meses de outubro de 2020 e maio de 2021. Tais informações foram organizadas em uma planilha eletrônica e foi calculada a média de consumo mês a mês pelo período de oito meses, conforme a Figura 1.

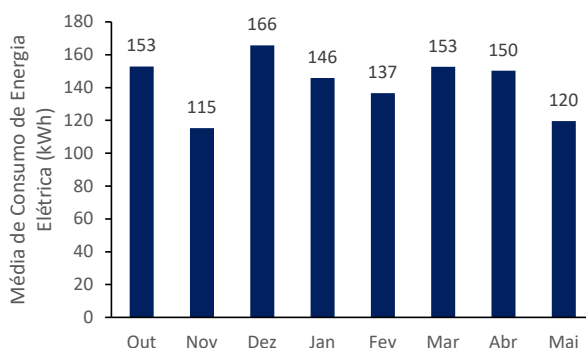


Figura 1 - Consumo mensal médio de energia elétrica das famílias de baixa renda

Na sequência, foram obtidas as figuras de mérito para a amostra, conforme a Tabela 1. A média geral, arredondada para 150 kWh/mês, se mostrou mais próxima da realidade e, portanto, foi adotada como referência para o projeto de geração fotovoltaica.

Tabela 1 – Dados estatísticos da amostra do consumo de energia elétrica

Figuras de Mérito	Consumo kWh
Média	148
Moda	169
Mediana	144
Desvio Padrão	52

2.1 Projeto fotovoltaico

Considerando o consumo médio mensal de 150 kWh, foi realizado o dimensionamento do sistema fotovoltaico pelo método analítico, e confirmado pelo software PV*SOL Premium®. Considerando que a ligação da Habitação de Interesse Social (HIS) ao sistema de distribuição seja monofásica, o Custo de Disponibilidade da rede está previsto em 30 kWh/mês. Nesse contexto, para minimizar a fatura de energia da HIS até seu valor mínimo, o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) deve produzir cerca de 120 kWh/mês.

A abordagem analítica segue os procedimentos de avaliação do potencial solar no local de implementação do sistema, considerando a temperatura ambiente e as características elétricas de painéis fotovoltaicos e inversores adequados ao projeto. Nesse sentido, foram adquiridas informações sobre a incidência solar na área de instalação, assim como a orientação e a superfície disponível no telhado. As informações sobre a radiação solar foram obtidas a partir do banco de dados do Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB). Os telhados estão geograficamente orientados para norte e sul, por isso foram consideradas as faces dos telhados voltadas para norte, a fim de maximizar a produção média diária de energia. Inseridas as coordenadas geográficas da cidade de Adamantina na plataforma CRESESB, foram obtidos os dados históricos de irradiação solar mensal em kWh/m²/dia, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Histórico de irradiação solar da cidade de Adamantina-SP

Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² /dia]													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
0° N	5,95	5,94	5,48	4,87	4,00	3,67	3,88	4,83	4,89	5,57	6,06	6,35	5,13	2,68
22 ° N	5,38	5,66	5,63	5,51	4,91	4,71	4,89	5,70	5,19	5,43	5,54	5,64	5,35	0,98
20 ° N	5,45	5,71	5,64	5,47	4,85	4,64	4,82	5,64	5,18	5,46	5,61	5,72	5,35	1,08
31 ° N	5,00	5,38	5,51	5,59	5,13	4,99	5,15	5,86	5,15	5,21	5,18	5,20	5,28	0,88

Os dados de irradiação obtidos na plataforma CRESESB são posteriormente utilizados na Equação 1 para calcular as Horas de Sol Pleno (HSP). Esse projeto é realizado pela divisão do valor de Irradiação Solar Média (ISM) do local pela constante de Irradiância (CEPEL, 2021).

$$HSP \text{ ma } (h) = \frac{5350 \text{ W h/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} = 5,35h \quad (1)$$

Para calcular a demanda diária média a ser atendida, basta dividir o consumo médio mensal de 120 kWh/mês por 30 dias, resultando em E(kWh/dia) igual a 4 kWh/dia. A potência a ser gerada por um Sistema Fotovoltaico (SFV) pode ser determinada pela Equação 2, na qual o numerador representa a demanda diária média a ser atendida, e o denominador é o produto entre a média diária anual das Horas de Sol Pleno incidentes no local e eficiência total do SFV.

$$PFV (Wp) = \frac{4000 \text{ W h/dia}}{5,35 \text{ h} * 0,70} \cong 1066,10 \text{ Wp}. \quad (2)$$

Considerando a potência total a ser gerada de 1066,10 Wp, foram escolhidos módulos fotovoltaicos que atendessem ao projeto. O modelo DAH DHM72L9-450W/BF, do fabricante DAH Solar, foi selecionado. Ele se apresenta como uma opção viável por ser de silício monocristalino, eficiência de 90% e possuir certificações nacionais e internacionais. Além disso, a empresa detém uma posição consolidada no mercado brasileiro e oferece uma garantia de 12 anos para o produto. Levando em conta a potência nominal do painel comercial selecionado, que é de 450 Wp, é preciso utilizar quatro módulos para alcançar uma potência nominal total de 1800 Wp com o sistema.

Após definir a quantidade e potência dos painéis fotovoltaicos, assim como a potência nominal total do sistema, a etapa seguinte en-

volve o dimensionamento do inversor. Este dispositivo não apenas converte corrente contínua em corrente alternada, mas também desempenha um papel crucial na interação com um distribuidor local, garantindo sincronismo, proteção e monitoramento da energia gerada. Existem diferentes classificações de inversores utilizados em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), considerando o porte e o posicionamento em relação aos arranjos fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014). Além disso, a potência do inversor deve ser igual ou superior à potência total do gerador. Nesse contexto, o modelo escolhido é o DEYE SUN200G3-US-220M-WI-FI, fabricado pela Deye. O equipamento é capaz de monitorar remotamente a geração de energia, resiste a condições climáticas adversas e tem uma durabilidade prevista de 25 anos (LOPES, 2021).

Para validar o cálculo efetuado, foi realizada uma simulação no *software* comercial PV*SOL Premium®. O *software* é amplamente reconhecido em todo o mundo por criar projetos de sistemas fotovoltaicos utilizando cenas 3D baseadas em mapas de satélite ou dados importados de drones. Além disso, as simulações utilizaram informações climáticas precisas e planejadas. A Figura 2 ilustra a simulação da projeção solar sobre os módulos fotovoltaicos.

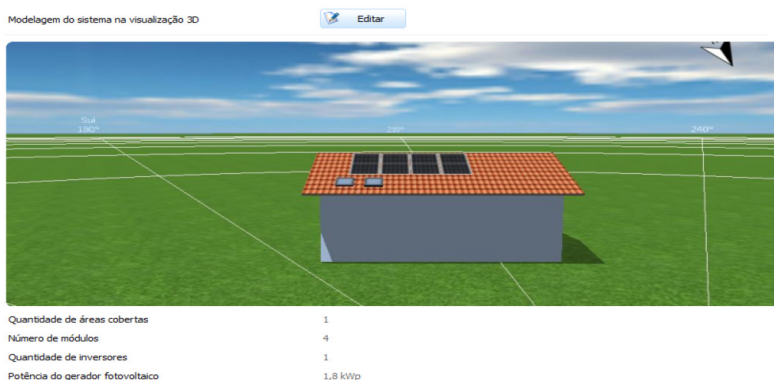


Figura 2 - Simulação do sistema solar fotovoltaico

Observa-se que os resultados obtidos com o *software* e com o método analítico foram os mesmos: quatro módulos fotovoltaicos do modelo escolhido. A Tabela 3 fornece uma descrição detalhada das características do sistema fotovoltaico.

Tabela 3 – Resumo das características do sistema fotovoltaico

Potência do sistema dimensionado	1,80 kWp
Energia estimada a ser gerada	226 kWh/mês
Área útil necessária para a instalação	10,53 m ²
Geração estimada por ano	2708 kWh/ano
Consumo	1800 kWh/ano

A Figura 3 apresenta o balanço energético do sistema, com os valores de geração de energia disponibilizado através do *software*. Observa-se que a geração de energia elétrica em todos os meses deve ser maior que o planejado, de 120 kWh, podendo atender futuras demandas dos moradores. Esse aumento também previne a falta de manutenção nos painéis que pode implicar queda na capacidade de geração.

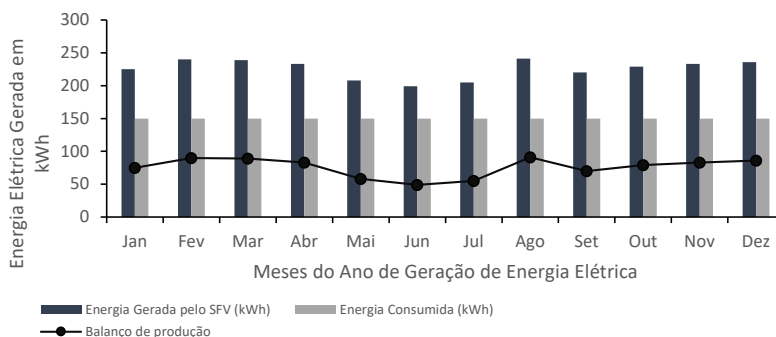


Figura 3 - Previsão do balanço geração e consumo, com sistema fotovoltaico

3. ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA CONSTRUTIVA

A Portaria nº 660 do Ministério das Cidades estipula as diretrizes para o desenvolvimento de projetos e estabelece as especificações técnicas mínimas de cada unidade habitacional no âmbito do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). Essas especificações abrangem desde a quantidade de Unidades Habitacionais (UH) em conjuntos habitacionais, até os requisitos para a determinação dos terrenos e suas integrações com os sistemas urbanos circundantes. Além disso, a portaria define aspectos inovadores, como a distribuição interna dos espaços e a quantidade mínima de cômodos, bem como

requisitos para o sistema elétrico, incluindo a quantidade de pontos de energia e iluminação, em conformidade com as normas de Desempenho de Edificações Habitacionais.

De acordo com o Memorial Descritivo, disponibilizado pela Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do estado de São Paulo (CDHU), a fundação das residências é do tipo radier, conforme demonstra a Tabela 4.

Tabela 4 – Memorial descritivo com as especificações da fundação

Fundação		
1	Tipo de fundação	<p>A fundação tipo radier será realizada no terreno compactado.</p> <p>A concretagem (concreto fck \geq 25 MPa) será feita após a execução dos sistemas elétricos, hidráulicos e sanitários.</p> <p>Há duas opções de fundação em radier, uma para solo colapsível, com espessura de 12 cm, e outra para solo não colapsível, com espessura de 10 cm; ambas serão armadas com tela Q-61 (CA-60), com reforço de armadura em uma faixa de 61 cm de largura sob as paredes, reforço de espessura nas bordas e serão executadas com lastro de brita, com altura de 5 cm sobre lona plástica preta com 1,5 micra.</p> <p>Haverá um rebaixo no radier, com altura de 30 cm, onde está localizado o banheiro e será preenchido com tijolo baiano.</p> <p>A calçada perimétrica está incorporada ao radier e terá caimento de 2% para o exterior. A cota do piso interno acabado ficará 5 cm acima da cota da calçada externa.</p> <p>Todas as etapas, bem como as especificações dos materiais a serem utilizados, serão executadas conforme detalhes constantes no projeto de fundação.</p>

O sistema de estrutura adotado é composto de alvenaria estrutural e laje do tipo mista-pré, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Memorial descritivo com as especificações de alvenaria

Estrutura Convencional		
1	Tipo de estrutura e principais características	<p>O sistema de estrutura adotado é composto de alvenaria estrutural e laje do tipo mista-pré, conforme especificação do fabricante e de acordo com o projeto estrutural, utilizando vergalhões CA50 e tela CA60 (concreto a definir com o fornecedor da laje).</p> <p>O escoramento da laje será em pontalete de madeira de pinho, eucalipto ou escora metálica.</p>

Tabela 5 – Memorial descritivo com as especificações de alvenaria (cont.)

Alvenaria Estrutural			
1	Blocos	Tipo de bloco	Bloco estrutural de concreto ou cerâmico, com resistência mínima de $f_{bk}=3,0$ MPa
		Dimensões reais (L x H x C) em cm	14 x 19 x 39 cm e família; 14 x 19 x 34 cm e família.
2	Argamassa e graute	Atenderão ao Projeto Estrutural e a norma ABNT.	

Para cobertura utilizou-se estrutura em aço, com telha cerâmica, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Memorial descritivo com as especificações de cobertura

Cobertura		
1	Estrutura	Estrutura em aço composta de pontalotes, vigas, terças, caibros, ripas e terças de sustentação, travamentos, banzos e com arremates de acabamentos em tabeiras laterais e testeiras frontais. As peças atenderão às especificações do projeto.
2	Fixação e apoio da estrutura na edificação	A estrutura em aço será apoiada e fixada em pontalotes metálicos estruturais devidamente fixados na laje de cobertura e nos oitões. A estrutura metálica será apoiada em terças de sustentação e será toda parafusada, não sendo admitido qualquer tipo de solda na obra.
3	Tipo de telha	Telha cerâmica, tipo mediterrânea, com inclinação de acordo com o projeto.
4	Tipo de condutores	Serão utilizados rufos e arremates metálicos.

A análise de viabilidade técnica está baseada nos três critérios apresentados na metodologia para definir se a edificação pode receber o SFV: alvenaria e estrutura, cobertura e fundação.

Com base no Memorial de Cálculo Estrutural fornecido pela Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU), o carregamento vertical sobre as paredes é proveniente apenas da laje e telhado, pois a residência possui apenas um pavimento térreo. Neste

caso, a laje será do tipo mista-pré, com a altura da laje de 10 cm. As cargas permanentes a serem levadas em consideração incluem o peso próprio da laje sobre as paredes, sendo calculada multiplicando o peso específico do concreto conforme a NBR 6120:2019 (25 kN/m^3) pela espessura da laje de 10 cm. A carga permanente de telhas cerâmicas, de acordo com a NBR 6120: 2019, é de $0,6 \text{ kN/m}^2$. O peso próprio da parede também foi contemplado, sendo calculado multiplicando a altura da parede pelo peso específico do bloco cerâmico vazado de 12 kN/m^3 (conforme a NBR 16868:2020) e pela espessura do bloco de 14 cm. Além disso, foi levado em consideração o graute da cinta de amarração.

No que diz respeito à carga acidental, optou-se por uma carga de $0,1 \text{ kN/m}^2$ para o forro, considerando sua acessibilidade para manutenção e a ausência de estoque de materiais. Note-se que, devido à natureza de ser uma residência popular de apenas um pavimento, as cargas aplicadas são relativamente baixas, predominantemente provenientes da laje de cobertura e do telhado. Quanto ao bloco com resistência à extensão de 3 MPa utilizado, sua resistência é significativamente superior à demanda, sendo mais do que suficiente para suportar as forças compressivas solicitadas.

Além disso, as telhas cerâmicas utilizadas na cobertura, estando sob dois apoios, podem suportar uma carga mínima de 70 kg (peso médio de um homem). Sendo assim, dependendo do tamanho do SFV a ser instalado, não haverá problemas na cobertura. Por tudo, analisar as características construtivas da edificação é de suma importância para garantir a viabilidade de implantação de um SFV, especialmente quando a instalação do sistema inclui muitas placas. No caso em estudo, são somente quatro módulos com peso médio de 20 kg, totalizando 80 kg. Por isso, não há comprometimento da estrutura elaborada e nem a necessidade de reformas ou adequações.

4. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA – FINANCEIRA

O primeiro ponto a ser abordado refere-se à sistematização das informações dos custos de implementação do projeto fotovoltaico. O valor total do investimento necessário para implementar o sistema foi determinado por meio de uma pesquisa de mercado. Foram levados em conta os custos dos painéis solares, cabos, inversor, sistema de proteção corrente contínua e as estruturas para suporte de fixação dos painéis, conforme indicado na Tabela 7.

É importante ressaltar que a área necessária para disposição dos painéis é de $8,10 \text{ m}^2$. Por isso, o módulo fotovoltaico escolhido é em silício monocristalino, mais eficiente em áreas com menor disponibilidade de espaço para a instalação.

Tabela 7 – Custo total de projeto do sistema solar fotovoltaico.

Material
04 Módulos Dah Dhm72I9-450w/Bf
01 Micro Inversor Deye Sun2000g3-Us-220 M/Wi-Fi
01 Kit Fixação Fibromadeira 04 Módulos
Instalação, Engenharia e Homologação
TOTAL: R\$ 9.840,68

A segunda variável para determinação da economia gerada pelo SFCR diz respeito à tarifa de energia da distribuidora local. No caso em análise, o valor da tarifa de energia pode ser encontrado no site da Energisa e é de R\$ 0,79 por kWh, incluindo os impostos correspondentes (ENERGISA, 2021). O aumento médio anual na tarifa de energia elétrica pela entrega da concessionária Energisa foi calculado com base nos reajustes realizados nos últimos anos, resultando em uma média de 28% ao ano (ACENDE BRASIL, 2020).

O IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo) considerado foi de 4,40% ao ano e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) para analisar a viabilidade deste investimento foi definida com base na média anual da taxa de rendimento da poupança, no valor de 4,35% ao ano (SOLDERA; KÜHN, 2018). A Tabela 8, mostra os parâmetros considerados para equacionar a viabilidade econômica.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados para o método do fluxo de caixa

Parâmetros	Valor
Custo do sistema fotovoltaico	R\$ 9840,68
Tarifa de energia elétrica	0,79 kWh
Custo de disponibilidade do sistema	R\$ 600/ano
Reajuste tarifário	28% ao ano
Vida útil	25 anos
Custo de oportunidade TMA	4,35% ao ano
IPCA	4,40% ao ano

Os resultados obtidos para os indicadores econômicos estão apresentados na Tabela 9. Ao analisar os resultados pode-se concluir que o sistema de microgeração fotovoltaico proposto é economicamente viável por ambos os métodos de análise. Tanto o Valor Presente Líquido (VPL) quanto a Taxa Interna de Retorno (TIR) do sistema apresentam valores negativos apenas nos três primeiros anos de operação. Após esse período, a economia nas faturas de energia elétrica,

combinada com o aumento da tarifa, faz com que o VPL se torne rapidamente positivo e o TIR do sistema ultrapasse o custo de oportunidade de um investimento em renda poupança.

Tabela 9 – Resultados da análise de viabilidade econômico-financeira

Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 28.205,90
Taxa Interna de Retorno (TIR)	48,28% ao ano
Retorno do Investimento (<i>Payback</i>)	04 anos

De acordo com o fluxo de caixa anual resultante, fluxo de caixa descontado e acumulado pelo sistema, pode-se ter uma análise econômica prévia à instalação do sistema indicando que o sistema estará pago em quatro anos, conforme demonstra a Figura 4.



Figura 4 - Demonstrativo do retorno do investimento

Este é o resultado para uma única casa. Entretanto, se o investimento for pensado como uma proposta para o conjunto habitacional, ou seja, 45 casas, fazendo parte da política pública de habitação o investimento passa a ser de R\$ 442.830,60. De acordo com a planilha orçamentária disponibilizada pela CDHU o custo total da obra foi de R\$ 4.383.170,92, neste caso, o impacto da instalação de sistema fotovoltaico no empreendimento corresponderia a aproximadamente 10% do custo total previsto.

5. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM HIS

Considerando cada uma das etapas avaliadas neste artigo, foi possível desenvolver um método que tem por objetivo descrever todas as etapas essenciais para a elaboração de um projeto de sistema fotovoltaico conectado à rede em habitações de interesse social, podendo assim ser replicada em empreendimentos semelhantes. O passo a

passo da metodologia é apresentado de forma descritiva abaixo, e também em tópicos, conforme Tabela 10.

1 - Levantamento e Tratamento de Dados: identificar o consumo médio mensal (kWh) de cada HIS através das faturas de energia elétrica, ou utilizar os 150 kWh obtidos no estudo de caso aqui apresentado se a edificação for semelhante.

Além disso, é imprescindível identificar as áreas dos telhados onde os módulos possam ser fixados, a distância entre o sistema instalado e quadro geral de distribuição da unidade consumidora, assim como os ângulos azimutais e de inclinação dos telhados, de tal forma que se possa extrair o melhor aproveitamento da radiação solar.

Os dados geográficos e climáticos das HIS, as coordenadas de localização e a Irradiação Solar Média são também de extrema importância para a elaboração do projeto fotovoltaico.

Ainda, deve-se conhecer as características construtivas da habitação, especialmente o tipo de fundação, alvenaria e estrutura, e a cobertura, bem como as cargas suportadas por estes elementos.

2 - Projeto Fotovoltaico: dimensionar o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede com base nas normas técnicas é fundamental. Para realizar esse processo, é preciso primeiro calcular a Irradiação Solar Média no Local e, em seguida, as Horas de Sol Pleno. Com essas informações, e conhecendo ou estimando o consumo alvo em kWh, é possível determinar a Potência Total necessária para atender à demanda. É importante ressaltar que o rendimento considerado nesse cálculo pode variar de 70% a 80%.

Neste momento, é importante realizar uma pesquisa de mercado para verificar os módulos disponíveis, características elétricas e preço. Os módulos mais prevalentes no mercado são os de silício monocristalino e policristalino. É crucial observar que os módulos monocristalinos são mais eficientes, pois geram a mesma quantidade de energia elétrica ocupando uma área menor.

Conhecendo a Potência Total do sistema, pode-se escolher o melhor módulo comercializado para atender aquela necessidade e, com a potência de cada módulo, estimar a quantidade de módulos necessários.

Na sequência devem ser definidos os inversores. O principal critério nesta etapa é garantir que a tensão de saída do sistema fotovoltaico seja o mais próxima possível da tensão de operação do inversor, admitindo-se variação para menos.

3 - Viabilidade Técnica Construtiva: considerando o investimento alto a ser realizado em um SFV, a estrutura da edificação deve ser avaliada sob o ponto de vista da carga extra que será adicionada à

cobertura. Nesta etapa, é importante identificar a técnica de fundação, alvenaria e estrutura, e cobertura da HIS, incluindo as telhas. Além disso, deve-se verificar qual foi a carga acidental planejada para a edificação.

Conhecendo a quantidade de painéis fotovoltaicos necessários para atender a demanda planejada, e o peso de cada um deles, é possível verificar se a carga extra adicionada poderá impactar a edificação, se são necessários reforços ou reformas, ou se a instalação pode prosseguir de forma segura, sem nenhum ajuste.

4 - Viabilidade Econômica – Financeira: tendo determinado o SFVCR que irá atender a habitação, definidos os módulos e o inversor, é possível estimar o custo de implantação do sistema. Neste momento é importante também determinar os custos de reforma e/ou reforços na edificação, se necessário.

Os custos de manutenção são geralmente insignificantes em instalações desse tipo, pois tendem a ser mínimos. Na maioria dos casos, limitam-se apenas à limpeza dos módulos.

Com base na tarifa de energia elétrica local, reajustes tarifários anuais e a capacidade de geração do SFVCR, pode-se estimar a economia proporcionada pelo sistema fotovoltaico.

Além disso, é necessário calcular os indicadores econômicos para confirmar as previsões. Os indicadores escolhidos neste estudo foram a Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e o Retorno do Investimento (Payback).

Por fim, é possível calcular qual seria o acréscimo financeiro ao empreendimento como um todo se o SFV fosse implantado nas habitações. Para isso, basta multiplicar o custo de uma casa pelo número de casas do conjunto habitacional e, conhecendo o custo total da obra, estimar quanto a inserção da geração distribuída iria onerar. Desta forma, é possível verificar se a implantação do sistema é interessante ou não para o empreendimento em análise.

Tabela 10 – Método para a analisar a viabilidade de implementação de um sistema fotovoltaico

Levantamento de dados
<ul style="list-style-type: none"> • Identificar o Consumo Médio Mensal (kWh) de cada HIS através das faturas de energia elétrica. Caso o empreendimento ainda não tenha sido habitado, é possível estimar o consumo (linha base) através de simuladores de consumo das concessionárias de energia elétrica. • Identificar as áreas dos telhados onde os módulos possam ser fixados, a distância entre o sistema instalado e quadro geral de distribuição da unidade consumidora. Levantar os dados geográficos e climáticos das HIS, as coordenadas de localização e a Irradiação Solar Média.

Tabela 10 – Método para a analisar a viabilidade de implementação de um sistema fotovoltaico (cont.)

Projeto fotovoltaico
<ul style="list-style-type: none"> • Determinar a Irradiação Solar Média no local e, então, as horas de sol pleno. Com esta informação e conhecendo ou estimando o consumo alvo (kWh), pode-se determinar a Potência Total necessária para atender a demanda. • Neste momento, será importante realizar uma pesquisa de mercado para verificar os módulos fotovoltaicos. Na sequência devem ser definidos os inversores.
Viabilidade técnica construtiva
<ul style="list-style-type: none"> • Considerando o investimento alto a ser realizado em um SFV, a estrutura da edificação deve ser avaliada sobre o ponto de vista da carga extra que será adicionada a cobertura. • Nesta etapa, é importante identificar a técnica de fundação, alvenaria e estrutura, e a cobertura da HIS, incluindo as telhas. Além disso, deve-se verificar qual a carga acidental planejada para a edificação.
Viabilidade econômica-financeira
<ul style="list-style-type: none"> • Tendo determinado o SFVCR que irá atender a habitação, definidos os módulos e o inversor, é possível estimar o custo de implantação do sistema. • Com base na tarifa de energia elétrica local, reajustes tarifários anuais e a capacidade de geração do SFVCR, pode-se estimar a economia proporcionada pelo sistema fotovoltaico. • Ainda, devem ser estimados os indicadores econômicos para confirmar, ou não, a viabilidade de implantação do sistema. Os indicadores selecionados neste estudo foram Taxa Interna de Retorno, Valor Presente Líquido e o Retorno do Investimento.

6. CONCLUSÃO

Considerando os consumidores residenciais de baixa renda, para os quais as despesas com energia elétrica comprometem uma parcela significativa do orçamento doméstico, ações que resultem na redução desses gastos são atrativas e devem ser avaliadas.

O Programa Minha Casa Minha Vida tornou obrigatória em 2021 a instalação de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos individualizados nas unidades habitacionais de interesse social. A partir da obrigatoriedade, o presente trabalho propôs uma metodologia que possibilite a análise da viabilidade de implantação do sistema sob o ponto de vista da técnica construtiva e econômico-financeira em habitações já existentes.

Do ponto de vista técnico, de acordo com os resultados obtidos, verificou-se que residências populares de um pavimento, como as apresentadas no estudo de caso, possuem carregamentos baixos por serem basicamente da laje de cobertura e telhado, para o bloco com fbk 3 MPa utilizado. Portanto, as paredes em alvenaria possuem uma resistência significativamente superior à demanda, sendo mais do que

adequadas para suportar os esforços de especificidade.

De acordo com os resultados obtidos do ponto de vista econômico, a aplicação dos indicadores evidencia a viabilidade da proposta de implantação do sistema fotovoltaico, com investimento de R\$9.840,68 e tendo como resultado o retorno do investimento no período de quatro anos. Este é o resultado para uma única casa. Entretanto, se o investimento for pensado como uma proposta para o conjunto habitacional, ou seja, 45 casas, fazendo parte da política pública de habitação, o investimento passa a ser de R\$ 442.830,60. Neste caso, o impacto da instalação do sistema fotovoltaico no empreendimento corresponderia a aproximadamente 10%.

Por fim, o estudo de caso permitiu uma avaliação positiva da instalação de um sistema fotovoltaico em habitações populares. Além disso, foi possível desenvolver uma metodologia que pode ser replicada em diferentes construções de interesse social para verificação da viabilidade de implantação do sistema de geração fotovoltaica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482. [S. l.], 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 20 maio 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 687. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 20 maio 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 956. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>. Acesso em: 20 maio 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 510: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). 2023: o melhor ano da energia solar no Brasil. São Paulo, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15571-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16149: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16150: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16274: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para a documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT/CB-003 NBR 16690: instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos. 2º projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR NM 60669: Interruptores para instalações elétricas fixas domésticas e análogas - Parte 1: Requisitos gerais (IEC 60669-1:2000, MOD). Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 6122: Projeto e execução de fundação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT IEC NBR 62116: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BOQUIMPANI, Carolina Lannes et al. Eficiência energética: sistemas de iluminação com LEDs, distribuídos em corrente contínua e utilizando energia fotovoltaica. *Ambiente Construído*, v. 19, p. 303-316, 2019.

DIAS, C. T. C.; SILVA, W. K. M.; FREITAS, G. P.; NASCIMENTO, J. F. Energia solar no Brasil. *Revista InterScientia*, v. 5, n. 1, p. 153-165, 2017.

ESCOSTEGUY, C. L.; GUARESCHI, N. M. F.; REIS, C. “Programa Minha Casa Minha Vida, o Sonho da Casa Própria e a Construção do Sujeito Endividado*.” *Revista Mosaico*, [s. l.], v. 16, p. 133-143, 2023.

GALAN, J. R. Avaliação da Utilização de Aquecimento Solar de Água para Casas do Programa Minha Casa Minha Vida no Conjunto Habitacional Milton De Paula Walter na Cidade de Campo Mourão - Paraná. Orientador: Prof. Msc. Roberto Widerski. 2016. 38 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

GALVÃO, A. O. Os Impactos da Lei nº 14.300/2022 em Projetos de Microgeração e Minigeração Fotovoltaica. Orientador: Felipe Sass. 2023. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2023.

LOPES, D. W. O. Implementação de Sistemas Fotovoltaicos em Habitações de Interesse Social no âmbito do Programa Minha Casa Minha Vida. Orientador: Paula Meyer Soares. 2021. 201 f. Monografia (Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

MAIA, D. S. et al. Energia Solar Em Habitações Populares: Uma Experiência na Política Habitacional Brasileira. V Simposio Internacional de la História de la Electrificación, [S. l.], ano 2019, 11 maio 2019. La electricidad y la transformación de la vida urbana y social, p. 861-879.

MELO, S. S. Análise Comparativa entre Programas Governamentais de Habitação: Programa Minha Casa Minha Vida e Programa Casa Verde e Amarela. Orientador: Prof. Alexandre de Carvalho Paranaíba. 2021. 24 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Contábeis) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2021.

MORAIS, F. H. M. et al. Influência da Irradiação Solar na Análise de Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos. Revista Brasileira de Meteorologia, [S. l.], ano 2021, p. 1982-4351, 6 dez. 2021.

MOREIRA JÚNIOR, O.; SOUZA, C. C. Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha. Interações (Campo Grande), v. 21, p. 379-387, 2020.

MOURA, G. G.; FERREIRA, L. F. Plano nacional de habilitação: atual cenário do programa minha casa minha vida. CaderNAU, v. 7, n. 1, p. 65-80, 2014.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 03/2014. 530 p.

RÖNNAU, M. Indicadores de Desempenho para a qualificação e desenvolvimento de Empresas Integradoras de Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. Orientador: Juliana Klas. 2023. 19 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Gestão de Energia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2023

SAMPAIO, R. F. Sistema de Automação Distribuído: Uma Abordagem Baseada em Multiagente Aplicada a Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em Média Tensão. Orientador: Profa. Ph.D. Ruth Pastôra Saraiva Leão. 2017. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SCHULTZ, A. Análise da Viabilidade Econômica da Utilização do Sistema Fotovoltaico em Habitações de Interesse Social em Belo Horizonte, MG. Orientador: Dr.a Eleonora Sad de Assis. 2021. 90 p. Monografia (Especialista em Sustentabilidade em Cidades) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SILVA, L. R. J. R.; SHAYANI, R. A.; DE OLIVEIRA, M. A. G. Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica, com levantamento de custos ambientais. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018.

SOLDERA, D.; KÜHN, D. D. Indicadores de viabilidade financeira: considerações sobre instrumentos de análise.

TELES FILHO, P. M. C. Estudos da Viabilidade Econômica da Micro e Minigeração Fotovoltaica à Luz da Resolução Normativa nº 482 da Aneel. Orientador: Demercil de Souza Oliveira Júnior. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

WIVES, D. G.; KÜHN, D. D. (Org.). Gestão e planejamento de agroindústrias familiares. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2018. p. 41-59, 2018.

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE O DESEMPENHO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM LOCALIDADES DE CLIMAS DISTINTOS

Alexandre Magno Ferreira Diniz¹
Manoel Barbosa dos Santos Neto¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

DOI: 10.47168/rbe.v29i4.828

RESUMO

A microgeração distribuída fotovoltaica está cada vez mais presente nas residências e em pequenos comércios. O monitoramento e supervisão regular de Sistemas Fotovoltaicos Distribuídos (SFD) conectados à rede de distribuição são importantes e necessários para garantir uma geração de energia ótima e confiável. O objetivo da pesquisa é fazer uma análise de desempenho comparativa por meio dos índices de méritos de SFD instalados em duas instituições de ensino tecnológico situadas nas regiões Nordeste e Sul do Brasil. O SFD do Instituto Federal do Ceará (IFCE) está situado no interior do Nordeste, nas coordenadas geográficas 7° 14' 14" Sul e 39° 19' 20" Oeste. O SFD da Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR) está situado no Sul, nas coordenadas geográficas 25° 30' 16" Sul e 49° 19' 5" Oeste. As análises consideram os índices de mérito de *final yield*, *reference yield* e taxa de desempenho para o período de um ano. Os resultados do *final yield* apontaram que o SFD IFCE gerou em média anual 20% a mais que o SFD UTFPR. O índice *performance ratio* para ambos SFD do IFCE e UTFPR mostra uma média anual em torno de 73%, que está próximo dos valores de referências mundiais, geralmente em torno de 80%. A curva da taxa de desempenho do SFD IFCE é quase linear e encontra-se na faixa de 70 a 80%. Para o SFD UTFPR essa mesma curva tem maior variação e encontra-se na faixa de 60 a 80%. Mesmo com a grande diferença climática entre as regiões, os resultados demonstraram que a geração de energia em ambos SFD tem excelentes desempenhos, sendo uma fonte alternativa de energia viável para minimizar a pressão pela geração nas hidrelétricas.

Palavras-chave: Microgeração distribuída; Fotovoltaico; Índices de mérito.

ABSTRACT

Grid-Connected Photovoltaic Power System for microgeneration is increasingly present in homes and small businesses. Regular monitoring and supervision of Distributed Photovoltaic Systems (DPS) connected to the distribution network is meaningful and necessary to ensure optimal and reliable energy generation. The research aims to compare the performance of two systems using the merit indexes of SFDs installed in two technological education institutions located in the Northeast and South regions of Brazil. The SFD at the Federal Institute of Ceará (IFCE) is located in the interior of the Northeast, at the geographical coordinates 7° 14' 14" South and 39° 19' 20" West. The SFD of the Technological University of Paraná (UTFPR) is located in the South, at the geographical coordinates 25° 30' 16" South and 49° 19' 5" West. The analyses considered the merit indices of final yield, reference yield, and performance rate for one year. The final yield results showed that the IFCE SFD generated an annual average of 20% more than the UTFPR SFD. The performance ratio index for the IFCE and UTFPR SFDs shows an annual average of around 73%, which is close to world benchmarks, generally around 80%. The performance ratio curve for the IFCE SFD is almost linear and lies in the 70-80% region. For the UTFPR SFD, this same curve has more variation and is in the 60-80% range. Despite the climatic differences between the Regions, the results show that power generation in both SFDs has excellent performance and is a viable alternative energy source for minimizing the pressure on hydroelectric plants.

Keywords: Grid-Connected; Photovoltaic; Merit indices.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a micro ou minigeração distribuída se concretizou a partir da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece o sistema de compensação de energia elétrica e permitiu que o consumidor pudesse instalar sistemas geradores a partir de fontes renováveis em sua unidade consumidora, conectado a rede de distribuição elétrica, a fim de reduzir a conta de energia. Adicionalmente, a lei nº 14.300 de 06 de janeiro de 2022 institui o marco legal da micro e minigeração, do sistema de compensação de energia elétrica e do programa de energia renovável social (BRASIL, 2022).

Nos últimos anos, o Brasil experimentou um aumento muito expressivo na procura da geração fotovoltaica. Em 2018, a geração distribuída superou mais de 20 mil instalações, com atendimento a 30 mil unidades consumidoras, com potência instalada total de 247,3 MW

(ANEEL, 2018). Em 2017, a potência instalada foi de 113,2 MW (ANEEL, 2017). Fazendo a comparação entre os dois anos, o incremento em 2018 foi mais de 100%.

Alguns fatores podem ser apontados como determinantes para alcançar esses índices: os preços mais acessíveis da aquisição do sistema; os constantes aumentos das tarifas elétricas; os preços mais acessíveis dos equipamentos, ocasionados com o aumento da demanda; e o acirramento da concorrência das empresas instaladoras, que baixaram o preço dos serviços de instalação. Nesse cenário promissor, os pequenos e médios comerciantes e as residências estão buscando na geração distribuída a solução para reduzir os custos mensais da conta de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica classificam-se em sistemas centralizados e distribuídos (RÜTHER et al., 2005). Os sistemas fotovoltaicos centralizados são usinas geradoras de porte elevado, acima de 5 MW, instaladas no solo, ocupam grandes áreas e se localizam distantes do ponto de consumo. Por outro lado, o Sistema Fotovoltaico Distribuído (SFD) é instalado junto ao ponto de consumo, e muitas vezes os painéis são colocados nos telhados das edificações.

Do ponto de vista da eficiência energética, muitos dos SFD nem sempre conseguem alcançar uma geração ótima. Nas cidades, a baixa eficiência da geração fotovoltaica é provocada por muitos fatores, por exemplo: sombreamento sobre os painéis fotovoltaicos provocados pelas árvores ou prédios; a não adequação do posicionamento dos painéis devido a inclinação do telhado das residências; as altas temperaturas do local; e o acúmulo de sujeira com a falta de manutenção. O resultado disso é que a previsão inicial de geração é prejudicada, frustrando as expectativas do consumidor quanto à geração. Associado a esses problemas, outros tipos de perdas ocorrem para quaisquer formas de energia, quais sejam a térmica, mecânica, ou elétrica.

Alguns procedimentos podem ser adotados para melhorar a eficiência do sistema. Além de um projeto fotovoltaico adequado, o levantamento, monitoramento e a supervisão regular dos índices de mérito são necessários para garantir um nível de geração próximo ao ponto ótimo e confiável (URBANETZ JUNIOR et al., 2014). Mais ainda, a implantação de sistemas de medição para monitoramento e gerenciamento, e o controle das instalações podem auxiliar no ganho da geração de energia (MARCHAIS, 2013). Corroborando, Filgueiras (2006) explica que os sistemas de gerenciamento de energia têm como objetivos avaliar as perdas na rede elétrica, analisar os pontos de estrangulamento, controlar a demanda, detectar pontos quentes (*hot spot*), verificar o comportamento e a confiabilidade do sistema, e garantir a qualidade da energia.

Os índices de mérito são determinados a partir de três variáveis: energia gerada, potência instalada e irradiação incidente. Dentre essas variáveis, a irradiação incidente é a mais difícil de ser obtida. No Brasil existem bancos de dados que abrangem todo o país, formando a base de dados solarimétricos do Atlas Brasileiro de Energia Solar, que é disponibilizada pelo INPE. Nesse banco de dados é possível obter a irradiação solar média diária. Os índices de mérito são usados para comparar dois sistemas quanto à capacidade de geração de energia.

A pesquisa aqui reportada compara dois sistemas SFD instalados em instituições de ensino tecnológico. O Instituto Federal do Ceará (IFCE), campus Juazeiro do Norte, e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), unidade *Neoville*. O objetivo da pesquisa é fazer uma análise de desempenho comparativa de SFD instalados em duas instituições de ensino tecnológico, situados nas regiões Nordeste e Sul do Brasil, de condições climáticas bem diferentes. Na análise de desempenho são considerados os índices de mérito de *final yield*, *reference yield* e *performance ratio*, que são comumente usados nesse tipo de análise.

2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM SFD

Narimatu et al. (2018) fizeram a avaliação de desempenho de um sistema fotovoltaico de 14,56 kWp conectado à rede de distribuição, localizado no município de Serra-ES. O estudo fez a comparação de dados obtidos aplicando modelos fotovoltaicos com dados do sistema de geração fotovoltaica real. Além disso, os autores compararam o sistema fotovoltaico real com outros dois sistemas fotovoltaicos instalados no município de Curitiba-PR, distante 1091 km. O rendimento médio do sistema no município de Serra foi de 88,28%, e nos sistemas localizados no município de Curitiba-PR a média foi em torno de 70%. Os autores concluíram que o município de Serra-ES é o mais propício para a instalação de sistemas fotovoltaicos, pois a localidade apresenta altas taxas de irradiação solar, com alto rendimento quando comparadas com o município de Curitiba-PR.

Um estudo de avaliação de desempenho foi realizado na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, que possui um sistema fotovoltaico com potência instalada de 275 kWp. Mendes (2016) aplicaram o coeficiente de desempenho (*Performance Ratio*) como índice de mérito. Nos estudos dos efeitos do sombreamento que envolve o sistema, foi aplicado o modelo *clear-sky* para levantar a curva de radiação solar, com dados meteorológicos extraídos na própria faculdade. Para tanto, foram instalados sensores de radiação e temperatura junto aos painéis. Os dados meteorológicos coletados foram confrontados por um simulador meteorológico de modelo baseado em médias

interpoladas de dados históricos. O estudo foi capaz de identificar falhas na geração do sistema fotovoltaico.

Seme et al. (2019) apresentaram uma análise do desempenho de um sistema fotovoltaico na Eslovênia. Nos estudos foram utilizados os índices de mérito de *Performance Ratio*, *Final Yield*, e *Capacity Factor* aplicados em sistemas fotovoltaicos distribuídos no território do país, no total de 3.326 painéis, sendo a maioria residenciais. Para os autores, os melhores resultados são alcançados no inverno e, em alguns casos, a neve sobre as placas reduz a área do painel. A redução da eficiência no verão é causada pela as altas temperaturas que incidem sobre os painéis.

Borges Neto e Carvalho (2014) explicam a importância da medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre, para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas. Segundo os autores, um histórico meteorológico é determinante para viabilizar a instalação de sistemas térmicos e fotovoltaicos em regiões de grandes variações da intensidade da radiação solar.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SFD do IFCE

No IFCE, campus Juazeiro do Norte, o SFD é denominado de estacionamento solar e está localizado nas coordenadas geográficas de 7° 14' 14" Sul e longitude 39° 19' 20" Oeste, altitude de 377 m. O período de precipitação de chuvas é concentrado nos quatro meses do início do ano. Essa localização tem alto índice de irradiação solar, com média diária anual de 5,5 horas, e temperatura média máxima de 30,4°C (CLIMATE DATA, 2019).

Os painéis fotovoltaicos do estacionamento solar são da marca *Yangli*, fabricados com células de silício policristalino. Os principais valores de parâmetros na placa de dados do painel são: tensão em circuito aberto de 38,7 V; tensão de pico de 30,6 V; corrente de curto-circuito de 8,88 A; e corrente de pico de 8,32 A. Para conectar o sistema fotovoltaico à rede elétrica do campus é usado um inversor fotovoltaico monofásico de potência nominal de 5 kWp da marca Omnik. Esse tipo de inversor possui duas entradas para corrente contínua e dispõe de comunicação de internet por meio de rede sem fio. O inversor tem os seguintes parâmetros: eficiência 97,6%; tensão nominal em Corrente Alternada (CA) de 220 V; tensão nominal em Corrente Contínua (CC) de 590 V; tensão MPPT de operação na faixa de 120-550 V; e corrente máxima em CC de 20 A. Os painéis ocupam uma área de 18 m², com o total de potência instalada de 4,6 kWp. A estrutura e posicionamento dos painéis são mostrados na Figura 1.



Figura 1 - (a) Detalhes da estrutura metálica e
(b) Painéis fotovoltaicos instalados

O sistema fotovoltaico foi montado com dois arranjos de oito painéis em série cada um. Nas condições de máxima potência, um arranjo fotovoltaico entrega a potência de 2010 W, na tensão de 244,5 V nos terminais CC, e com corrente de 3,82 A. Um cubículo em alvenaria foi construído para abrigar o inversor solar e os quadros de elétricos para corrente contínua e corrente alternada. A Figura 2 mostra detalhes internos desse cubículo.



Figura 2 - Inversor no lado direito e os quadros elétricos CC e CA no lado esquerdo da imagem

Por conveniência, foi utilizado um quadro de comando e proteção em corrente contínua para cada arranjo fotovoltaico. Os quadros são compostos de dois fusíveis, um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) e uma chave seccionadora. Além, disso, na saída do inversor (lado da corrente alternada) o quadro possui um DPS e disjuntor bipolar. Todo sistema possui aterramento do tipo TT, e a

massa metálica da estrutura e dos painéis é conectada ao aterramento.

3.2 SFD da UFPR

O SFD da sede NEOVILLE encontra-se localizado nas coordenadas geográficas 25° 30' 16,55" Sul e 49° 19' 5,75" Oeste, dentro do complexo de prédios da UFPR. A irradiação solar tem média diária anual de 4,5 horas e a temperatura média máxima é de 18°C (CLIMATE DATA, 2019).

O sistema é composto de 34 painéis fotovoltaicos solares de silício policristalino, com um conjunto de 17 painéis em série para cada arranjo, com capacidade total de 10,2 kWp. Estão instalados sobre o telhado existente do barracão principal do Campus, conforme ilustrado na Figura 3.



Figura 3 - SFD da UTFPR

Os painéis estão orientados para o norte, fixados em uma estrutura metálica, e inclinados com ângulo de acordo com a localização geográfica. Os painéis estão interligados a um inversor de modelo CPS SCA 10KTL-DO da Chint Power, de potência 10 kW. Esse inversor tem os seguintes parâmetros: eficiência 98,2%; tensão nominal em Corrente Alternada (CA) 400 V; tensão nominal em Corrente Contínua (CC) 600 V; tensão MPPT de operação 250-950 V; e corrente máxima em CC 17 A (SANTOS et al., 2017).

3.3 Índices de mérito

A metodologia empregada para estimar os índices de mérito considera três índices muito usados em estudos de sistemas fotovoltaicos: o índice de Produtividade, o *Reference Yield*, e a taxa de desempenho. Esses três índices são comuns em análises de desempenho de sistemas fotovoltaicos e estão estabelecidos na norma IEC 61724, de 1998.

O índice de Produtividade, ou *Final Yield* (Y_F), corresponde à

relação da energia gerada, em kWh, pela potência instalada do sistema, em kWp, ou seja, trata da geração de energia do sistema. Este índice permite analisar a energia produzida por um sistema, sendo um bom índice de comparação entre sistemas de dimensões distintas e em regiões de diferentes condições meteorológicas (IEC 61724, 1998). A formulação do *Final Yield* é mostrada na Equação 1.

$$Y_F = \frac{E}{P} \quad (1)$$

onde E é a energia nos terminais de saída do sistema em kWh e P é a potência instalada em kW.

O segundo índice de mérito do estudo é o *Reference Yield*. Este índice é um indicador do recurso solar disponível para geração fotovoltaica, sendo função das condições meteorológicas do local, do posicionamento dos painéis e da variabilidade meteorológica (mensal ou anual). É determinado pela Equação 2.

$$Y_R = \frac{H(t)}{G_{ref}} \quad (2)$$

em que $H(t)$ é a irradiação sobre os painéis, em kW, e G_{ref} é a irradiância de referência, que tem valor de 1000 W/m^2 , definido nos termos das condições de testes padrão na temperatura de 25°C .

A taxa de desempenho, ou *Performance Ratio*, é o último índice de mérito utilizado no estudo, que trata das perdas gerais do sistema. O *Performance Ratio* é uma unidade de medida que atribui um fator de qualidade ao sistema e baseia-se na relação entre o rendimento real de um sistema fotovoltaico e o rendimento esperado obtido de modelos de geração fotovoltaica (MARION et al., 2005). A expressão para o *Performance Ratio* é formulada na Equação 3.

$$P_R = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (3)$$

Este último indicador é adimensional, e indica se o sistema funciona de acordo com o esperado. Para períodos curtos, as análises consistem em identificar falhas no sistema. Normalmente é determinada uma periodicidade de avaliação (diária ou mensal). No entanto, para períodos longos pode-se fazer análises de comportamento das condições de degradação dos painéis durante a do sistema.

4. RESULTADOS

No caso da instalação no Ceará, a estação meteorológica mais próxima encontra-se na cidade vizinha, Barbalha-CE, distante 12 km do estacionamento solar. Os dados de irradiação mensal foram obtidos nas bases de dados da INMET referentes à estação (7°18'00.0" Sul 39°16'12.0" Oeste). De acordo com a Figura 4, os maiores índices de irradiação solar ocorrem entre os meses de setembro a janeiro. Esses meses têm as maiores temperaturas, alta isolação (baixa ocorrência de nuvens) e baixa umidade.

A Figura 4 mostra a comparação da irradiação diária média no plano do painel (kWh/m²) da instalação da UFPR com dados da região do IFCE (2020-2021).

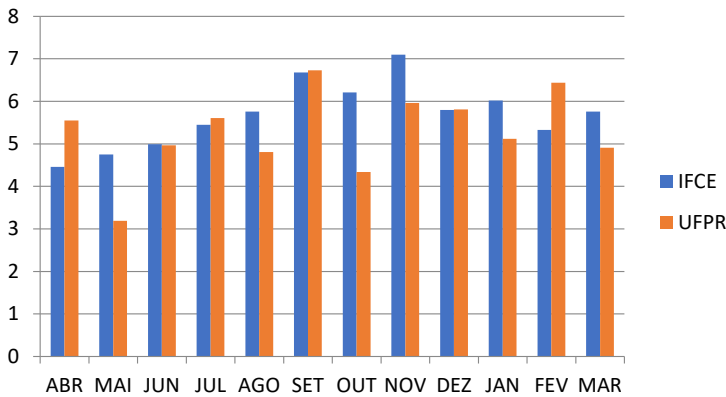


Figura 4 - Irradiação diária média (kWh/m²) no plano do painel

De acordo com a Figura 4, no IFCE os valores máximo e mínimo são observados nos meses de novembro e abril, respectivamente. Na UFPR esses mesmos valores encontram-se nos meses de setembro e maio. Ainda, no IFCE a irradiação média diária com valores acima de 5 kWh/m² são registrados em nove meses do ano, e na UFPR esses valores ocorrem em sete meses. Outro dado importante é a faixa de variação de irradiação que no IFCE é menor, entre 4 e 7 kWh/m²/dia, em relação às registradas na UFPR, que está entre 3 e 7 kWh/m²/dia. O índice de Produtividade dos dois sistemas é comparado e são mostrados na Figura 5.

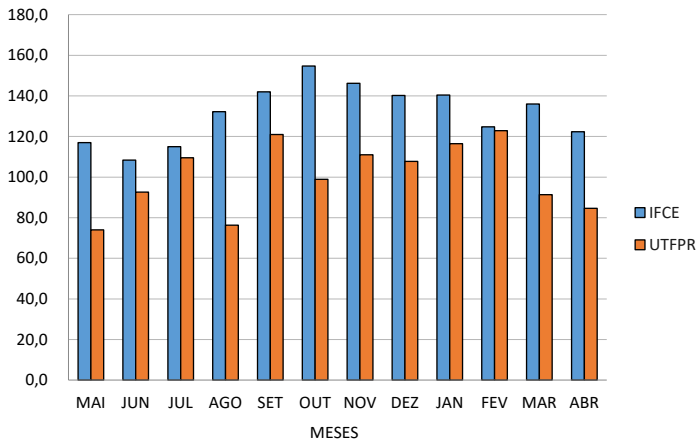


Figura 5 - Comparativo entre Índice de Produtividade do sistema do IFCE Juazeiro e UTFPR

Observando a Figura 5, em todos os meses o sistema do IFCE teve a geração acima do SFD da UTFPR, lembrando que o índice de mérito final yield já leva em consideração a diferença da potência instalada. E, em uma análise mais detalhada, foi observado que o índice do IFCE aponta em média anual 20% maior geração que a instalação da UTFPR. Como geralmente a irradiação é diferente nas duas localidades, iremos observar a seguir o comparativo do índice de mérito Reference Yield, que é mostrado na Figura 6.

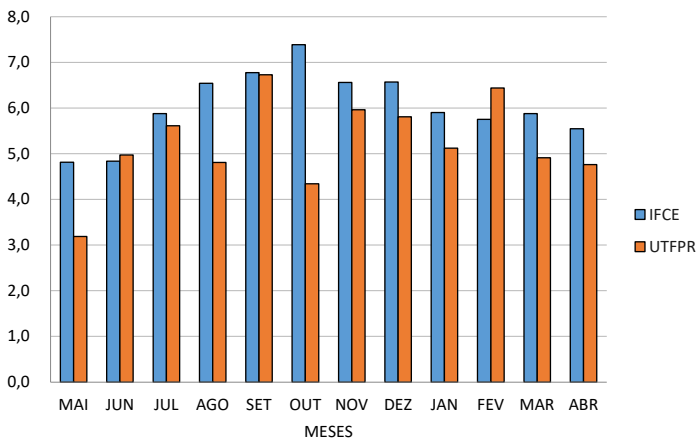


Figura 6 - Comparativo do Reference Ratio para as duas instalações

A partir da Figura 6 pode-se observar que a média mensal da irradiação na instalação do IFCE é um pouco maior do que na da UTFPR, de acordo com os dados obtidos. Os períodos de coleta de dados foram anos diferentes, e podem ocorrer pequenas disparidades nos dados de irradiação, mas o eventual erro é irrelevante para a proposta da pesquisa.

O índice de mérito que é a taxa de desempenho é mostrado na Figura 7. Os dados da taxa de desempenho têm pouca variação no decorrer dos meses em ambos SFD.

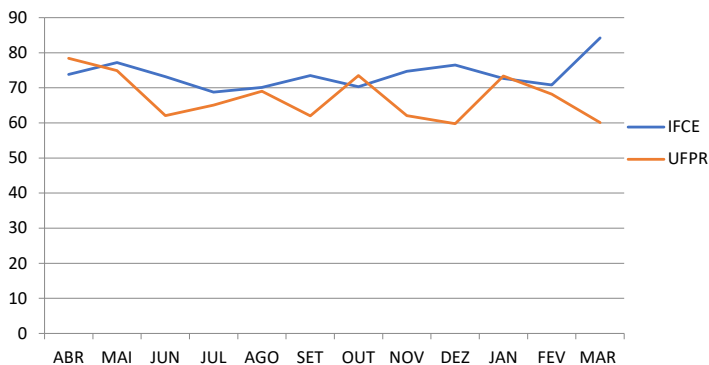


Figura 7 - Taxa de desempenho das duas instalações SFD

A Figura 7 mostra que a taxa de desempenho tem valores semelhantes nas duas instalações, sendo os registrados no IFCE um pouco superiores, por razão da irradiação solar privilegiada da região. Nos dois casos as taxas de desempenho do SFD estão acima de 60%. É importante comentar que mesmo com índices altos de irradiação, as altas temperaturas influenciam negativamente no desempenho da geração fotovoltaica.

5. CONCLUSÕES

A pesquisa levantou os índices de mérito para sistema fotovoltaico distribuído em duas instituições de ensino tecnológico, sendo o IFCE localizado na Região Nordeste e a UTFPR não Sul do Brasil. Os índices de mérito foram utilizados para comparar os dois SFD quanto ao aproveitamento da energia fotovoltaica em diferentes localidades e capacidades instaladas. Nas análises foram considerados os índices de mérito *final yield*, *reference yield* e taxa de desempenho no período de um ano de coleta de dados. Esses índices são amplamente usados nos estudos de potencialidade energética.

A irradiação solar média mensal durante um ano de coleta foi comparada nas duas localidades. A proximidade do IFCE com a linha do Equador resulta no maior número de horas de sol pleno em relação a UTFPR. Também, isto reflete nos elevados índices de irradiação solar incidente em toda região. No IFCE a irradiação diária com valores acima de 5 kWh/m² é registrada em nove meses do ano, e na UFPR esses valores ocorrem em sete meses.

Os resultados do índice de mérito *final yield*, que considera a diferença da potência instalada entre os dois sistemas, apontam que o SFD do IFCE gera em média anual 20% a mais que o SFD da UTFPR. De outro lado, o índice de mérito *performance ratio* para os SFD do IFCE e UTFPR mostra uma média anual em torno de 73%, que está próximo dos valores de referência mundiais, geralmente 80%. Nos dois casos o índice de mérito da taxa de desempenho é semelhante, sendo os registrados no IFCE um pouco superior, por razão da irradiação solar privilegiada da região. Nos dois casos as taxas de desempenho do SFD estão acima de 60%, que são consideradas muito boas.

Os resultados dos índices de méritos demonstram que a produção de energia elétrica em ambos SFD pesquisados tem excelente desempenho, sendo uma fonte alternativa de energia viável para minimizar a pressão por demanda dos reservatórios das hidrelétricas. Mesmo na região Sul do Brasil, de menor incidência de irradiação solar e menor número de horas de sol pleno, a baixa temperatura em que estão submetidos os painéis fotovoltaicos aumenta a eficiência na geração de energia.

Por fim, a avaliação de desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede é essencial para o monitoramento do desempenho do SFD. Além disso, uma análise mais detalhada dos índices de méritos e a continuidade da aquisição de dados podem apontar falhas ou defeitos no sistema, como falta de limpeza nas placas ou detecção de pontos quentes. Neste caso, a rápida detecção de problemas pode significar ganhos de eficiência, inclusive na melhoria dos procedimentos de manutenção.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa concedida para o desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Brasília: (2018). Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877>. Acessado em: 2/04/2023.

ANEEL. Brasília: (2017). Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/Asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/>. Acessado em: 5/04/2023.

BRASIL. Brasília (2022). Lei Nº 14.300, de 6 de Janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. [2022] Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm Acesso em: 06/04/2023.

BORGES NETO, M. R. de; CARVALHO, P. (2014). Geração de Energia Elétrica: Fundamentos. São Paulo: Érica, 158 p.

CLIMATE DATA. Climate-data.org. Clima: Recife. Disponível em: < <http://pt.climate-data.org/location/5069/> > Acesso em: 10/01/2023.

FILGUEIRAS, J. E. O. et al. (2006). Sistemas de gerenciamento no combate ao desperdício de energia. 2006 In: CBE Congresso Brasileiro de Energia, 11, 2006, Rio de Janeiro, Anais, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL, p. 1807-1817.

IEC. Photovoltaic System Performance Monitoring — Guidelines for Measurement, Data Exchange, and Analysis, IEC Standard 61724,” Geneva, Switzerland, 1998.

MARCHAIS, J. J. (2013). SCHNEIDER ELETRIC. Economias permanentes mediante eficiência energética ativa. Disponível em: < <http://tinyurl.com/mekejbo> >. Acesso em: 05/3/ 2021.

MARION, B. et al. (2005). Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. In: Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, 31, Lake Buena Vista, Florida. Artigo, IEEE, 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1488451/>>. Acesso em: 14/05/2023.

MENDES, I. dos S (2016). Avaliação do Desempenho do Sistema de Mini-geração Fotovoltaico na Faculdade de Ciências, Lisboa. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.

NARIMATU, B. R. S. et al. (2018). Avaliação de desempenho de um sistema fotovoltaico comercial de 14,56 kWp no município de serra. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

NARIMATU, B. R. S. et al. (2018). Avaliação de desempenho de um sistema fotovoltaico comercial de 14,56 kWp no município de serra. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

RÜTHER, R. et al. (2005). Avaliação do impacto da geração distribuída utilizando sistemas solares fotovoltaicos integrados à rede de distribuição. Disponível em: <http://www.unisinos.br/_diversos/revistas/estudos_tecnologicos/index.php?e=1&s=9&a=3>. Acesso em: 10/04/2023.

SANTOS, F. F. et al. (2017). Análise comparativa dos índices de mérito de duas instalações fotovoltaicas: casos UTFPR NEOVILLE X LAR JUNSHIN. XIII Congresso Nacional de Gestão em Excelência e IV INOVARSE Responsabilidade Social Aplicada.

SEME, S. et al. (2019) Analysis of the performance of photovoltaic systems in Slovenia. *Solar Energy*, v.180, p 550-558.

URBANETZ JUNIOR, J. et al. (2014). Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético.

BIOGÁS: ANÁLISE DOS PONTOS POSITIVOS E NEGATIVOS E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA ATINGIR OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Glaucia Lorena Ferreira¹
Sandra Regina Masetto Antunes¹
Eder Carlos Ferreira de Souza¹

¹Universidade Estadual de Ponta Grossa

DOI: 10.47168/rbe.v29i4.832

RESUMO

O crescimento populacional reflete-se no aumento da demanda energética, no esgotamento de recursos naturais, na geração de resíduos e no aumento da emissão de gases de efeito estufa. Estes fatores causam impactos ambientais e desequilíbrio do meio. Uma forma de minimizar esses impactos é o aproveitamento do biogás. Com o crescimento do número de unidades geradoras em território nacional, o objetivo dessa revisão é avaliar os pontos positivos do biogás, bem como os pontos negativos (presença de H₂S no biogás), avaliando as técnicas disponíveis para a dessulfurização do biogás. A versatilidade de aplicação do biogás, aliada a possibilidade de gestão correta de resíduos orgânicos, contribui para a inserção e cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Palavras-chave: Análise SWOT; Bioenergia; Gestão de resíduos; Gestão ambiental; Dessulfurização.

ABSTRACT

Population growth is reflected in increased energy demand, depletion of natural resources, waste generation and increased greenhouse gas emissions. These factors cause environmental impacts and imbalance in the environment. One way to minimize these impacts is to use biogas. With the growth of generating units in the national territory, the objective of this review is to evaluate the positive and negative points of biogas. As the H₂S content is a constraint, one aim is to survey techniques for desulfurization (removal of H₂S) from biogas. The versatility of biogas application, combined with the possibility of managing organic waste, contributes to the insertion and fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: SWOT analysis; Bioenergy; Waste management; Environmental management; Desulfurization.

1. INTRODUÇÃO

A globalização, o crescimento populacional e a exploração irresponsável dos recursos naturais têm contribuído para o acúmulo de poluentes no meio ambiente. Essas práticas resultaram em problemas ambientais graves, como aumento do efeito estufa, mudanças climáticas e chuva ácida.

A gestão sustentável de resíduos e a transição energética para fontes mais limpas e renováveis estão alinhadas com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU, promovendo a proteção ambiental, eficiência no uso dos recursos naturais e a mitigação dos impactos negativos provenientes de atividades antrópicas. Ao adotar hábitos mais sustentáveis, segue-se na direção de um futuro mais próspero e equilibrado para as presentes e futuras gerações, sendo este um dos objetivos principais da educação ambiental. Nesse sentido, a geração e consumo de biogás tem influência direta em 12 dos 17 ODS, desde a matéria-prima utilizada para sua produção (proveniente de resíduos) até o uso final (energético, por exemplo).

Buscando converter o problema em oportunidade, a digestão anaeróbia da matéria orgânica resulta no biogás, um combustível renovável, rico em CH₄, que pode ser utilizado como fonte de energia mecânica, térmica, elétrica, bem como para transformação em gás natural renovável (GNR).

Mesmo apresentando vantagens no uso e exploração do biogás, ainda existem desafios a serem superados para sua plena inserção na matriz energética. A presença de H₂S no biogás é um desafio comum, uma vez que pode estar associado a problemas de corrosão, desgaste em motores e geradores, emissões ambientais e diminuição do valor energético do gás. Entretanto, existem diferentes tecnologias disponíveis para a remoção de H₂S do biogás, incluindo absorção, adsorção e processos biológicos, sendo que estes processos minimizam os problemas associados à sua presença no biogás. Pensando nisso, o objetivo da presente revisão é realizar o mapeamento científico do panorama brasileiro do biogás, bem como sua aderência aos ODS, e a evolução das tecnologias disponíveis para a dessulfurização do biogás, apresentada na literatura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado o mapeamento das publicações existentes sobre o biogás e as tecnologias disponíveis para remoção de H₂S do biogás. Inicialmente foi realizada busca nas bases de periódicos: Scopus e

WoS (Web of Science), utilizando como palavras-chave a combinação: (“biogas”) AND (“desulfurization” OR “desulfurisation” OR “desulphurization” OR “desulphurisation”), sem levar em consideração dados duplicados. A busca foi realizada até o ano de 2023, retornando 675 registros na Scopus e 448 na WoS. No entanto, foi necessária a redução desses dados a partir de critérios de filtragem: foram desconsiderados livros, capítulos de livros e documentos de conferência, ou seja, foram considerados apenas *article* e *review*; foram considerados apenas os resultados no idioma inglês.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS

O crescimento populacional contribui significativamente para o consumo energético e geração de resíduos ricos em matéria orgânica, como por exemplo: (i) resíduos agrícolas: dejetos de animais, resíduos de ração, colheita e culturas energéticas; (ii) resíduos sólidos urbanos (RSU); (iii) subprodutos industriais: glicerina, resíduos de indústrias alimentícias ou de separadores de gordura (WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013). O processo de digestão anaeróbia (Figura 1) surge como alternativa para o manejo e gerenciamento adequado desses resíduos, transformando-os em biogás.

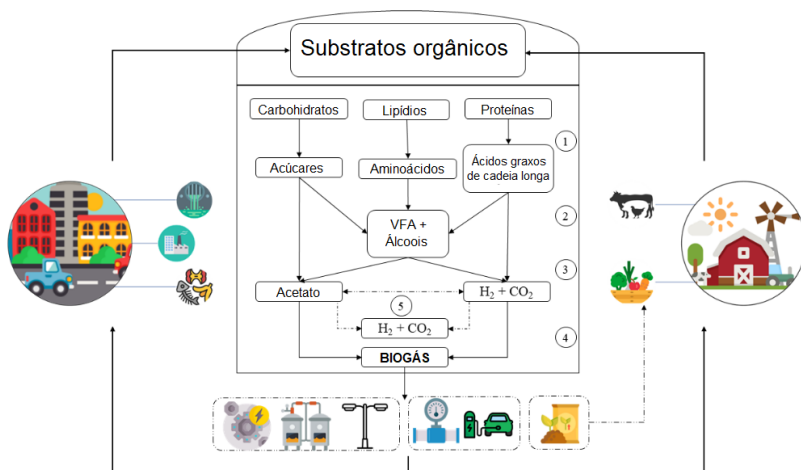


Figura 1 - Rota produtiva e aplicações do biogás e biometano

A conversão dos substratos em biogás é um processo bioquímico complexo, que envolve quatro etapas: (1) hidrólise, (2) acidogênese, (3) acetogênese e (4) metanogênese, nas quais há a interação da biomassa com um consórcio de microrganismos hidrolíticos, fermentativos, acetogênicos e metanogênicos que desempenham funções

distintas (MANYI-LOH et al., 2013).

Na primeira etapa, as substâncias orgânicas complexas (proteínas, carboidratos e lipídios) que não são facilmente metabolizadas por bactérias, são decompostas em monômeros solúveis, facilitando sua absorção pela parede celular das bactérias acidogênicas. A acidogênese, também chamada de fermentação, é uma etapa intermediária na qual as bactérias fermentativas convertem os monômeros solúveis em produtos terminais, como por exemplo, ácidos graxos voláteis (VFA), álcoois, CO_2 e H_2 . Na terceira etapa, os microrganismos acetogênicos, produtores de H_2 , metabolizam os materiais hidrolisados em ácido acético, H_2 e CO_2 (precursores do biogás). Finalmente, os produtos gerados na acidificação são transformados em CH_4 e CO_2 (biogás) (LI; CHEN; WU, 2019).

O produto resultante deste complexo processo é o biogás bruto, que é constituído principalmente de CH_4 (50% – 75%), CO_2 (25% – 45%), traços de outros gases, como por exemplo, N_2 e O_2 (2% – 8%) e gases residuais (H_2 , NH_3 e H_2S). No entanto, sua composição é variada e dependente dos parâmetros operacionais (temperatura; pH; tempo de retenção hidráulica e taxa de carga orgânica; relação Carbono/Nitrogênio), tipo de biodigestor e as características do resíduo alimentado (PRAMANIKI et al., 2019; WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013).

3.1 Panorama do biogás no Brasil

Em meados dos anos 2000 o biogás começou a despertar interesse como fonte combustível para geração de energia. Sua definição começou a permear de passivo ambiental para ativo energético (BLEY JR, 2015).

Um novo impulso à expansão do biogás no país veio quando o Ministério de Minas e Energia (MME) implantou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) – Lei nº 10.438/2002, atualizada pela Lei nº 10.762/2003. O objetivo do Programa, conforme Decreto nº 5.025/2004, foi aumentar a geração de energia elétrica a partir de três fontes: eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa (BRASIL, 2002, 2003, 2004). A partir destes incentivos, a instalação de novas unidades geradoras de biogás têm aumentado significativamente nos últimos anos (Figura 2).

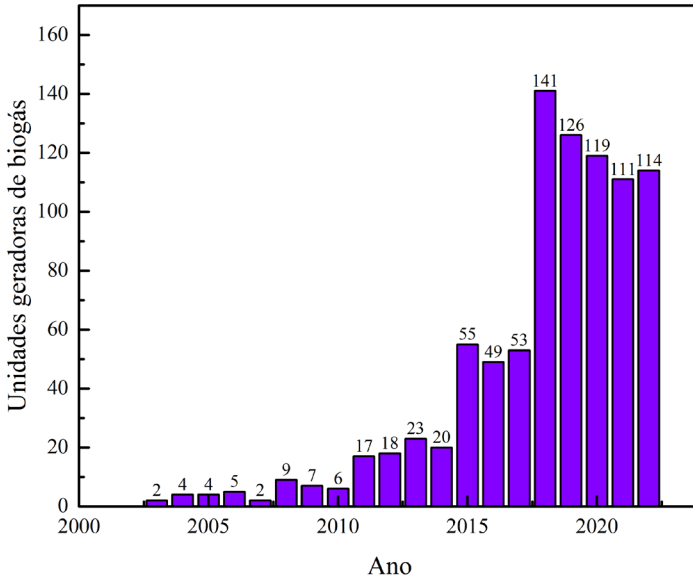


Figura 2 - Evolução no número de plantas de biogás em território nacional até o ano de 2022

No período de 2010 – 2017, a taxa anual de crescimento de plantas de biogás era de 30%, decorrente do desenvolvimento no conhecimento e entrada de novas tecnologias em território nacional. Esta evolução ainda pode ser observada entre os anos de 2018 – 2019, com crescimento de 31%. Já para o ano de 2022, houve crescimento de 22% quando comparado com o ano anterior, totalizando 885 plantas em operação no país (CIBIOGÁS, 2022a, 2023; UNIDO; CIBIOGÁS, 2021). Alguns eventos globais e nacionais (Tabela 1) podem ter contribuído direta para a expansão do biogás em território brasileiro.

O biogás é um valioso recurso energético, sendo utilizado na geração de energia térmica, elétrica, na alimentação de sistemas de refrigeração e, após o processo de upgrading (remoção de constituintes inertes ou de baixo valor, como CO₂, H₂S e H₂O, por exemplo), pode ser injetado nas redes de gás natural ou ser usado como combustível veicular (biometano/gás natural renovável – GNR). No Brasil, a principal aplicação do biogás é na geração de energia elétrica (86%), seguido por energia térmica (11%), energia mecânica (0,7%) e como biometano/GNR (2,3%) (CIBIOGÁS, 2022b; EPA, 2022).

Tabela 1 - Eventos globais e nacionais que contribuíram com a evolução do biogás no Brasil desde 2015

Ano	Evento	Caráter	Características
2015	Foi adotada mundialmente a Agenda 2030	Global	Estabelecidos os 17 ODS para o Desenvolvimento Sustentável, (ALLEN; METTERNICHT; WIEDMANN, 2016).
	COP – 21	Global	Foi estabelecido o Acordo de Paris (sucessor do Protocolo de Kyoto), em que cada país concorda com o esforço comum de limitar o aquecimento global abaixo de 2°C, e eventualmente limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (WBA, 2018).
	Resolução ANP nº 8/2015, revogada pela Resolução ANP nº 906/2022	Nacional	Define o biogás e estabelece as especificações do biometano (ANP, 2015, 2022a).
2017	Resolução ANP nº 685/2017, revogada pela Resolução ANP nº 886/2022	Nacional	Estabelece regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano, proveniente de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto (ETE), para uso veicular (ANP, 2017, 2022b).
	Lei nº 13.576/2017 - Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)	Nacional	Tem por objetivo contribuir para o cumprimento dos compromissos nacionais firmados no Acordo de Paris (BRASIL, 2017).
2020	PL nº 2193/2020 - Política Federal do Biogás e do Biometano	Nacional	Tem como intuito o desenvolvimento econômico mediante a gestão de resíduos, produção de combustíveis e o crescimento do mercado de biogás, biometano e biofertilizante (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2020).
2021	COP – 26	Global	Compromisso de reduzir 30% das emissões de CH ₄ até 2030, com base nos níveis de 2020 (MMA, 2022).
	Lei nº 14.134/2021 – Lei do Gás	Nacional	Institui as regras para o transporte de gás natural (GN) por meio de condutos, bem como, a importação e exportação de gás natural (GN) (BRASIL, 2021a).
	Decreto nº 10.712/2021	Nacional	Estabelece que o biometano e outros gases intercambiáveis com o gás natural (GN) devem passar por um tratamento regulatório equivalente ao gás natural (GN), e atendidas as especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural (ANP) (BRASIL, 2021b).
2022	Lei nº 14.300/2022	Nacional	Marco legal para a micro e minigeração distribuída, ainda que já regulada pela ANEEL (BRASIL, 2022a).
	Decreto nº 11.003/2022	Nacional	Estabelece a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano (BRASIL, 2022b).

O Brasil é o país com maior potencial para geração de biogás no mundo, dispondo de grande diversidade de substratos e vasta extensão territorial. Estima-se que o país têm potencial teórico de geração de 84,6 bilhões de $\text{Nm}^3 \text{ano}^{-1}$. No entanto, considerando o recente cenário produtivo (2,8 bilhões de $\text{Nm}^3 \text{ano}^{-1}$), o país aproveita apenas 3,3% desse potencial (CIBIOGÁS, 2022b).

Diversos estudos sobre o impacto de usinas de biogás estão sendo realizados, avaliando-se também o fator social, juntamente ao fator ambiental (CARVALHO et al., 2021). Outra forma de avaliar os impactos do biogás é fazer uma análise dos seus pontos fortes e pontos fracos.

4. BIOGÁS: UMA ANÁLISE SWOT DOS PONTOS FORTES E PONTOS FRACOS

A análise SWOT tem sido amplamente utilizada nas pesquisas de planejamento energético. Isto porque auxilia na identificação, avaliação e entendimento das condições externas e internas da utilização de uma fonte energética. A análise SWOT estabelece basicamente dois pares de indicadores: (1) as forças (S) e fraquezas (W) são elementos internos (controláveis); (2) as ameaças (T) e oportunidades (O) são elementos externos (não controláveis) (MADURAI ELAVARASAN et al., 2020).

As forças (S) e oportunidades (O) são atributos positivos para alcançar os objetivos, enquanto as fraquezas (W) e ameaças (T) são atributos negativos. As forças (S) são o ativo empregado para eliminar as ameaças (W). Já as oportunidades (O) servem para superar as fraquezas (W) (KAMRAN; FAZAL; MUDASSAR, 2020). Nesse sentido, a contribuição da análise SWOT para o desenvolvimento sustentável do setor de biogás é: (i) construir as forças (S); (ii) explorar as oportunidades (O); (iii) mitigar as ameaças (T); (iv) ajustar/eliminar as fraquezas (W) (DYSON, 2004). As forças atuantes (S) e oportunidades (O) da utilização do biogás estão relacionadas na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

Tabela 2 - Análise dos pontos positivos (forças - S) no aproveitamento do biogás como fonte energética

Forças (S)		Referências
S01	Energia proveniente do tratamento de um passivo ambiental (resíduos da agricultura, pecuária e áreas urbanas). Descarte e destinação correta desses resíduos, evitando a contaminação do solo, água e ar.	(FIEP, 2016)
S02	Cogeração energética (energia mecânica, térmica, elétrica e veicular)	
S03	Redução da emissão de CH ₄ da decomposição do material orgânico.	(PLANO, A.B.C, 2012)

Tabela 2 - Análise dos pontos positivos (forças - S) no aproveitamento do biogás como fonte energética (cont.)

Forças (S)		Referências
S04	Contribui para redução das emissões de GEEs.	(PLANO, A.B.C, 2012)
S05	A produção e uso de biogás proporciona redução nos custos com energia elétrica e insumos químicos.	
S06	Fonte adicional de renda para agricultores a partir da venda de eletricidade e calor.	(BRUDERMANN; MITTERHUBER; POSCH, 2015)
S07	Geração de empregos.	(OBAIDEEN et al., 2022)
S08	Aumento do acesso à energia nas áreas rurais proporciona maior qualidade na educação.	
S09	O processo de DA gera o digestato como subproduto. Pode ser usado como cama de animais e corretivo para solo (parte sólida); biofertilizante rico em nutrientes (parte líquida). Os produtos digeridos podem ser fonte de receita ou economia de custos.	(EPA, 2022)
S10	O tratamento de resíduos orgânicos reduz a propagação de doenças e odores.	(WBA, 2018)
S11	Recuperação de solos a partir da reciclagem de nutrientes, matéria orgânica e carbono.	
S12	Aumento do rendimento das culturas agrícolas a partir do uso de biofertilizante rico em nutrientes.	
S13	Fecha o ciclo produtivo de acordo com a economia circular a partir do uso de resíduos.	(XIMENES et al., 2021)

Tabela 3 - Análise dos pontos positivos (oportunidades – O) no aproveitamento do biogás como fonte energética

Oportunidades (O)		Referências
O01	Parceria entre órgãos governamentais, academia e setor privado para o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento energético do biogás.	(FIEP, 2016)
O02	Contribui para o aumento da oferta de energias alternativas e descentralização energética.	
O03	Desenvolvimento de cursos de qualificação nos níveis técnicos, tecnológicos e superior.	
O04	Multifuncionalidade do biogás e do biofertilizante.	(BRUDERMANN; MITTERHUBER; POSCH, 2015)
O05	Desenvolvimento e crescimento regional, a partir da implementação do conceito de economia circular.	
O06	Mitigação das mudanças climáticas e cumprimento de agendas e compromissos internacionais.	(XIMENES et al., 2021)
O07	Chance de implementar cooperativas para a produção de biogás em escala local.	
O08	Potencial inexplorado de empresas agroalimentares em território nacional.	
O09	Aumentar a consciência global e nacional sobre a importância da implementação de metas relacionadas com o clima.	
O10	Fonte alternativa para fontes fósseis.	

Com relação à análise de pontos negativos à implantação do biogás (Tabela 4), identifica-se que elementos de gestão, estrutura, operação e manutenção interferem diretamente na difusão do biogás como fonte energética.

Tabela 4 - Análise dos pontos negativos ao aproveitamento do biogás como fonte energética

Ameaças (T)		Referências
T01	Produção e uso de outras fontes alternativas de energia.	(XIMENES et al., 2021)
T02	Baixa consciência social sobre o biogás.	
T03	Restrições legais ao uso de biofertilizante.	
Fraquezas (W)		Referências
W01	Em território nacional existem poucos fornecedores de equipamentos para produção de biogás.	(FIEP, 2016)
W02	Falta de conhecimento técnico e de mão-de-obra qualificada na área de bioprocessos e controle produtivo de biogás.	
W03	Altos custos de investimento e operação das plantas.	(BRUDERMANN; MITTERHUBER; POSCH, 2015)
W04	Protesto da comunidade local contra a existência de usinas de biogás nas proximidades de suas residências.	
W05	Dificuldades na gestão, controle e estabilização da tecnologia, uma vez que o biogás é gerado a partir de biomassas distintas.	(XIMENES et al., 2021)
W06	Não ter o controle direto do sistema.	
W07	Subsídios e concessões pouco desenvolvidos em território nacional.	
W08	Rendimentos diferentes na produção do biogás.	
W09	O biogás gerado possui em sua composição gases contaminantes, que causam corrosão (H ₂ S) e diminuem o seu poder calorífico (CO ₂). É necessária etapa de <i>upgrading</i> .	(AWE et al., 2017)

5. BIOGÁS: A PROBLEMÁTICA DA PRESENÇA DO H₂S

5.1 Remoção do H₂S do biogás

Pode inferir-se a partir das ameaças (T) e fraquezas (W) que, embora não seja componente da digestão anaeróbia, em alguns casos a etapa de sulfetogênese (Etapa 5 da Fig. 1) estará presente no meio reacional, ou seja, quando o meio possuir quantidades significativas de sulfato (SO₄²⁻) este será reduzido por bactérias redutoras de sulfato (BRS ou MRS) em H₂S (CASSINI; COELHO; PECORA, 2014; MADIGAN et al., 2016).

O H₂S (CAS nº 7783-06-4) é um gás incolor, inflamável, extremamente nocivo ao meio ambiente e à saúde, e tem odor característico de ovo podre. É comumente chamado de gás de esgoto, gás sulfídrico ou gás de pântano. Além de ser gerado na decomposição bacteriana de materiais orgânicos, ocorre naturalmente em poços de petróleo, gás natural, atividades vulcânicas, fontes termais, águas subterrâneas,

bem como pode ser gerado em atividades antrópicas, como por exemplo, pela decomposição bacteriana de resíduos orgânicos de humanos e animais, processos de tratamento de curtume e produção de papel *kraft* (OSHA, 2005; WHO, 2003).

Os efeitos do H_2S na saúde variam de acordo com o nível e tempo de exposição. Em baixos níveis de concentração é facilmente reconhecido por seu odor característico de “ovos podres”. No entanto, quando a exposição é contínua, ou em concentrações superiores a 100 ppm, a capacidade olfativa é temporariamente suprimida, dificultando assim uma pessoa sentir o cheiro do gás. Causa irritação nos olhos, nariz e garganta. Em concentrações moderadas pode causar maior irritação ocular e respiratória (tosse, dificuldade respiratória, líquido nos pulmões), dor de cabeça, tontura, náuseas e vômitos. As altas concentrações podem causar choque, convulsões, incapacidade respiratória, perda de consciência, coma e morte (GOVERNMENT OF ALBERTA, 2012; OSHA, 2005). No meio ambiente, se oxidado em grandes quantidades, em caldeiras ou em motores de combustão interna, o H_2S se transforma em fonte de óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3 , conhecidos como SO_x), sendo liberados na atmosfera junto com gases de escape. A liberação de grandes concentrações de SO_x pode prejudicar o crescimento e desenvolvimento de plantas, bem como, contribuir para o aumento da chuva ácida, que pode afetar ecossistemas sensíveis (EPA, 2023; PAGLINI; GANDIGLIO; LANZINI, 2022).

Além disso, a presença em nível traço pode afetar os equipamentos da cadeia produtiva do biogás, causando corrosão, incrustação e desgaste mecânico (WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013). Portanto, dependendo da aplicação, o biogás necessita ser tratado. Basicamente o tratamento do biogás bruto envolve duas etapas: (i) filtragem, para remoção de elementos traço (remoção do H_2S); (ii) purificação, para ajustar o poder calorífico (remoção do CO_2) (RYCKE-BOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

O processo de dessulfurização (Tabela 5) pode ocorrer durante ou após a digestão anaeróbia, a partir de processos físicos, químicos ou biológicos (UNIDO, 2022).

Tabela 5 - Rotas tecnológicas para a dessulfurização do biogás

Técnica	Estágio	Processo
Microaeração	Durante a digestão anaeróbia	Biológico
Adição de agentes químicos	Durante a digestão anaeróbia	Químico
Absorção física e química	Após a digestão anaeróbia	Físico e Químico
Membranas	Após a digestão anaeróbia	Biológico
Biofiltro convencional (BF), filtro biológico (BTF) e biolavador (bioscrubber)	Após a digestão anaeróbia	Biológico
Adsorção	Após a digestão anaeróbia	Físico e Químico

A técnica de microaeração é baseada na conversão aeróbia do H₂S em enxofre elementar (S₈) a partir de um grupo de microrganismos sulfuroxidantes (*Thiobacillus*) (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011). Apresenta eficiência superior a 90%, é de baixo custo, e pode ser realizada no próprio biodigestor, não havendo a necessidade de construção de unidade de dessulfurização (CABRAL, 2015; JENÍČEK et al., 2017). Como desvantagens da técnica podemos destacar: concentrações de 6%–12% de ar no biogás podem tornar a mistura explosiva, e pode inibir o processo de biodigestão. A oxidação do H₂S pode gerar depósito de S₈ dentro do biodigestor, elevando o volume de lodo, o qual deve ser removido com frequência (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022; RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011; WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013).

Na técnica de adição de agentes químicos, o H₂S pode ser reduzido com a adição de íons de ferro (Fe²⁺ e Fe³⁺), na forma de cloreto de ferro (cloreto ferroso – FeCl₂ e cloreto férrico – FeCl₃) e sulfato de ferro (FeSO₄) (BRASIL, 2016; WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013). Como vantagens do método temos: a adição de compostos de ferro não influencia negativamente a atividade biológica; ocorre aumento na produção de CH₄; é positiva economicamente, com relação aos custos de investimento, pois, não há necessidade de instalações adicionais, apenas um tanque de alimentação para solução salina e um dosador (BRASIL, 2016). A desvantagem do método é que, dependendo das concentrações de H₂S, os custos operacionais podem ser elevados, devido a altos consumos desses sais (BRASIL, 2016).

No processo de absorção física o H₂S é dissolvido em água ou solventes orgânicos (AWE et al., 2017; KAPDI et al., 2005). Este método possui altas taxas de recuperação (99,9%) (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022; SCHOMAKER et al., 2000), mas apresenta um alto consumo de água e de produtos químicos, tornando o método menos atraente para plantas de pequena escala; outras desvantagens são a demanda energética para o bombeamento das soluções de lavagem e geração de efluente líquido que requer tratamento antes da disposição final (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022; SCHOMAKER et al., 2000).

A remoção de H₂S por membranas é baseada no princípio de permeabilidade seletiva. O H₂S é transportado através da membrana, enquanto o CH₄ fica retido (ALLEGUE; HINGE, 2014; IOVANE et al., 2014). Como desvantagem do método, estudos para H₂S (H₂S/CH₄) são limitados pela toxicidade do gás e especificações de purificação mais altas, que dificilmente podem ser alcançadas apenas com o uso de membranas. Para obter alta separação, a quantidade de H₂S deve ser baixa (≤1%) (PUDI et al., 2022).

A utilização de biofiltros contendo Bactérias Oxidantes de Enxofre (BOS) imobilizadas em um biofilme, na forma de um leito empacotado, permite a separação do H_2S como enxofre elementar (S_8).

Uma técnica que apresenta estudos em número crescente é a adsorção, uma técnica baseada nas interações intermoleculares que ligam H_2S na superfície ativa de um sólido adsorvente, podendo ser classificada em fisissorção e quimissorção (ALLEGUE; HINGE, 2014; PAGLINI; GANDIGLIO; LANZINI, 2022).

No Brasil, no ano de 2019, 57% das unidades geradoras de biogás dispunham de sistemas para dessulfurização do biogás. As principais tecnologias eram: dessulfurização biológica (58%), absorção química (12%), adsorção em carvão ativado (9%) e limalha de ferro (6%) (MARTINEZ; BÜHRING; MÜLLER, 2019).

5.2 A problemática do H_2S no biogás na literatura internacional

A pesquisa bibliográfica por “biogas” AND “desulfurization” OR “desulfurisation” OR “desulphurization” OR “desulphurisation” nas bases de dados resultou 516 registros na Scopus e 404 artigos na WoS. Após a junção das bases e exclusão dos documentos duplicados obteve-se 622 artigos. Desses artigos, observa-se que entre os anos de 1979–2007 não ocorreu produção científica significativa, no entanto, após esse período nota-se o crescimento no número de publicações. Ainda que possam ser observadas variações ao longo do tempo, percebe-se a tendência de crescimento da produção científica, cujo ápice foi atingido em 2022, quando foram publicados 66 artigos sobre o tema, cerca de 10,6% da produção total. Ainda pode ser verificada a taxa de crescimento percentual anual de 9,20%, com um incremento consolidado da produção científica nos últimos 15 anos, visto que aproximadamente 95% das publicações aconteceram nesse período.

Em relação à produção científica global, observa-se que a China (216) tem a maior frequência de publicações sobre esse tema, seguida de Espanha (87), Itália (45), Japão (39) Brasil (37) e Estados Unidos da América (37). Entretanto, no que se refere aos países mais citados, a Espanha (2653) apresenta a maior frequência de citações, seguida da China (1566) e Itália (1069). Observa-se ainda que a colaboração acontece em sua maioria entre autores do mesmo país, indicando a necessidade de maior interação entre a comunidade científica para a melhor difusão e desenvolvimento do tema. Com relação às afiliações das 819 entradas, das 10 de maior representatividade no número de publicações temos afiliações espanholas entre as quatro primeiras colocações: “Universitat Autònoma Barcelona”, “University of Valladolid”, “Universidad de Cádiz” e “Universitat Politècnica de Catalunya”, com um total de 75 publicações. Já com relação aos auto-

res mais relevantes, das 2003 entradas entre os 12 principais autores, nove autores são da Espanha: Cantero D, Gabriel D, Ramírez M, Almenglo F, FDZ-Polanco M, Gamisans X, Lafuente J, Díaz I e Muñoz R.

A nuvem de palavras (Figura 3) apresenta as palavras-chave mais citadas nos 622 artigos.

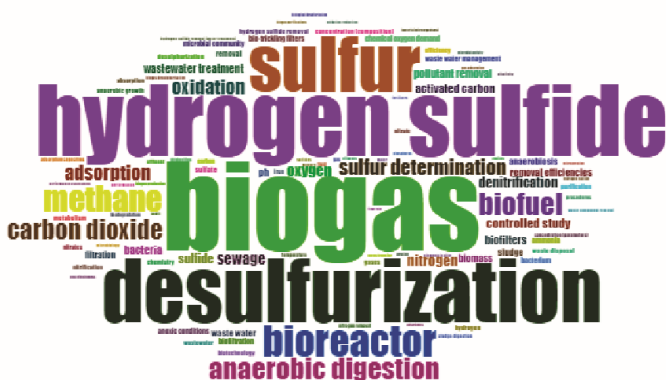


Figura 3 - Palavras mais frequentes obtidas da revisão bibliográfica sobre o tema biogás

As palavras-chave “hydrogen sulfide” (601), “sulfur” (466) e “methane” (216) representam os elementos que se deseja remover do sistema de biogás e o elemento de interesse, respectivamente. Já “bioreactor” (264) e “anaerobic digestion” (184) são palavras relacionadas com o processo de conversão da biomassa. Nesse sentido, a biomassa que aparece em destaque é vinculada a palavra-chave “sewage” (101). Por fim, ainda podem ser observadas palavras-chave “adsorption” (127) e “oxidation” (126) que estão relacionadas a processos de dessulfurização do biogás. A palavra “activated carbon” (76) aparece com menor frequência, sendo este adsorvente utilizado na remoção do H_2S no biogás.

6. BIOGÁS E OS ODS

O mundo enfrenta muitos desafios nas questões ambientais. Em setembro de 2015, líderes mundiais se reuniram na sede da Organização das Nações Unidas (ONU) a fim de decidir um plano de ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que a sociedade alcance paz e prosperidade. No entanto, a Agenda 2030, ou Agenda de Desenvolvimento Sustentável, só entrou em vigor no dia 1º de janeiro de 2016, com 17 ODS e 169 metas a serem cumpridas até

o ano de 2030 (UNODC, 2020).

A Agenda 2030 serve para orientar políticas públicas e esforços para o desenvolvimento local e global, exigindo mudanças para aumentar o bem-estar e prosperidade da sociedade, bem como abordar temas como a proteção ambiental e as mudanças climáticas. Nesse sentido, a sobrevivência e bem-estar são dependentes, em última instância, dos recursos naturais disponíveis no planeta (KATILA et al., 2019).








Sendo assim, a geração e uso do biogás/biometano converte o problema de um passivo ambiental em oportunidade de um ativo energético, mitigando problemas locais, regionais e globais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

O biogás tem influência direta nos três pilares do ODS: econômico, social e ambiental, podendo ser enquadrado em 12 dos 17 ODS (Tabela 6) sendo as principais contribuições: aumento no uso de energia renovável, redução das mudanças climáticas, desenvolvimento da gestão de resíduos e criação de empregos (OBAIDEEN et al., 2022).

Tabela 6 - Contribuições do biogás para o desenvolvimento sustentável e cumprimento dos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) da ONU

ODS	Pilar do ODS	Contribuição do biogás Forças – S (Tabela 2) e Oportunidades – O (Tabela 3)
	Econômico	S05; S06; S07; S09.
	Econômico/Social	S10; S11; S12.
	Social	S03; S04; S10.
	Social	S08; O03.
	Ambiental	S10;

Tabela 6 - Contribuições do biogás para o desenvolvimento sustentável e cumprimento dos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) da ONU (cont.)

ODS	Pilar do ODS	CONTRIBUIÇÃO DO BIOGÁS Forças – S (Tabela 2) e Oportunidades – O (Tabela 3)
	Ambiental	S01; S02; O02; O10.
	Econômico	S07; O03; O05; O07.
	Econômico	O01; O03; O05; O07; O08.
	Social	S01; S03; S04; S07; S08; S10; S13; O02; O04; O05; O06.
	Ambiental	S01; S11; S13; O04.
	Ambiental	S03; S04; O02; O04; O06; O09.
	Ambiental	S11; S12.

No caso da problemática dos resíduos, o ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis) incentiva a inclusão de práticas eficientes e sustentáveis de gestão de resíduos, incluindo sua redução, reciclagem e reutilização. A partir da redução da quantidade de resíduos orgânicos descartados e seu manejo correto, ocorre a impulsão deste objetivo. Além disso, os ODS 14 e 15 ressaltam a importância da conservação dos ecossistemas aquáticos e terrestres, envolvendo a diminuição da poluição e o incentivo da gestão sustentável dos recursos naturais.

O ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) realça a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) e adoção de medidas frente as mudanças climáticas. A utilização do biogás/GNR contribui para a redução dos impactos negativos das atividades humanas em relação ao clima.

No que se refere ao suprimento da demanda e transição energética, principalmente para fontes de energia renovável, o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), busca ampliar o acesso a tais fontes, bem como, aumentar a eficiência energética. A digestão anaeróbia contribui para esse objetivo, uma vez que o biogás/GNR é uma fonte de energia limpa e renovável.

Já o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) é sustentado pela pesquisa e implantação de tecnologias da cadeia produtiva do biogás, que promovem a inovação e desenvolvimento de materiais/infraestruturas sustentáveis.

7. CONCLUSÕES

O aumento populacional, o desenvolvimento tecnológico e a demanda energética, aliados a outras atividades antrópicas, refletem na geração significativa de resíduos, seja em grandes centros urbanos ou no meio rural. Nesse sentido, se esses resíduos não receberem o manejo e gestão correta podem ocasionar impactos negativos à saúde e ao meio ambiente.

Os impactos negativos não são sentidos apenas em escala micro, são extrapolados à escala macro, ou seja, global. Pensando nisso, nos últimos anos têm-se percebido iniciativas visando a solução desses problemas, buscando alternativas para que o mundo e a sociedade se desenvolvam de maneira mais ambientalmente correta, limpa e sustentável.

Os ODS, propostos na Agenda 2030, são um conjunto de ações que visam a redução desses impactos negativos sob a sociedade. A geração e uso do biogás/biometano, um biocombustível, proveniente da biodigestão de matéria orgânica satisfaz diretamente 12 dos 17 ODS: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15.

Após realizar o levantamento bibliográfico e obter informações relacionadas aos fundamentos, aspectos históricos, perspectivas, aplicações e pontos positivos, fica claro que o biogás é uma fonte interessante para integrar a matriz energética nacional. No entanto, foi possível mapear também os pontos fracos, como por exemplo, a presença de H₂S no biogás, que faz com que o uso do biogás ocorra de maneira lenta.

Nesse sentido, a comunidade científica busca meios de solucionar esse problema. O número de publicações relacionadas a desulfurização do biogás tem crescimento percentual anual de 9,20%. É

um tema multidisciplinar e estudado mundialmente, sendo os países de maior expressão a China, Espanha, Itália, Japão, Brasil e Estados Unidos da América; as universidades e autores espanhóis têm destaque.

A dessulfurização pode ocorrer durante ou após a digestão anaeróbia, e muitas técnicas são empregadas e estudadas. No entanto, a partir do mapeamento científico com a ferramenta de nuvem de palavras, foi possível observar maior evidência em estudos relacionados a oxidação do sulfeto a enxofre elementar e adsorção do H₂S em adsorventes diversos.

8. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro à pesquisa e pela bolsa de doutorado concedida; à Universidade Estadual de Ponta Grossa, por tornar possível o doutoramento da autora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEGUE, L. B.; HINGE, J. Biogas upgrading Evaluation of methods for H₂S removal. Danish technological institute, v. 31, p. 1-31, 2014.

ALLEN, C.; METTERNICHT, G.; WIEDMANN, T. National pathways to the Sustainable Development Goals (SDGs): A comparative review of scenario modelling tools. Environmental Science and Policy, v. 66, p. 199–207, 2016.

ANP. Resolução ANP no 8, de 2 de fevereiro de 2015. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015. Brasil, 2015.

ANP. Resolução no 685, de 29 de junho de 2017. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Brasil. 2017.

ANP. Resolução ANP no 906, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Brasil, 2022a.

ANP. Resolução ANP no 886, de 29 de setembro de 2022. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional. Brasil, 2022b.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, p. 959–975, 2017.

AWE, O. W.; ZHAO, Y.; NZIHO, A.; MINH, D.P.; LYCZKO, N. A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. *Waste and Biomass Valorization*, v. 8, p. 267–283, 2017.

BLEY JR, C. *Biogás a energia invisível*. 2. ed. São Paulo: CIBiogás-ER, 2015.

BRASIL. Lei no 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica. Brasil, 2002.

BRASIL. Lei no 10.762, de 11 de novembro de 2003. Dispõe sobre a criação do Programa Emergencial e Excepcional de Apoio às Concessionárias de Serviços Públicos de Distribuição de Energia Elétrica. Brasil, 2003.

BRASIL. Decreto no 5.025, de 30 de março de 2004. Dispõe sobre o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA. Brasil, 2004.

BRASIL. *Biometano como combustível veicular*. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2016.

BRASIL. Lei no 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Brasil, 2017.

BRASIL. Lei no 14.134, de 8 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. Brasil, 2021a.

BRASIL. Decreto no 10.712, Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. Brasil, 2021b.

BRASIL. Lei nº14.300, de 6 de janeiro 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Brasil, 2022a.

BRASIL. Decreto nº11.003, de 21 de março de 2022. Institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Brasil, 2022b.

PLANO, A. B. C. Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012.

BRUDERMANN, T.; MITTERHUBER, C.; POSCH, A. Agricultural biogas plants – A systematic analysis of strengths, weaknesses, opportunities and threats. *Energy Policy*, v. 76, p. 107–111, 2015.

CABRAL, C. B. G. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. PL nº2193, de 2020. Institui a Política Federal do Biogás e do Biometano. Brasil, 2020.

CARVALHO, M. L. F.; SANTOS, J. S.; OLIVEIRA, L. G. S.; NUNES, A. B. A. Impactos ambientais decorrentes do processo de instalação e operacionalização da Usina de Biogás GNR de Fortaleza (CE): a Educação Ambiental como via de transformação social. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 16, p. 227-247, 2021.

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P. Biogás–Biocombustíveis ANP. *Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas*. Rio de Janeiro: Synergia, v. 1, p. 135-167, 2014.

CIBIOGÁS. BiogasMap. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiODc2NTlhOGItOTc2Ny00ZDc1LWI5MTMtYjYwZTRlYyYjFiOWQ3liwidCI6ImMzOTg3Zml3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3M-GU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a-3c113b0d>>. Acesso em: 14 maio. 2022a.

CIBIOGÁS. Panorama do biogás no Brasil 2021. *CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº001/2022*. Foz do Iguaçu: [s.n.].

CIBIOGÁS. Panorama do Biogás no Brasil 2022. *Relatório Técnico nº001/2023*. Foz do Iguaçu: [s.n.].

DYSON, R. G. Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick. *European Journal of Operational Research*, v. 152, n. 3, p. 631–640, 2004.

EPA. How Does Anaerobic Digestion Work ? Disponível em: <<https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work>>. Acesso em: 4 out. 2022.

EPA. Sulfur Dioxide Basics What is SO₂ and how does it get in the air ? Disponível em: <<https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#:~:text=What are the environmental effects,which can harm sensitive ecosystems.>>. Acesso em: 31 maio. 2023.

FIEP. Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná. Curitiba: Senai, 2016.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. Process of sulfidric acid removal from biogas. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, p. 167-172, 2009.

GOVERNMENT OF ALBERTA. H₂S, the killer. [s.l.: s.n.].

IOVANE, P.; NANNA, F.; DING, Y.; BIKSON, B.; MOLINO, A. Experimental test with polymeric membrane for the biogas purification from CO₂ and H₂S. Fuel, v. 135, p. 352–358, 2014.

JENÍČEK, P.; HOREJŠ, J.; POKORNÁ-KRAYZELOVÁ, L.; BINDZAR, J.; BARTÁČEK, J. Simple biogas desulfurization by microaeration – Full scale experience. Anaerobe, v. 46, p. 41–45, 2017.

KAMRAN, M.; FAZAL, M. R.; MUDASSAR, M. Towards empowerment of the renewable energy sector in Pakistan for sustainable energy evolution: SWOT analysis. Renewable Energy, v. 146, p. 543–558, 2020.

KAPDI, S. S.; VIJAY, V. K.; RAJESH, S. K.; PRASAD, R. Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. Renewable Energy, v. 30, p. 1195–1202, 2005.

KATILA, P.; COLFER, C. J. P.; JONG, W.; GALLOWAY, G.; PACHECO. P. WINKEL, G. Sustainable Development Goals: Their Impacts on Forests and People. Cambridge University Press, 2019.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Embrapa Suínos e Aves. Concórdia: 2022

LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. Applied Energy, v. 240, p. 120–137, abr. 2019.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; BENDER, K. S.; BUCKLEY, D. H.; STAHL, D. A. Microbiologia de Brock. 14. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.

ELAVARASAN, R. M.; AFRIDHIS, S.; VIJAYARAGHAVAN, R. R.; SUBRAMANIAM, U.; NURUNNABI, M. SWOT analysis: A framework for comprehensive evaluation of drivers and barriers for renewable energy development in significant countries. *Energy Reports*, v. 6, p. 1838–1864, 2020.

MANYI-LOH, C. E.; MAMPHWELI, S. N.; MEYER, E. L.; OKOH, A.; MAKAKA, G.; SIMON, M. Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 10, p. 4390–4417, 2013.

MARTINEZ, D. G.; BÜHRING, G. M. B.; MÜLLER, R. Panorama de tecnologias aplicadas no agronegócio de biogás e biometano. Brasília: 2019

MCTI. Portaria MCTI no 5.109, de 6 de agosto de 2021. Define as prioridades, no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, no que se refere a projetos de pesquisa, de desenvolvimento de tecnologias e inovações, para o período 2021 a 2023. Brasil, 2021.

MMA. PROGRAMA NACIONAL METANO ZERO. Institui o Programa Nacional de Redução de Metano de Resíduos Orgânicos – Metano Zero. Brasil, 2022.

OBAIDEEN, K. et al. Biogas role in achievement of the sustainable development goals: Evaluation, Challenges, and Guidelines. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 131, p. 104207, 2022.

OSHA. Hydrogen Sulfide (H₂S). Disponível em: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/hydrogen_sulfide_fact.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2023.

PAGLINI, R.; GANDIGLIO, M.; LANZINI, A. Technologies for Deep Biogas Purification and Use in Zero-Emission Fuel Cells Systems. *Energies*, v. 15, p. 3551, 2022.

PRAMANIKA, S. K.; SUJA, F. B.; ZAIN, S. M.; PRAMANIK, B. K. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste : Prospects and constraints. *Bioresource Technology Reports*, v. 8, p. 100310, 2019.

PUDI, A.; REZAEI, M.; SIGNORINI, V.; ANDERSSON, M. P.; BASCHETTI, M. G.; MANSOURI, S. S. Hydrogen sulfide capture and removal technologies: A comprehensive review of recent developments and emerging trends. *Separation and Purification Technology*, v. 298, p. 121448, 2022.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 1633–1645, 2011.

SCHOMAKER, A.; BOERBOOM, A. A. M.; VISSER, A. PFEIFER, A. E. Anaerobic digestion of agro-industrial wastes: information networks and technical summary on gas treatment - Report No.: FAIR-CT 96-2083 (DG12-SSMI)31. 2020

UN. Sustainable Development Goals (SDGs). Disponível em: <<https://unric.org/en/united-nations-sustainable-development-goals/>>. Acesso em: 2 jun. 2023.

UNIDO. Guia Técnico Tecnologias para dessulfurização do biogás. Brasília: [s.n.].

UNIDO; CIBIOGÁS. Sistemas de Biogás e Biometano: Percepções de mercado no Brasil e no exterior. Brasília: [s.n.].

UNODC. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://www.unodc.org/lpo-brazil/pt/crime/embaixadores-da-juventude/conhea-mais/a-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentvel.html>>. Acesso em: 2 jun. 2023.

WBA. The contribution of Anaerobic Digestion and Biogas towards achieving the UN Sustainable Development Goals. [s.l: s.n.].

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. (Ed.). The biogas handbook: science, production and applications. Elsevier, 2013.

WHO. Concise International Chemical Assessment Document 53 HYDROGEN SULFIDE : HUMAN HEALTH ASPECTS. Geneva: [s.n.].

XIMENES, J.; SIQUEIRA, A.; KOCHANSKA, E. Valorisation of Agri-and Aquaculture Residues via Biogas Production for Enhanced Industrial Application. *Energies*, v. 14, p. 2519, 2021.

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA PLANTA SOLAR COM MÓDULOS MONO E BIFACIAIS EM DISTINTOS TIPOS DE SOLO

Douglas Lamas Dias¹
Giuliano Arns Rampinelli¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina

DOI: 10.47168/rbe.v29i4.834

RESUMO

O desenvolvimento sustentável é um dos desafios da sociedade contemporânea. Nesse contexto, a inserção de energias renováveis é uma importante estratégia para a transição energética. A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia madura, confiável, economicamente competitiva e sustentável. Os módulos fotovoltaicos convertem energia solar em energia elétrica. Ao longo dos anos, o desenvolvimento tecnológico tem sido fundamental para aumentar a eficiência e o desempenho desses módulos. Em particular, os módulos fotovoltaicos bifaciais estão em destaque por serem capazes de aproveitar melhor a radiação solar. Eles aproveitam o albedo do solo, podendo captar energia tanto na parte frontal quanto na parte traseira dos módulos, ao contrário dos módulos monofaciais comumente encontrados no mercado, que aproveitam apenas a energia solar na face frontal. No Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi instalada uma planta solar composta por dois sistemas fotovoltaicos. Um sistema utiliza módulos monofaciais e apresenta potência nominal de 5,52 kWp, enquanto o outro sistema utiliza módulos bifaciais e apresenta potência nominal de 6,36 kWp. Esses sistemas estão instalados em diferentes tipos de solo: areia clara, brita escura e brita branca, cujos albedos são, respectivamente, 0,4, 0,1 e 0,45. O objetivo do estudo é modelar, simular e analisar o desempenho da planta solar com módulos monofaciais e bifaciais nos diferentes tipos de solo. Os resultados foram comparados com base na irradiação solar global do plano inclinado, na produtividade do sistema, na produtividade do arranjo fotovoltaico e na produtividade de referência. Além disso, foram analisados a razão de desempenho do sistema, o desvio padrão e o ganho bifacial. Os dados utilizados foram provenientes de simulações e obtidos por meio da modelagem no *software* System Advisor Model (SAM), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL). Os resultados mostraram que a irradiação solar global do plano inclinado foi maior para os módu-

los bifaciais, devido à captação da radiação frontal e traseira. Em relação à produtividade, foram observados ganhos bifaciais, em média mensal anual, de 10,7% para o solo de brita branca, de 9,6% para o solo de areia clara e 2,7% para o solo de brita escura. A razão de desempenho dos dois sistemas da planta solar variou entre 87% e 91%, valores considerados aceitáveis para módulos fotovoltaicos atuais.

Palavras-chave: Energias renováveis; Energia solar fotovoltaica; Módulos bifaciais; Ganho bifacial; Modelagem; Simulação.

ABSTRACT

Sustainable development is one of the challenges of contemporary society. In this context, the integration of renewable energies is an important strategy for energy transition. Photovoltaic solar energy is a mature, reliable, economically competitive, and sustainable technology. Photovoltaic modules convert solar energy into electrical energy. Over the years, technological development has been crucial in increasing the efficiency and performance of these modules. In particular, bifacial photovoltaic modules are highlighted for their ability to better harness solar radiation. They leverage the ground albedo, enabling them to capture energy from both the front and back of the modules, unlike the commonly found monofacial modules in the market, which harness only the solar energy on the front face. At the Center for Sciences, Technologies, and Health (CTS) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC), a solar plant composed of two photovoltaic systems has been installed. One system uses monofacial modules with a nominal power of 5.52 kWp, while the other system uses bifacial modules with a nominal power of 6.36 kWp. These systems are installed in different types of soil: light sand, dark gravel, and white gravel, with respective albedos of 0.4, 0.1, and 0.45. The objective of the study is to model, simulate, and analyze the performance of the solar plant with monofacial and bifacial modules in the different types of soil. The results were compared based on the global solar irradiation on the inclined plane, system productivity, photovoltaic array productivity, and reference productivity. Additionally, the system performance ratio, standard deviation, and bifacial gain were analyzed. The data used were derived from simulations and obtained through modeling in the System Advisor Model (SAM) software, developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL). The results showed that the global solar irradiation on the inclined plane was higher for the bifacial modules, due to the capture of both front and rear radiation. In terms of productivity, bifacial gains were observed, with annual average monthly gains of 10.7% for white gravel soil, 9.6% for light sand soil, and 2.7% for

dark gravel soil. The performance ratio of the two systems of the solar plant ranged from 87% to 91%, values considered acceptable for current photovoltaic modules.

Keywords: Renewable energy; Photovoltaic solar energy; Bifacial modules; Bifacial gain; Modeling; Simulation.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao uso frequente de combustíveis fósseis em todo o mundo, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera no setor de energia atingiram 14 giga toneladas (Gt) em 2021, tanto para aquecimento quanto para produção de eletricidade, de acordo com o relatório do setor de eletricidade do Agência Internacional de Energia (AMBROSIO, 2022). Isso ocorreu, em parte, devido à recuperação econômica dos países em relação aos períodos pré-pandêmicos, o que aumentou a demanda por energia.

Para alcançar a independência energética e reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera, tem havido um aumento no uso de fontes de energia renováveis. Somente em 2021, foram investidos mais de 470 bilhões de dólares em fontes de energia limpa, de acordo com o relatório de investimento em energia limpa do (IEA, 2022). Em 2021, a geração global de fontes renováveis atingiu 7.931 Tera-Watt hora (TWh), sendo que a energia hidrelétrica foi responsável por 4.274 TWh, seguida pela energia eólica com 1.862 TWh e a energia solar com 1.033 TWh (RITCHIE, 2022).

A energia solar fotovoltaica é a segunda maior fonte em crescimento absoluto, ficando atrás apenas da energia eólica. Em 2021, houve um crescimento de 22% em relação a 2020, ultrapassando a marca de 1.000 TWh, e a geração global de eletricidade a partir da energia solar representou 3,6% do total em 2021. No entanto, as previsões indicam que é necessário um crescimento anual de 25% até 2030 para atingir as metas de emissões líquidas zero, chegando a 7.400 TWh de geração de energia solar fotovoltaica (AMBROSIO, 2022).

No contexto do desenvolvimento tecnológico visando a confiabilidade, maturidade e eficiência energética dos módulos fotovoltaicos, surgiram os módulos fotovoltaicos bifaciais, que produzem energia elétrica em ambos os lados, aproveitando a radiação solar global na parte frontal e, na parte traseira, a radiação refletida pelo solo, conhecida como albedo. Com base nessa melhoria, esses novos módulos aumentaram rapidamente sua capacidade instalada, passando de 1 mega-Watt (MW) em 2012 para 100 MW em 2019, com previsão de que, em 2029, essa nova tecnologia ultrapasse os módulos de aproveitamento da parte frontal, chamados de monofaciais, e alcan-

ce 60% do mercado mundial (NREL, 2019).

O objetivo geral deste trabalho é modelar, simular e analisar o desempenho energético de uma planta solar fotovoltaica composta por dois sistemas distintos: um sistema com módulos fotovoltaicos bifaciais e outro sistema com módulos monofaciais. Essa análise foi realizada considerando diferentes tipos de solo, como areia clara, brita branca e brita escura.

O artigo segue com a apresentação do estado da arte, tendo por base os artigos pesquisados, das metodologias, quando são representadas as características do sistema e os cálculos, os resultados da simulação e as conclusões do projeto.

2. ESTADO DA ARTE

A análise comparativa de desempenho entre sistemas compostos por módulos fotovoltaicos bifaciais e monofaciais é foco de diversos estudos na literatura técnica e científica. Comumente, a análise contempla métodos experimentais, empíricos e simulados, em diferentes climas, solos e países.

Raina et al. (2022) na Índia, realizaram uma comparação entre sistemas de módulos fotovoltaicos bifaciais e monofaciais, utilizando métodos experimentais reais e o *software* Simulink para previsão dos sistemas, considerando diferentes ângulos e sombreamentos. Na simulação houve um erro de 0,6% na comparação com 283,62 Watt-pico (Wp), sendo a potência máxima real 286,2 Wp.

Gu et al. (2021) determinaram experimentalmente o desempenho térmico e elétrico com módulos monofaciais e bifaciais com ângulos de inclinação de 30° e 60°, com terreno preparado com grama e folha de alumínio, analisando diferentes albedos de solo. O ganho bifacial médio diário foi de 13%, e o semanal foi de 14,54%. Bouguerra et al. (2020) realizaram uma análise de confiabilidade e comparação de módulos bifaciais e monofaciais na cidade de Argel, na Argélia, com ângulo de inclinação de 30° Sul, albedos de 0,2, 0,6 e 0,8 e alturas de 0,1 a 0,4 m. O resultado foi um aumento de até 20% na geração anual de energia elétrica para módulos bifaciais.

Hayibo et al. (2022) consideraram solo com cobertura de neve, e foi analisado o desempenho de uma usina fotovoltaica com capacidade instalada de 1,67 MW, em Escanaba, EUA. O período de análise esteve compreendido entre 1° de novembro de 2020 e 30 de setembro de 2021. O ganho bifacial foi de 19,31% no mês de fevereiro de 2021.

Baloch et al. (2020) realizaram medições em climas desérticos, no Qatar, com módulos inclinados a 22° Sul e compararam os módulos com bifacidade de 65% e 90%, que é um fator da eficiência da parte traseira em relação à parte frontal do módulo. O resultado foi que, para

um albedo de 0,4, o ganho bifacial anual foi de 8,6% e 16,3%, respectivamente. Posteriormente, foram utilizados materiais como areia do deserto, grama, cimento branco e chapa de alumínio para análise de albedo, registrando-se um ganho bifacial de 28,5% com o cimento branco e 20,18% para as condições do deserto.

Muehleisen et al. (2021) utilizaram dois modelos de módulos fotovoltaicos bifaciais com bifacidez de 70% e 92%, considerando sombreamento de equipamentos, e compararam com módulo fotovoltaico monofacial, com instalações leste e oeste, com altura de 40 cm do solo e laje de concreto cinza pintada de branco. O ganho bifacial do módulo com bifacidez de 70% ficou entre 15% e 20%, mas o crescimento de musgo ao longo do ano reduziu esse ganho para 10%. O módulo com bifacidez de 92% teve um ganho 3% maior que o módulo com bifacidez de 70%. Em comparação, Ayadi et al. (2021) analisaram o desempenho de módulos bifaciais, silício poli e mono cristalino e *half-cut*, com ângulo de inclinação de 30° Sul, em um telhado na Universidade da Jordânia, Amã. Com cinco semanas de medições, em 2020, o ganho de bifacialidade foi de 13,1%, 9,9% e 24,9% para *half-cut*, monocristalino e policristalino, respectivamente.

Seo et al. (2019) realizaram durante três meses um experimento com dois sistemas fotovoltaicos de 1,8 kW, sendo um monofacial e o outro bifacial, com ângulo de inclinação de 30° e altura de 2,9 m, com três tipos diferentes de solo, sendo cascalho, grama artificial e tecido não tecido (TNT) branco. O maior ganho bifacial registrado foi com o TNT branco, com um albedo de 0,21, 14,47%, e com cascalho com albedo de 0,06 o ganho foi de 5,25%.

Molin et al. (2018) instalaram dois módulos bifaciais, sendo um com ângulo de 40° Sul e um vertical Leste-Oeste, e compararam, entre 2016 e 2017, com um monofacial de inclinação 40° Sul, em dois telhados na cidade de Linköping, Suécia, com um albedo de 0,05. O ganho bifacial anual foi de 5% para o Sul, enquanto o vertical teve um ganho anual de 1% em relação ao monofacial, mas durante o período com neve registrou um ganho de 48%.

Levando em conta sujeira nas placas, Bhaduri et al. (2019) utilizaram módulos bifaciais com bifacialidade de 55,7% e 90%, e compararam com um monofacial, montados em ângulos de inclinação de 19° Sul e um bifacial Leste-Oeste, em Mumbai, na Índia. Foram instalados dois módulos de cada modelo para comparar condições com e sem sujeira. Verificou-se que placas verticais têm uma taxa de sujeira de 0,01%/dia e as inclinadas têm uma taxa de 0,39%/dia. Em termos de energia, se as placas forem limpas regularmente, os módulos inclinados produzem mais energia do que os verticais. Nesse caso, é sugerida a instalação de ambos, pois o pico de geração de energia aumenta, chegando a 7,5 horas de aproveitamento, enquanto individualmente é de 4,5 horas.

O mesmo foi verificado por Ayala et al. (2018) em estudo no deserto do Atacama em que foram instalados quatro módulos, sendo eles bifaciais, policristalinos, monocristalinos e de filme fino, mais dois módulos policristalinos para verificação da taxa de sujidade. Em oito meses de análise, a taxa de desempenho do bifacial chegou a 95%, mas devido à limpeza ocorrer apenas pela face frontal, o desempenho foi caindo ao longo do tempo; outros bons resultados foram com filme fino e policristalino, com 90% e 88%, respectivamente.

Com a análise dos diversos artigos, é possível identificar comparações entre diferentes tecnologias de painéis solares mono e bifaciais em relação a diferentes tipos de climas, inclinações, dados reais e simulados, bem como diferentes tipos de solo. Nestes artigos, foi observado um desempenho muito bom para sistemas bifaciais em solos com albedos elevados, e desempenho razoável em solos com albedos mais baixos.

3. METODOLOGIA

A Planta Solar modelada e simulada neste trabalho consiste em dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Um dos sistemas é composto por módulos monofaciais, enquanto o outro sistema utiliza módulos bifaciais. A potência nominal do sistema com módulos monofaciais é de 5,52 kilo-Watt pico (kWp), enquanto o sistema com módulos bifaciais possui uma potência nominal de 6,36 kWp.

3.1 Características dos sistemas fotovoltaicos

A Planta Solar está instalada no Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), na cidade de Araranguá-SC. A planta possui um total de 24 módulos fotovoltaicos, sendo um sistema de 12 módulos bifaciais com uma potência nominal de 530 Wp e outro sistema de 12 módulos monofaciais com uma potência nominal de 460 Wp. Esses módulos fotovoltaicos são conectados a seis micro inversores, formando três subsistemas.

Cada subsistema possui uma potência nominal de 2,12 kWp ou 1,84 kWp. Os subsistemas foram instalados em três diferentes tipos de solo: areia clara, brita escura e brita branca. Para as simulações computacionais, considerou-se um albedo de 0,4 para a areia clara, que varia de 0,3 a 0,4, um albedo de 0,1 para a brita escura e um albedo de 0,45 para a brita branca, conforme mencionado (PISELLO et al., 2014; VITUCCI et al., 2014).

As Figuras 1 e 2 apresentam a Planta Solar enquanto as Tabelas 1, 2 e 3, apresentam as características técnicas do sistema foto-

voltaico e seus componentes elétricos, de acordo com dados do *data sheet*.



Figura 1 - Planta solar, com módulo bifacial a frente e monofacial atrás



Figura 2 - Instalação dos micro inversores

Tabela 1 - Configuração de instalação

Parâmetro	Unidade	Bifacial	Monofacial
Número de painéis		12	12
Ângulo de inclinação	°	20	20
Direção		N	N
Inversor		SUN-2000G	SUN-2000G
Potência dos inversores	kW	2	2
Potência total do painel fotovoltaico	kWp	6,36	5,52

Tabela 2 - Características painéis fotovoltaicos

Parâmetro	Unidade	Monofacial	Bifacial
Nome		JKM460M-60HL4	JKM525-545M-72HL4
Potência nominal	kWp	0,46	0,53
Comprimento total	m	1,903	2,274
Largura total	m	1,134	1,134
Coefficiente de temperatura da corrente de curto-circuito	%/°C	0,048	0,048
Coefficiente de temperatura da tensão de circuito aberto	%/°C	-0,28	-0,28
Coefficiente de temperatura da potência	%/°C	0,35	0,35
Tecnologia		P type Mono-crystalline	P type Mono-crystalline
Fator de bifacialidade	%		70±5

Tabela 3 - Características Micro Inversores

Modelo	SUN-2000G
Dados de entrada	
Potência de entrada (STC)	210-600W
Tensão DC de Máxima entrada	60 V
Faixa de tensão do MPPT	25-55V
Faixa de operação DC operacional	20-60V
Corrente Máxima de Curto Circuito DC	16A
Corrente de entrada máxima	13X4
Dados de saída	
Potência nominal de Saída	2000W
Potência Máxima de Saída	2200W
Máxima corrente de Saída	9,6A
Tensão Nominal	220V
Eficiência	

Tabela 3 - Características Micro Inversores (cont.)

Eficiência CEC	95%
Eficiência de pico do inversor	96,50%
Consumo de energia noturno	50mW
Dados Mecânicos	
Dimensões	267x300x42,5mm

3.2 Software utilizado

Para modelar e simular a Planta Solar com módulos monofaciais e bifaciais em diferentes albedos, foi utilizado o *software System Advisor Model (SAM)* desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL). A versão utilizada foi a 2018.11.11.

Inicialmente, foram selecionados os dados meteorológicos correspondentes a BRA_Florianopolis.838990_SWERA.epw para representar as condições climáticas da região. Em seguida, as características técnicas dos módulos e inversores foram inseridas no *software* com base nas informações do *data sheet* fornecido pelas empresas responsáveis pelos equipamentos.

No *software*, foram modelados e desenvolvidos subsistemas com potência nominal de 2,12 kWp e 1,84 kWp, considerando diferentes tipos de albedo. Foi atribuído um valor de 0,1 para representar a brita escura, 0,4 para representar a areia clara e 0,45 para representar a brita branca, valores de albedos. Por fim, as perdas do sistema sugeridas pelo *software* foram consideradas.

Para a etapa de processamento e análise de dados, foram utilizados os resultados da simulação em *software*, incluindo a energia elétrica de corrente contínua e alternada, bem como a irradiação solar global do plano inclinado da parte frontal e traseira.

3.3 Método analítico

Para o processamento e a análise dos resultados obtidos via simulação em *software*, foram determinados indicadores de produtividade e desempenho (KYMAKIS et al., 2009; CONGEDO et al., 2013).

A Equação 1 apresenta a produtividade do sistema (Y_F) em kWh/kWp, é definida como a razão entre a energia elétrica produzida pelo sistema em corrente alternada (Energia CA) em quilowatt-hora (kWh), e a potência nominal do sistema (P_{nom}) em kWp.

$$Y_F = \frac{\text{Energia CA}}{P_{nom}} \quad (1)$$

A Equação 2 apresenta a produtividade de referência (Y_R) em kWh/kWp, que é definida como a razão entre a irradiação global do plano inclinado (H_t) em kilo watt hora por metro ao quadrado (kWh/m²) no período analisado e a irradiância de referência (G_{ref}) que equivale a 1.000 watt hora por metro ao quadrado (W/m²) por meio de testes padronizados.

$$Y_R = \frac{H_t}{G_{ref}} \quad (2)$$

A Equação 3 é a produtividade de arranjo (Y_A) em kWh/kWp é definida pela razão entre a energia elétrica de corrente contínua em kWh (Energia CC) a potência instalada do sistema analisado em kWp (P_{nom}).

$$Y_A = \frac{\text{Energia CC}}{P_{nom}} \quad (3)$$

A partir desta modelagem analítica é possível encontrar o real desempenho do sistema fotovoltaico em converter a energia solar disponível no plano inclinado em energia elétrica, que seria a razão de desempenho- P_R . O indicador é definido como a razão entre a produtividade do sistema (Y_F) e a produtividade de referência (Y_R), como apresentado na Equação 4.

$$P_R = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (4)$$

Além de verificar o desempenho do sistema fotovoltaico, foi encontrado o ganho bifacial do sistema fotovoltaico bifacial em relação ao monofacial, por meio da diferença entre a produtividade do sistema bifacial (Y_{FB}) e monofacial (Y_{FM}) menos um, como visto na Equação 5.

$$G_B = \frac{Y_{FB}}{Y_{FM}} - 1 \quad (5)$$

Por fim, foi determinado o desvio padrão, a medida de dispersão mais utilizada, pois considera todas as variabilidades dos dados analisados. Ele mede a variabilidade em torno da média. Logo, o menor valor do desvio é 0, representando que não há variação de dados

e que seus valores são iguais à média. O desvio padrão (σ) é calculado pela raiz quadrada da variância $(x_i - \bar{x})^2$ dividido pelo número de valores n, como demonstrado na Equação 6.

$$\sigma = \sqrt{\frac{|x_i - \bar{x}|^2}{n}} \tag{6}$$

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Nos próximos tópicos serão apresentados e analisados os resultados de desempenho e produtividade da planta solar e que foram obtidos e determinados a partir da modelagem e simulação no *software* SAM.

4.1 Irradiação solar global do plano inclinado

Na Figura 3 é mostrada a irradiação solar global do plano inclinado no sistema fotovoltaico monofacial. Observa-se que, para esse sistema, as diferenças de albedo dos distintos solos, não alteram de maneira significativa os valores de irradiação solar global do plano inclinado.

Além disso, é possível observar que os meses de junho e julho apresentam menores valores de irradiação solar. Em julho, a brita escura registra um valor de 100,79 kWh/m², enquanto a brita branca, em janeiro, apresenta o maior valor, com 169,66 kWh/m².

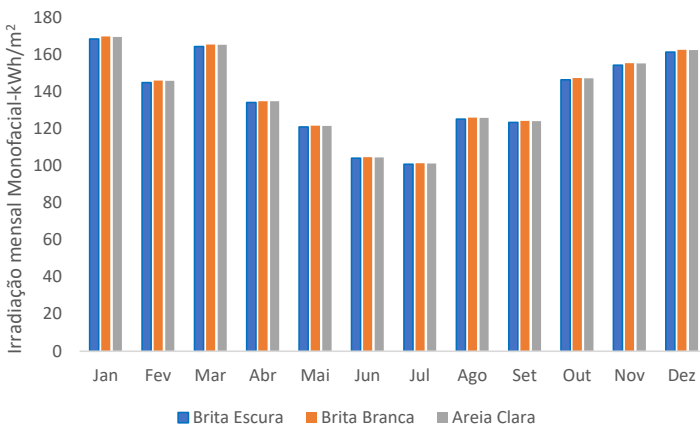


Figura 3 - Irradiação global do plano inclinado-kWh/m²-do sistema monofacial

Na Figura 4, é apresentada a irradiação solar global do plano inclinado no sistema fotovoltaico bifacial, onde é possível observar que o albedo exerce uma influência significativa nos valores desse parâmetro. Os valores de irradiação solar aumentaram devido à consideração das irradiações nas partes frontal e traseira dos módulos do sistema fotovoltaico bifacial. Em comparação com o sistema fotovoltaico monofacial, foi observado um aumento médio de 10,27% para a brita branca, 9,17% para a areia clara e 2,51% para a brita escura. O melhor mês em termos de irradiação solar foi janeiro, com a brita branca apresentando 190 kWh/m², enquanto o pior mês foi julho, com a brita escura registrando 103 kWh/m².

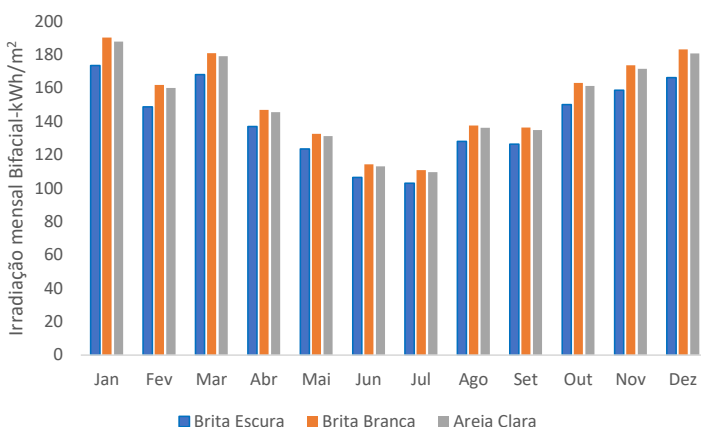


Figura 4 - Irradiação global do plano inclinado-kWh/m²-do sistema bifacial

4.2 Produtividade de referência

A produtividade de referência foi calculada com as irradiações solares globais do plano inclinado e a irradiância solar de referência de valor de 1 kW/m². Os resultados encontrados para os sistemas fotovoltaicos monofacial e bifacial estão apresentados nas Tabelas 4 e 5.

A média mensal anual da produtividade de referência para o sistema fotovoltaico monofacial foi em torno de 138 kWh/kWp para os três tipos diferentes de albedo, com um valor máximo anual de 1.658,76 kWh/kWp para a brita branca e um valor mínimo de 1.647,96 kWh/kWp para a brita escura. O mês de janeiro apresentou o maior valor de produtividade de referência, alcançando 169,66 kWh/kWp para a brita branca, enquanto o mês de junho apresentou o menor valor de

produtividade de referência para a brita escura, com 100,79 kWh/kWp. Os desvios padrões do sistema são próximos de zero, sendo que o mês de junho apresentou a menor variação.

Tabela 4 - Produtividade de referência do monofacial- Y_R -kWh/kWp

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara	Desvio padrão
jan	168,42	169,67	169,49	0,68
fev	144,89	145,91	145,77	0,55
mar	164,31	165,38	165,23	0,58
abr	134,06	134,86	134,75	0,43
mai	120,92	121,58	121,49	0,36
jun	104,07	104,63	104,55	0,30
jul	100,80	101,35	101,27	0,30
ago	125,20	125,94	125,83	0,40
set	123,42	124,21	124,10	0,43
out	146,28	147,30	147,15	0,55
nov	154,25	155,38	155,22	0,61
dez	161,34	162,55	162,38	0,66
Soma	1647,96	1658,76	1657,23	
Média	137,33	138,23	138,10	0,49

A produtividade de referência para o sistema bifacial, por compreender as irradiações solares frontais e traseiras, apresentou um aumento considerável na produtividade, e os valores apresentaram uma maior diferença em relação aos valores de referência, devido à influência dos diferentes albedos dos solos. A média mensal anual da produtividade de referência do sistema bifacial varia de 152 kWh/kWp para a brita branca a 140 kWh/kWp para a brita escura, com valores anuais de 1.831 kWh/kWp para a brita branca e 1.811 kWh/kWp para a areia clara. No entanto, os desvios padrões do sistema bifacial estão entre 4 e 10 kWh/kWp, demonstrando uma grande variabilidade do sistema em relação ao seu desempenho em diferentes condições de albedo.

Tabela 5 - Produtividade de referência do bifacial- Y_R -kWh/kWp

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara	Desvio padrão
jan	173,45	190,31	187,90	9,12
fev	148,83	161,89	160,02	7,06
mar	168,13	180,91	179,08	6,91
abr	136,98	146,97	145,54	5,40

Tabela 5 - Produtividade de referência do monofacial- Y_R -kWh/kWp (cont.)

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara	Desvio padrão
mai	123,58	132,60	131,31	4,88
jun	106,41	114,31	113,18	4,27
jul	103,07	110,79	109,69	4,18
ago	128,04	137,58	136,22	5,16
set	126,37	136,36	134,93	5,40
out	150,13	163,08	161,23	7,00
nov	158,66	173,63	171,49	8,10
dez	166,32	183,11	180,72	9,08
Soma	1689,97	1831,54	1811,31	
Média	140,83	152,63	150,94	6,38

4.3 Produtividade do arranjo

A produtividade do arranjo fotovoltaico foi calculada pela Equação 3, na qual utilizou-se a energia de corrente contínua na saída dos módulos dividida pela potência nominal dos sistemas. Nas Figuras 5 e 6, pode-se verificar que a energia produzida com a utilização da brita branca foi de 2.869 kWh para o sistema monofacial, com valores semelhantes entre os solos analisados. No entanto, para o sistema bifacial, a produtividade da brita branca foi de 3.660 kWh, e os outros dois tipos de solos apresentaram valores superiores a 3.000 kWh.

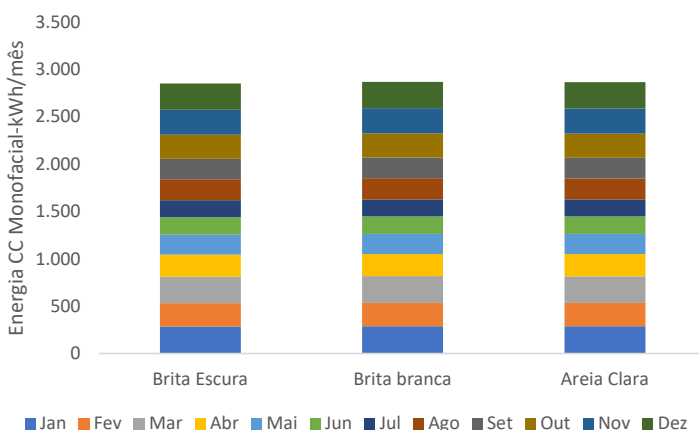


Figura 5 - Energia CC em kWh de módulos fotovoltaicos monofaciais

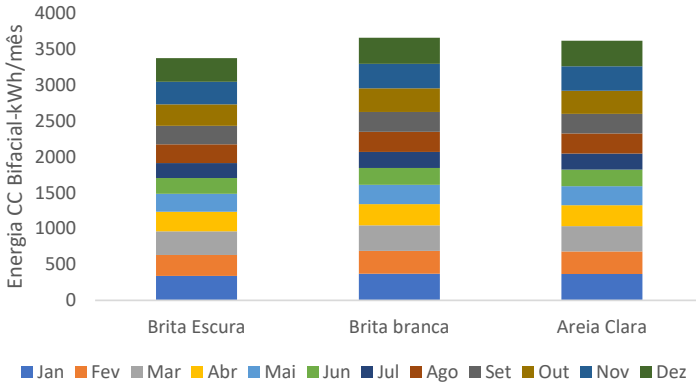


Figura 6 - Energia CC em kWh de módulos fotovoltaicos bifaciais

Com base nos valores obtidos, foi possível calcular a produtividade do arranjo fotovoltaico, como demonstrado nas Tabelas 6 e 7.

A energia anual produzida pelo sistema monofacial foi de 1.559 kWh/kWp, 1.557 kWh/kWp e 1.549 kWh/kWp, para os solos brita branca, areia clara e brita escura, respectivamente. O melhor desempenho foi observado no mês de janeiro, atingindo 156,98 kWh/kWp para brita branca, enquanto o pior desempenho ocorreu em julho, com 96,85 kWh/kWp. Vale ressaltar que os desvios padrão foram baixos, devido à falta do fator de bifacialidade, mesmo com diferentes albedos.

Tabela 6 - Produtividade do arranjo do sistema monofacial-Y_A-kWh/kWp

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara	Desvio padrão
jan	155,87	156,98	156,82	0,60
fev	133,35	134,25	134,12	0,49
mar	152,38	153,32	153,19	0,51
abr	126,08	126,80	126,70	0,39
mai	115,33	115,94	115,85	0,33
jun	100,44	100,96	100,88	0,28
jul	96,85	97,37	97,30	0,28
ago	120,05	120,73	120,64	0,37
set	117,85	118,59	118,48	0,40
out	137,93	138,84	138,71	0,49
nov	143,80	144,80	144,66	0,54
dez	149,70	150,78	150,63	0,59
Soma	1549,63	1559,36	1557,98	
Média	129,14	129,95	129,83	0,44

Para o sistema bifacial a produtividade anual foi de 1.726 kWh/kWp, 1.707 kWh/kWp e 1.592 kWh/kWp, para brita branca, areia clara e brita escura, respectivamente. O segundo melhor desempenho mensal, para os três albedos, aconteceu em março, com máximo de 168,13 kWh/m². O pior desempenho foi observado para brita preta em julho, com um crescimento de 2,51%. Devido à bifacialidade, é possível verificar desvios padrões altos, pois existem diferentes albedos para diferentes solos.

Tabela 7 - Produtividade do arranjo do sistema bifacial-Y_A-kWh/kWp

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara	Desvio padrão
jan	160,91	176,60	174,36	8,49
fev	137,30	149,37	147,64	6,53
mar	156,27	168,13	166,44	6,42
abr	129,12	138,55	137,20	5,10
mai	118,15	126,83	125,59	4,69
jun	102,95	110,64	109,55	4,16
jul	99,29	106,78	105,71	4,05
ago	123,07	132,27	130,96	4,98
set	120,97	130,57	129,2	5,19
out	141,89	154,15	152,4	6,63
nov	148,27	162,27	160,28	7,57
dez	154,70	170,37	168,14	8,48
Soma	1592,89	1726,53	1707,47	
Média	132,74	143,88	142,29	6,02

4.4 Produtividade do sistema

A realização do cálculo da produtividade, por meio da equação 1, utilizou a energia de corrente alternada (Energia CA - kWh) dos módulos fotovoltaicos monofaciais e bifaciais, como demonstrado nas Figuras 7 e 8. Para tanto, foram consideradas as potências nominais de ambos os subsistemas, que são 1,84 kWp e 2,10 kWp, respectivamente.

De acordo com as Figuras 7 e 8, o valor máximo de energia produzida anualmente pelos módulos fotovoltaicos monofaciais foi obtido com a brita branca, atingindo 2.698 kWh, sendo que o melhor mês foi janeiro, com produção de 271,74 kWh.

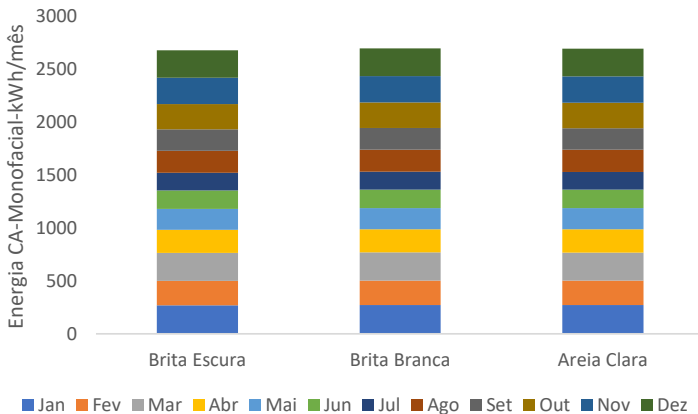


Figura 7 - Energia CA em kWh de módulos fotovoltaicos monofaciais

A Figura 8 demonstra um desempenho anual para o sistema bifacial na brita branca de 3442 kWh, com um ganho de energia de 27% em relação aos módulos monofaciais, muito por causa da influência do albedo de 0,45 proposto para o projeto.

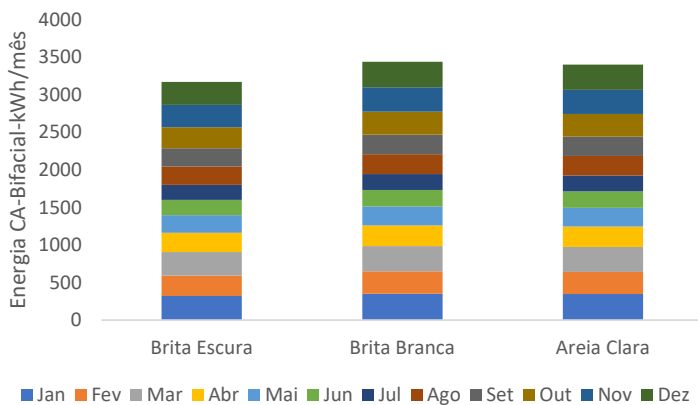


Figura 8 - Energia CA em kWh/m² de módulos fotovoltaicos bifaciais

A partir dos valores de energia elétrica de corrente alternada, foram determinadas as produtividades dos sistemas com módulos fotovoltaicos monofaciais e bifaciais, que estão apresentadas nas Tabelas 8 e 9.

Os valores anuais para o sistema monofacial variam de 1.466 kWh/kWp para a brita branca a 1.457 kWh/kWp para a brita escura. Já para os módulos bifaciais, os valores anuais são 1.623 kWh/kWp, 1.605 kWh/kWp e 1.498 kWh/kWp, para brita branca, areia clara e brita escura, respectivamente.

Tabela 8 - Produtividade $-Y_F$ do sistema monofacial em kWh/kWp

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara	Desvio padrão
jan	146,59	147,63	147,48	0,56
fev	125,41	126,25	126,13	0,45
mar	143,3	144,19	144,06	0,48
abr	118,57	119,24	119,15	0,36
mai	108,46	109,03	108,95	0,31
jun	94,45	94,94	94,87	0,27
jul	91,08	91,56	91,5	0,26
ago	112,9	113,54	113,45	0,35
set	110,83	111,52	111,43	0,38
out	129,71	130,57	130,45	0,47
nov	135,23	136,18	136,04	0,51
dez	140,78	141,8	141,65	0,55
Soma	1457,31	1466,45	1465,16	
Média	121,44	122,2	122,1	0,41

É possível verificar que os valores de desvio padrão para o sistema fotovoltaico monofacial estão muito próximos de 0, o que indica que há uma pequena variabilidade entre os diferentes tipos de solo. No entanto, mesmo para os módulos monofaciais, é possível observar um melhor desempenho quando se utiliza solos com um albedo mais elevado. A existência desse desvio padrão ocorre devido à alteração do albedo dos solos, que influencia o desempenho do módulo fotovoltaico.

Tabela 9 - Produtividade do sistema $-Y_F$ do sistema bifacial em kWh/kWp

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara	Desvio padrão
jan	151,33	166,08	163,98	7,98
fev	129,12	140,45	138,84	6,13
mar	146,97	158,12	156,53	6,03
abr	121,43	130,3	129,03	4,8
mai	111,11	119,27	118,11	4,41
jun	96,82	104,05	103,02	3,91

Tabela 9 - Produtividade do sistema- Y_F do sistema bifacial em kWh/kWp (cont.)

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara	Desvio padrão
jul	93,37	100,42	99,41	3,81
ago	115,73	124,4	123,16	4,69
set	113,76	122,78	121,5	4,88
out	133,44	144,96	143,33	6,23
nov	139,44	152,55	150,71	7,1
dez	145,49	160,22	158,13	7,97
Soma	1498,01	1623,6	1605,75	
Média	124,83	135,3	133,81	5,66

No sistema bifacial, é possível observar que quanto maior o desvio padrão, maior é a diferença entre os desempenhos dos diferentes tipos de solo, indicando uma maior eficiência para solos com maior albedo.

4.5 Índice de razão de performance

O índice de razão de performance foi calculado através da relação entre a produtividade do sistema e a produtividade de referência, buscando avaliar o desempenho ótimo do projeto estudado.

No caso do sistema monofacial, o desempenho variou de 86,55% em fevereiro (brita escura) a 90,70% em junho, com uma variação de cerca de 4% entre eles. Os melhores desempenhos ocorreram nos meses de inverno, mais especificamente em junho e julho, como demonstrado na Figura 9.

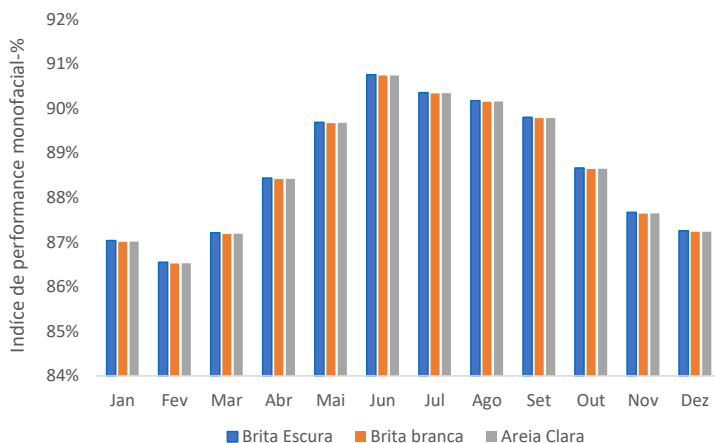


Figura 9 - Índice de razão de performance monofacial- PR -%

Já o desempenho do sistema bifacial, foi bem parecido com o monofacial e os meses de fevereiro e junho foram os piores e melhores meses, respectivamente, como pode ser observado na Figura 10.

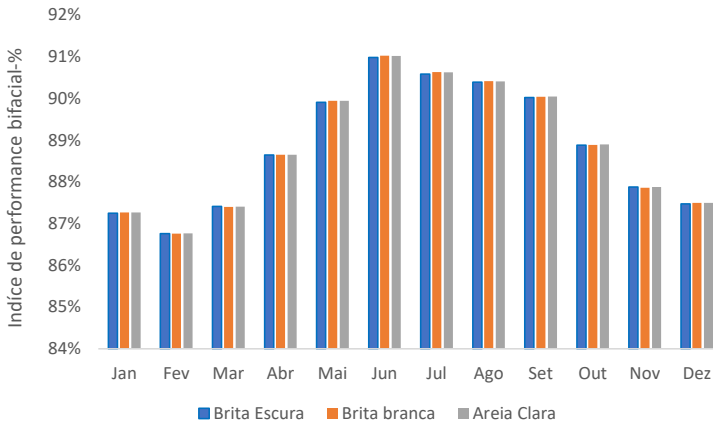


Figura 10 - Índice de performance bifacial-PR-%

4.6 Ganho bifacial

Os sistemas fotovoltaicos analisados apresentaram um ganho bifacial anual de 10,72% para a brita branca, 9,6% para a areia clara e 2,79% para a brita escura. Esses ganhos são influenciados pelos albedos analisados, que foram de 0,45, 0,4 e 0,1, respectivamente.

O mês de menor ganho bifacial foi abril, com valores de 9,28%, 8,29% e 2,41%, respectivamente. Já o mês com maior ganho foi dezembro, com valores de 12,99%, 11,63% e 3,35%, para brita branca, areia clara e brita escura, respectivamente. Essas variações ocorrem devido ao fato de que quanto maior a irradiação do mês, maior é a irradiação na parte traseira dos módulos, como demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Ganho bifacial- G_B- %

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara
jan	3,23%	12,50%	11,19%
fev	2,96%	11,25%	10,08%
mar	2,56%	9,66%	8,66%
abr	2,41%	9,28%	8,29%
mai	2,44%	9,39%	8,41%
jun	2,51%	9,60%	8,59%
jul	2,51%	9,68%	8,64%

Tabela 10 - Ganho bifacial- G_B- % (cont.)

Mês	Brita escura	Brita Branca	Areia Clara
ago	2,51%	9,56%	8,56%
set	2,64%	10,10%	9,04%
out	2,88%	11,02%	9,87%
nov	3,11%	12,02%	10,78%
dez	3,35%	12,99%	11,63%
Média	2,79%	10,72%	9,60%

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma planta solar real foi modelada e simulada no *software System Advisor Model (SAM)* para análise de seu desempenho energético.

A planta solar é composta por dois sistemas fotovoltaicos divididos em seis subsistemas, sendo três subsistemas com módulos monofaciais de potência nominal de 1,84 kWp cada, e os outros três subsistemas com módulos bifaciais de potência nominal de 2,10 kWp, cada.

Os resultados encontrados para o ganho bifacial foram de 10,72% para brita branca, 9,60% para areia clara e 2,79% para brita preta, considerando valores anuais, esses valores são bem parecidos com valores encontrados em artigos científicos, como Seo et al. (2019) e Muehleisen et al. (2021). Os índices de razão de desempenho apresentam variação entre 85% e 90% para os dois sistemas.

Pode-se destacar, nessa simulação que o ganho bifacial de melhor desempenho foi a brita branca, devido ao seu melhor índice de albedo seguido da areia clara, mas se for para utilização em ambiente real de solos para sistemas bifaciais, a areia clara seria a mais indicada para a utilização, devido ao seu custo relativamente baixo.

A partir dos valores simulados, é necessária uma análise comparativa com valores reais, de forma a verificar a compatibilidade dos módulos analisados, vale destacar que é possível que haja diferença nos valores analisados, pois os albedos utilizados no software não são medidos no solo do sistema fotovoltaico, mas calculados em pesquisas científicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROSIO, D. D'.; SCHOENFISCH, M. Electricity Sector. IEA, Paris, 09/ 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/electricity-sector>>. Acesso em: 08/04/2023.

AYADI, O.; JAMRA, M.; AMER, J.; AHMAD, L.; ALNAQEP, M. An Experimental Comparison of Bifacial and Monofacial PV Modules. 2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC), 2021, pp. 1-8 sso em: 08/04/2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9427864>>. Acesso em: 08/04/2023.

AYALA, P. et al. Bifacial Technology Performance Compared With Three Commercial Monofacial PV Technologies under Outdoor High Irradiance Conditions at the Atacama Desert. IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), 2018, pp. 0672-0675. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8547345>>. Acesso em: 08/04/2023.

BALOCH, A. A. B.; HAMMAT, S.; FIGGIS, B.; ALHARBI, F. H.; TABET, N. In-field characterization of key performance parameters for bifacial photovoltaic installation in a desert climate. Renewable Energy, Volume 159, 2020, Pages 50-63. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812030879X>>. Acesso em: 08/04/2023.

BHADURI, S.; KOTTANTHARAYIL, A. Mitigation of Soiling by Vertical Mounting of Bifacial Modules. IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 9, no. 1, pp. 240-244, Jan. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8485402>>. Acesso em: 08/04/2023.

BOUGUERRA, S.; YAICHE, M. R.; SANGWONGWANICH, A.; BLAABJERG, F.; LIIVIK, E. Reliability Analysis and Energy Yield of String-Inverter Considering Monofacial and Bifacial Photovoltaic Panels. 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation, Systems (PEDG), 2020, pp. 199-204. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9244425>>. Acesso em: 08/04/2023.

CONGEDO, P. M.; MALVONI, M.; MELE, M.; DE GIORGI, M. G. 2013. Performance measurements of monocrystalline silicon PV modules in South-eastern Italy, Energy Conversion and Management, Volume 68, Pages 1-10, ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.12.017>>. Acesso em: 08/04/2023.

GU, W.; LI, S.; LIU, X.; CHEN, Z.; ZHANG, X.; MA, T. Experimental investigation of the bifacial photovoltaic module under real conditions. Renewable Energy, Volume 173, 2021, Pages 1111-1122. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120319509#bib25>>. Acesso em: 08/04/2023.

HAYIBO, K. S.; PETSUK, A.; MAYVILLE, P.; BROWN, L.; PEARCE, J. M. Monofacial vs bifacial solar photovoltaic systems in snowy environments. *Renewable Energy*, Volume 193, 2022, Pages 657-668. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122006917#bib15>>. Acesso em: 08/04/2023.

IEA, Annual clean energy investment, 2017-2022. IEA, Paris, 26/10/2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-clean-energy-investment-2017-2022>>. Acesso em: 08/04/2023.

KYMAKIS, E.; KALYKAKIS, S.; PAPAZOGLU, T. M. 2009. Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete, *Energy Conversion and Management*, Volume 50, Issue 3, Pages 433-438, ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.009>>. Acesso em: 19/10/2023

MOLIN, E.; STRIDH, B.; MOLIN, A.; WÄCKELGÅRD, E. Experimental Yield Study of Bifacial PV Modules in Nordic Conditions. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 6, pp. 1457-1463, Nov. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8449214>>. Acesso em: 08/04/2023.

MUEHLEISEN, W.; LOESCHNIG, J.; FEICHTNER, M.; BURGERS, A. R.; BENDE, E. E.; ZAMINI, S.; YERASIMOU, Y.; KOSEL, J.; HIRSCHL, C.; GEORGHIOU, G. E. Energy yield measurement of an elevated PV system on a white flat roof and a performance comparison of monofacial and bifacial modules. *Renewable Energy*, Volume 170, 2021, Pages 613-619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121001828>>. Acesso em: 08/04/2023.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL), 2019. Bifacial PV System Performance: Separating Fact from Fiction. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74090.pdf>>. Acesso em: 08/04/2023.

PISELLO, A.; PIGNATTA, G.; CASTALDO, V. L.; COTANA, F. Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roofing and Cool Pavement. *Sustainability*. 2014; 6(8):4706-4722. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su6084706>>. Acesso em: 08/04/2023.

PIOTR, B. Solar PV. IEA, Paris, 09/2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-pv>>. Acesso em: 08/04/2023.

PORTAL SOLAR. Energia solar: o que é, para que serve, como funciona e benefícios. Portal Solar © 2014-2023. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/o-que-e-energia-solar.html>>. Acesso em: 08/04/2023.

RAINA, G.; MATHUR, S.; SINHA, S. Behavior of bifacial and monofacial photovoltaic modules under partial shading scenarios. *Int J Energy Res.* 2022; 46(9): 12837- 12853. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.8057>>. Acesso em: 08/04/2023.

RITCHIE, H., MAX, R.; PABLO, R. Electricity production by source, World. *OurWorldInData.org*, (2022). Disponível em: <<https://ourworldindata.org/energy>>. Acesso em: 08/04/2023.

SEO, Y. et al. Effect of Front Irradiance and Albedo on Bifacial Gain in 1.8kW Bifacial Silicon Photovoltaic System. 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2019, pp. 1298-1301. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8980585>>. Acesso em: 08/04/2023.

VITUCCI, E. M.; FALASCHI, F.; DEGLI-ESPOSTI, V. Ray tracing algorithm for accurate solar irradiance prediction in urban areas. *Applied optics*, 2014. Disponível em: <<https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-53-24-5465>>. Acesso em: 08/04/2023.

PROJECT DEVELOPMENT METHODOLOGIES APPLIED TO CAPITAL PROJECTS FOCUSED ON NON-RENEWABLE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES: BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Felipe Braggio Molina¹
Fernando Henriques Salina¹
Reynaldo Palacios-Bereche¹
Adriano Viana Ensinas²

¹*Universidade Federal do ABC*

²*Universidade Federal de Lavras*

DOI: 10.47168/rbe.v29i4.849

RESUMO

Esse artigo tem por objetivo demonstrar os principais resultados da análise bibliométrica relacionados as atuais publicações que divulgam a transição energética da fonte fóssil, prioritariamente do gás natural, para as renováveis; as que envolvem a produção de combustíveis gasosos como o biogás, biometano, gás sintético natural e o gás de síntese provenientes da biomassa; e, ainda, como esses se relacionam com os mais recentes conceitos de organização econômica, como a Economia Circular, a Ecologia Industrial, a *Short Supply Chain*, etc. Não distante disso, também estão expostas as metodologias sob o ponto de vista técnico, econômico e financeiro de desenvolvimento de projetos de capital para este setor, amplamente utilizadas pelo setor acadêmico de pesquisa e desenvolvimento, mas que não necessariamente estejam alinhados com as práticas estabelecidas pelo mercado.

Palavras-chave: Projeto de capital; Análise bibliométrica; Análise financeira; Análise econômica; Análise técnica.

ABSTRACT

This article aims to demonstrate the main results of bibliometric analysis related to current publications that disclose the energy transition from fossil sources, primarily natural gas, to renewable sources. It also covers publications involving the production of gaseous fuels such as biogas, biomethane, synthetic natural gas, and synthesis gas derived from biomass. Additionally, it explores how these topics relate to recent economic organization concepts, such as Circular Economy, Industrial Ecology, Short Supply Chain, etc. Notably, the article presents methodologies from a technical, economic, and financial perspective for the development of capital projects in this sector. These methodologies

are widely used in academic research and development but may not necessarily align with established market practices.

Keywords: Capital project; Bibliometric analysis; Financial analysis; Economic analysis; Technical analysis.

1. INTRODUCTION

The growing global energy demand, along with various environmental impacts associated with it, has exerted pressure on the social, political, economic, and technological restructuring of consumption. This is aimed at diversifying the current energy matrix by increasing the share of sources with low or zero carbon emissions, such as biomass, wind, and solar. This shift addresses the various challenges that the current fossil-based economy has propagated in a detrimental manner (CULABAL et al., 2022; NEWMAN, 2019; PAUNA et al., 2021; VELVIZHI et al., 2022).

In order to design, construct, and operate the necessary infrastructure for such diversification, industrial project engineering is directly linked to all phases of project development and operations, from strategic planning to implementation. Due to this, not only is the public sector exposed to uncertainties and investment risks associated with projects aimed at addressing or mitigating energy demand and its social and environmental issues upon implementation, but also the private sector. This is because these projects aim to either maintain or financially enhance capital over time (MERROW, 2011; NEWMAN, 2019; TOWLER et al., 2008).

Thus, various methodologies and indicators have been suggested for the assessment and development of capital projects, both by the private sector and academia. However, currently, there is limited published information on this subject, especially concerning capital projects aimed at producing biogas, biomethane, and hydrogen. In order to explore this frontier and propose a new perspective for capital project development, this article employs bibliometric analysis as a method of literature research to qualitatively and quantitatively delineate all formally documented knowledge in the literature (DONTHU et al., 2021; HADDOW, 2018).

Therefore, bibliometric analysis was chosen due to a methodological exclusion adopted as a justification criterion. Meta-analysis is typically applied when the research has a homogeneous character with an extensive sample population of articles (e.g., >200), and systematic literature review is employed when the research is specific with a smaller sample database of references (e.g., approximately 40). Given that the research is multidisciplinary and involves interaction with various themes, it exhibits heterogeneity across a diverse and extensive

sample population. This characteristic allows for determining the current state of the art in the knowledge areas that intersect with industrial project engineering. Thus, justifying the application of bibliometric analysis as advocated by Donthu et al. (2021).

2. METHODOLOGY

The bibliometric mapping technique was adopted to conduct quantitative and qualitative metric analyses to comprehend the interrelationships and the current stage of the topics studied in this research, which consists of five stages, according to the Figure 1.

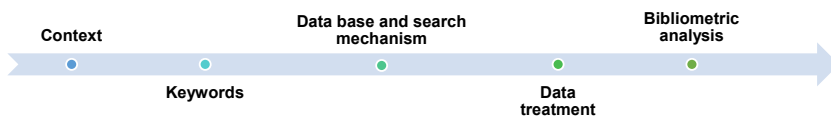


Figure 1 - Structure of the general bibliometric analysis method

2.1 Context, problem, and the main objective

The context of this research is based on recurrent observations in the field of capital project development regarding the market opportunities for the establishment of transformation industries using renewable energy sources, as outlined below, but not limited to:

- Expansion of the industrial production concept through Circular Economy, aiming to meet the indicators established by the United Nations (UN) 2030 agenda for Sustainable Development Goals (SDGs).
- Restriction on the flow and utilization of natural gas near the coastal producing regions in Brazil due to the limited pipeline infrastructure, except along GasBol.
- Opportunities, growth, and market penetration facilitated by the maturation of technologies (digestion, carbonization, gasification, and electrolysis) for the production of biogas, biomethane, synthetic natural gas, synthesis gas, and hydrogen from agricultural, industrial, and urban waste.
- Establishment of public policies and pricing mechanisms for products derived from renewable sources.

Thus, the issue lies in the inefficiency and/or lack of methodology and tools for the holistic planning of the implementation of capital projects. This planning should enable the development and exploration of regional resources with energy value, providing the means to secure

large-scale investments in various regions of Brazil. As can be observed in Figure 2, there is a high concentration of natural gas processing facilities and its distribution along the Brazilian coast, with limited access to this resource in the interior of the country.

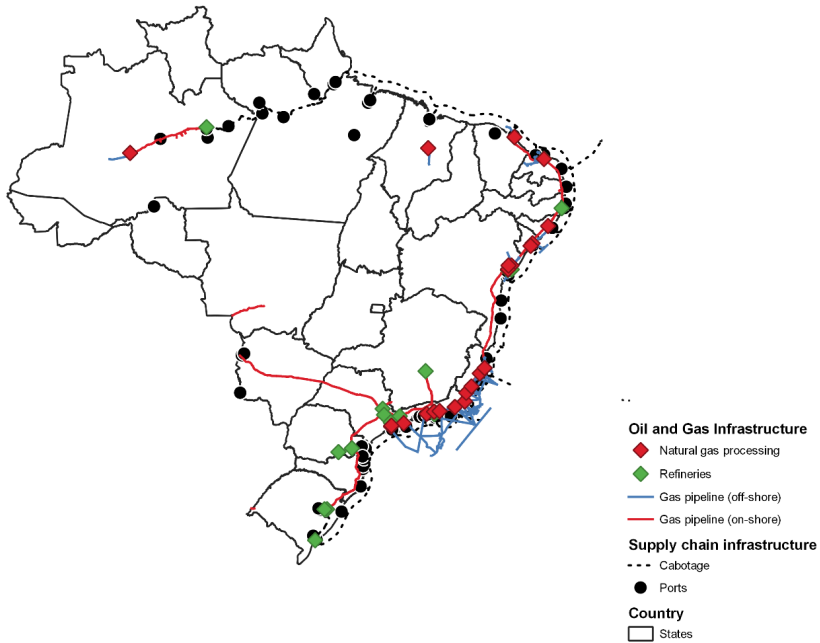


Figure 2 - Existing and projected infrastructure for the transport and treatment of natural gas in Brazil

With the suggestion of developing a tool based on a multidisciplinary methodology, there is a possibility of better directing investments toward capital projects in the energy and transformation sector. This tool would assess regional resources to meet the needs of both the public and private sectors. It has the potential to maximize the financial return margin with optimal geographic distribution for the implementation of production units for biogas, biomethane, synthetic natural gas, and hydrogen, as analyzed thus far.

2.1.1 Scope

According to Haddow (2018) and Treinta et al. (2013), the first step of bibliometric analysis is to determine the context and scope (Figure 3), the problem, and the questions to be addressed in the research. These aspects guide the subsequent step, which is related to the selection of keywords that best fit the theme.

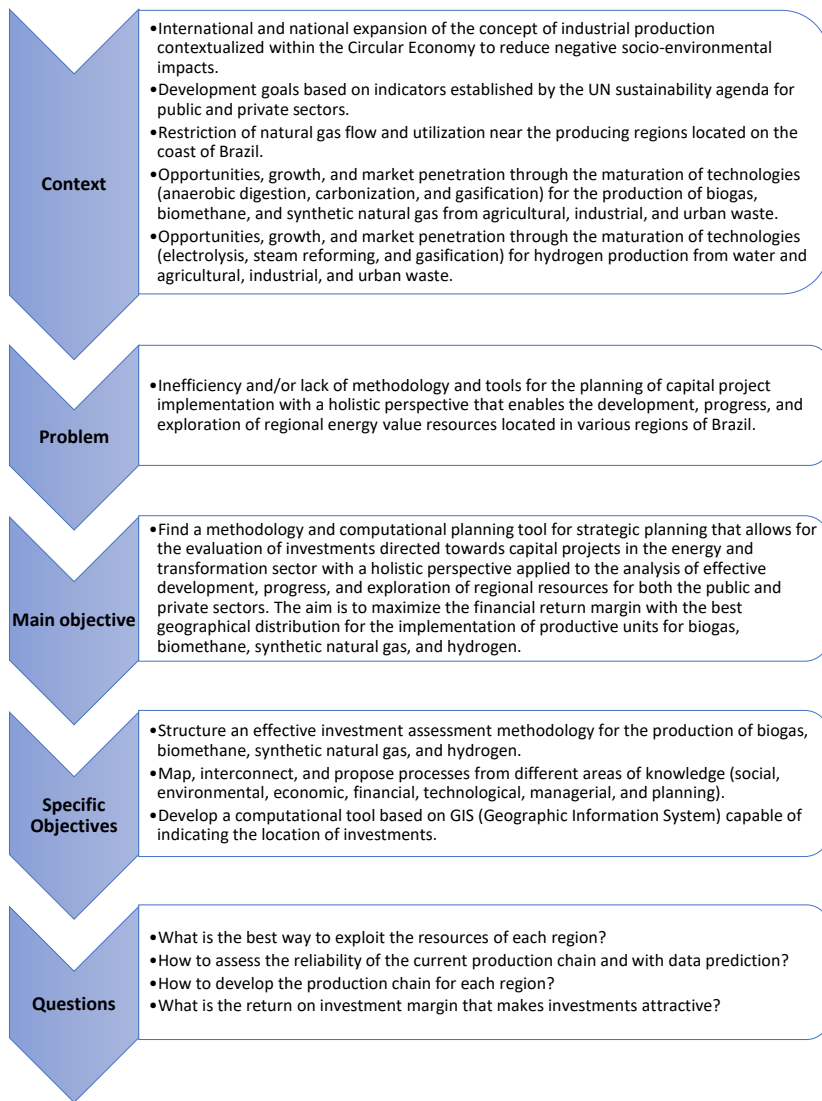


Figure 3 - Thematic synthesis of the research

2.2 Keywords definition

The keywords were separated into groups related to fossil or renewable sources and into themes that describe methodological contexts, as depicted in Figure 4 and Table 1.

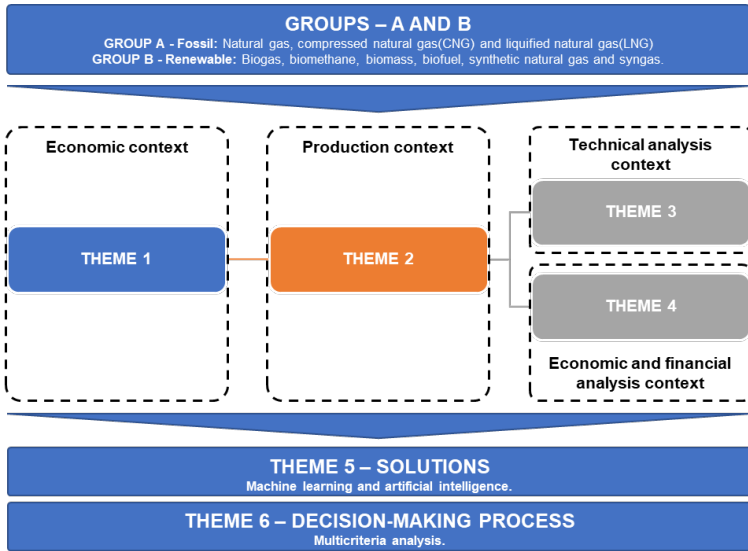


Figure 4 - Branching structure or themes of keyword identification

Table 1 - Division of keyword groups

Item	Keywords	Subject
Group		
A	"Natural gas" OR "compressed natural gas" OR "cng" OR "liquified natural gas" OR "lng"	Economy and market
B	"Biogas" OR "biomethane" OR "biomass" OR "biofuel" OR "biofuels" OR "synthetic natural gas" OR "sng" OR "syngas"	Economy and market
Theme		
Theme 1	"Capital project" OR "capital projects"	Economy and market
Theme 2	"Circular economy" OR "industrial ecology"	Economy and market
Theme 3	"Techno-economic analysis" OR "techno-economic assessment" AND ("geoprocessing" OR "GIS" OR "Geographic Information System" OR "material flow analysis" OR "mfa" OR "life-cycle assessment" OR "life-cycle analysis" OR "lca" OR "lca" OR "supply chain" OR "process systems design" OR "process integration" OR "pinch analysis" OR "water pinch analysis"	Methodology
Theme 4	"Techno-economic analysis" OR "techno-economic assessment" AND ("Capital expenditure" OR "Capex" OR "operational expenditure" OR "Opex" OR "internal rate return" OR "irr" OR "minimum attractive rate" OR "MAR" OR "net present value" OR "npv" OR "ebitda" OR "risk assessment")	Methodology
Theme 5	"Machine Learning" OR "Artificial Intelligence"	Methodology
Theme 6	"Multicriteria Analysis" OR "decision-making process"	Methodology

2.3 Database and search mechanism

For analysis, scientific publication databases found in the SCOPUS (SCO) and Web of Science (WOS) platforms were utilized. The search mechanism employed the "advanced search" feature for the inclusion of relevant research groups, associating them in the following manner: Themes 1 or 2 with an analysis theme (3, 4, or 5), and the decision-making process Theme 6, as illustrated in Figure 4 and Table 1.

The variable used in synthesizing the SCO base was TITLE-ABS-KEY, which searches for terms entered in the title, abstract, and keywords fields. As for WOS, the variable TS was used, which is equivalent to the one used for the SCO base (Table 2).

Table 2 - Database search synthesis

Item	Base	DATABASE SEARCH SYNTHESIS
1A	SCO	TITLE-ABS-KEY(A AND TEMA 1 AND NOT B)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1)
1B	SCO	TITLE-ABS-KEY(B AND TEMA 1 AND NOT A)
	WOS	TS=(B AND TEMA 1)
2A	SCO	TITLE-ABS-KEY(A AND TEMA1 AND TEMA 2 AND TEMA 6 AND NOT B)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1 AND TEMA 2 AND TEMA 6)
2B	SCO	TITLE-ABS-KEY(B AND TEMA1 AND TEMA 2 AND TEMA 6 AND NOT A)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1 AND TEMA 2 AND TEMA 6)
3A	SCO	TITLE-ABS-KEY(A AND TEMA1 AND TEMA 3 AND TEMA 6 AND NOT B)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1 AND TEMA 3 AND TEMA 6)
3B	SCO	TITLE-ABS-KEY(B AND TEMA1 AND TEMA 3 AND TEMA 6 AND NOT A)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1 AND TEMA 3 AND TEMA 6)
4A	SCO	TITLE-ABS-KEY(A AND TEMA1 AND TEMA 4 AND TEMA 6 AND NOT B)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1 AND TEMA 4 AND TEMA 6)
4B	SCO	TITLE-ABS-KEY(B AND TEMA1 AND TEMA 4 AND TEMA 6 AND NOT A)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1 AND TEMA 4 AND TEMA 6)
5A	SCO	TITLE-ABS-KEY(A AND TEMA1 AND TEMA 5 AND TEMA 6 AND NOT B)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1 AND TEMA 5 AND TEMA 6)
5B	SCO	TITLE-ABS-KEY(B AND TEMA1 AND TEMA 5 AND TEMA 6 AND NOT A)
	WOS	TS=(A AND TEMA 1 AND TEMA 5 AND TEMA 6)

2.4 Database treatment

The database was treated by excluding incomplete records, such as those lacking author information, title, publication year, keywords, and abstract. This same method was suggested by Treinta

et al. (2013), as it complicates information traceability. Furthermore, the database improvement considered adherence through the analysis of titles and abstracts to the research theme and the exclusion of publications that could be duplicates due to the use of two databases. Conference papers and book chapters not associated with scientific journal publications were also excluded, as they are often not subjected to peer review (GARRIDO et al., 2020).

The Microsoft Excel version 365 software was used to compile and process the data. For the mapping analysis, the VOSviewer software version 1.6.18 was utilized. The temporal analysis factor was delimited by the date of the database query creation on April 15, 2023, excluding articles published in 2023 to avoid quantitative distortions.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Analysis and quantitative reduction of articles regarding the lack of data

Upon compiling the two databases, 13,778 articles were found. After exclusion as described in section 2, 3,585 unique records remained, as shown in Table 3.

Table 3 - Total number of articles published by Group and Theme

Theme	Groups [un.]						Distribution [%]					
	A1	A1	A2	B	B1	B2	A	A1	A1	B	B1	B2
1	4	0	0	3	0	0	0.11	0	0	0.08	0	0
2	0	1	84	0	6	1,433	0	0.03	2.34	0	0.17	39.97
3	0	0	60	0	1	252	0	0	1.67	0	0.03	7.03
4	0	0	34	0	1	168	0	0	0.95	0	0.03	4.69
5	0	5	269	0	5	1,259	0	0.14	7.50	0	0.14	35.12
Total	4	6	447	3	13	3,112	0.11	0.17	12.46	0.08	0.37	86.61

Regardless of Group "A" or "B," the other themes associated with Theme 1 yielded a few published articles. However, these were excluded after applying the mentioned filters, leading to the insertion of a suffix denoted by the number 1 in the established synthesis in Table 2 to identify the research item without the use of Theme 1. This resulted in the themes described in Table 1. Similarly, when the groups and themes were associated with Theme 6, although in some cases, a few articles were returned, a suffix with the number 2 was added to indicate the results that excluded Theme 6 from the search synthesis.

3.2 Analysis between themes related to the quantity of publications

The quantity of publications analyzed from Table 1, and plotted in Figure 5, draws special attention to the difference between the number of articles published with Theme 2B and Theme 5B compared to the others. Among these, 87% of articles published between 1990 and 2022 belong to these themes. These articles pertain to products or inputs obtained from renewable sources combined with concepts associated with circular economy, industrial ecology, and analysis techniques involving machine learning and artificial intelligence concepts (Table 1 and Table 2).

The low number of publications found with the term "capital project" combined with the defined keywords in the research could be related to the following hypotheses:

- Divergence in the specific technical terminology used in the market and academia.
- The term "capital project," widely employed in private project management institutions (e.g., Project Management Institute - PMI and the International Project Management Associate - IPMA), in economics, finance, or even in engineering focused on financial analysis, may be primarily associated with publications in books and conference papers or in scientific journals outside the utilized database.
- Possible lack of interest in academia to address the topic directly focusing on capital valuation.
- The term "capital project" might be indirectly included under the term "techno-economic analysis" used in academic research.
- Strong inclination towards simplified studies of capital and operational costs that use only the payback criterion as the investment decision-making criteria, without addressing more complex analyses related to the quality of investment through net present value (NPV), internal rate of return (IRR), minimum attractive rate of return (MARR), and break-even.

These factors more accurately and precisely constitute the economic and financial analysis of the project and the company, typically adopted by the market.

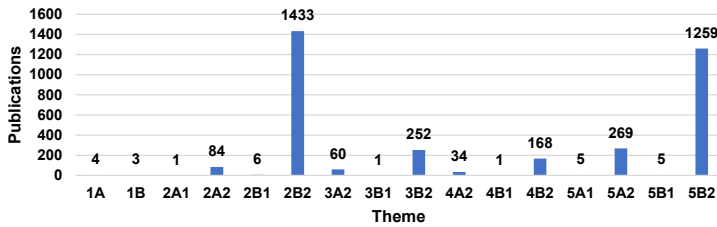


Figure 5 - Publications by theme

Based on the data shown in Figure 5, which illustrates the quantity of publications by themes, it is evident that researchers tend to align with the criteria established by the United Nations regarding sustainability by reorganizing productive sectors in order to:

- Decarbonize or "defossilize" industrial sectors by reducing the consumption of raw materials and inputs.
- Make supply chains and production processes more efficient.
- Reuse by-products, waste, or effluents within the production chain.

Moreover, there is a difference in the quantity of articles that use Theme 6 or not. By not utilizing decision-making methods considering multiple criteria (Theme 6), solutions presented in the articles may lack a systemic business perspective and only address criteria defined by an organization in a bottom-up manner. This means they only consider indicators relevant to operational and managerial viewpoints, such as quantity, operational parameters, socio-environmental impact, financial return, etc. This approach may not encompass a top-down perspective, i.e., a strategic business viewpoint developed by a specific group within a company. This group requires a comprehensive set of financial information such as NPV, IRR, payback, break-even, pricing, along with data related to other indicators like socio-environmental impacts, stakeholder and shareholder acceptance, associated public policies, technical performance, etc.

Still, when analyzing Figure 5 concerning published articles, there is a highlight for themes involving the context of machine learning and artificial intelligence, grouped in Theme 5. Of the total articles published during the period, around 35% are from this theme applied to the assessment of renewable resources, and only 7.64% for fossil sources.

However, when observing themes related to technical analyses (Theme 3) and economic analyses (Theme 4), deviations between them are also demonstrated. Comparing articles published with Theme 5 (machine learning and artificial intelligence), only 14.4% are associated with publications with Themes 3 and 4. For either of the associated

groups, A or B, the technical theme slightly shows more interest due to the number of publications. This greater number of publications indicates the normal flow of technological development, as it is necessary to demonstrate technical feasibility before economic feasibility. However, this does not dismiss the possible lack of interest or synchronization between the Research and Development (R&D) sector, mainly concentrated in academia and the private sector. The latter requires technical and economic analyses to be aligned and linked to technological development for investment attractiveness to emerge.

To support this perspective on the distance between academia and the private sector in the context of capital projects, the article published by Nsanzumuhire et al. (2020) can be cited. In this article, the authors conduct a systematic review of 68 articles addressing the university-industry interaction. They indicate that, for both the university and industry, among the indicators analyzed, the commercial relationship between these two institutions—the financial return from the partnership, particularly for developing countries—is the one with the lowest value and/or attractiveness. This relationship is mainly influenced by socio-political aspects.

3.3 Evolution of themes over the years

According to the database treated in the context of the research (Figure 6), the first publication for Theme 5 associated with Group B occurred in 1991. In this article, the authors (KIMES et al., 1991) used artificial intelligence to determine phenotypic characteristics of vegetation. As for Group A, the first publication took place in 1998 for the same Theme 5. Li et al. (1998) describe a control system for pigging-assisted pipeline inspection using artificial intelligence to assess the instrument inside the pipeline.

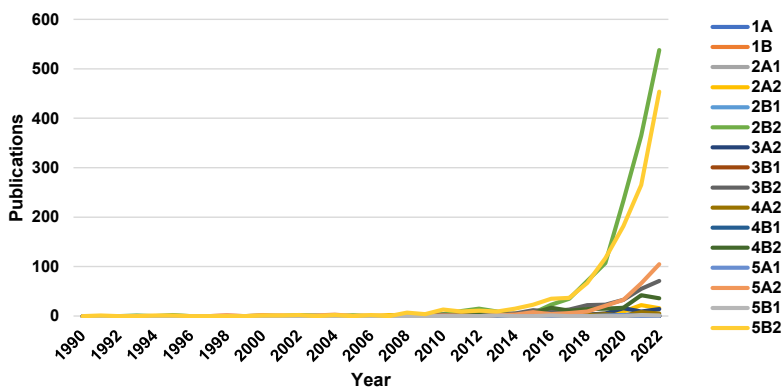


Figure 6 - Number of annual publications in a historical series by theme

As shown in Figure 6 there are intervals during the publication years that involve the defined themes. Although some articles on the themes have been published since 1985, such as the emergence of Industrial Ecology in 1989 by Frosch et al. (1989), and Circular Economy in 1991 by Pearce et al. (1991), it was only in 2014 that all five themes emerged simultaneously for Group A and, in 2017, for Group B (Table 4 and Table 5).

Table 4 - Number of publications per theme per year

Year	Theme										Total
	1A	2A1	2A2	3A1	3A2	4A1	4A2	5A1	5A2		
2014	1	0	5	0	2	0	1	0	3	12	
2015	0	0	1	0	2	0	1	0	8	12	
2016	0	0	2	0	3	0	4	0	4	13	
2017	0	0	10	0	4	0	3	1	6	24	
2018	0	0	2	0	3	0	2	0	9	16	
2019	0	1	5	0	5	0	4	1	21	37	
2020	1	0	9	0	16	0	1	2	33	62	
2021	0	0	22	0	9	0	8	0	66	105	
2022	1	0	16	0	14	0	5	0	105	141	
Year	1B	2B1	2B2	3B1	3B2	4B1	4B2	5B1	5B2	Total	
2014	0	0	2	0	5	0	1	0	15	23	
2015	0	0	6	0	12	0	6	0	23	47	
2016	0	0	23	0	9	0	17	1	35	85	
2017	1	1	35	0	13	0	11	0	37	98	
2018	0	1	71	0	22	0	14	0	67	175	
2019	0	0	107	1	23	0	15	0	117	263	
2020	0	1	233	0	33	1	17	0	182	467	
2021	0	1	365	0	55	0	42	2	265	730	
2022	0	2	538	0	71	0	36	1	454	1,102	

This demonstrates the growing interest and a greater trend towards publications related to sustainability, more efficient production methods, and analysis methods involving artificial intelligence, followed by subjects containing techno-economic analyses applied to various production situations. Finally, financial analyses and decision-making methods are nearly nonexistent.

Similarly, when observing the start of discussions on more efficient production methods and the emergence of concepts such as Circular Economy and Industrial Ecology (1989 and 1990) and comparing them with the current discussions in the public and private sectors of

the economy, it can be emphasized how these sectors are lagging behind. There is an approximately 30-year difference between the maturation of proposals and their actual application.

Although a simple numerical analysis leads to this assertion, it can be justified as the market exhibits a conservative behavior regarding new ways of structuring and how and when to implement and/or deploy new production technologies. This is because it needs to protect itself from unnecessary exposure to the risks of financial resource loss associated with high investments in unknown subjects, as mentioned by Krugman et al. (2015) and Towler et al. (2008).

This analysis is supported by the suggested contingency of 50%, reserved to mitigate risks related to the learning curve, implementation, and operation during the capital project development phase that utilizes technologies not yet fully mastered by the market. This can be compared with the contingency practiced around 5 to 15% for technologies already known and mastered by the sectors, as explained by Towler et al. (2008).

Nevertheless, other themes combined with the term "capital project" did not achieve a representation equivalent to the number of publications when compared to others. This may indicate little interest in developing a holistic and more complex project analysis structure and/or methodology with greater applicability to the public and private sectors. Publications have sought more in-depth exploration of specific subjects or theoretical application in case studies for analysis with limited multidisciplinary interaction, especially those related to capital valuation.

3.4 Analysis of themes by occurrence and association of keywords

By inputting the data into the VOSViewer software, an analysis of keyword occurrences was conducted to visualize how they interrelated. It can be observed in both Table 5 and Figure 7(a) that three clusters were formed (Figure 7(b), (c) e (d)) based on the strength of the connections between the words and separated by colors, following the approach of Tamala et al. (2022).

Table 5 - Compilation of themes for occurrence analysis

Keywords	Cluster	Strenght	Occurence
Biomass	3	11,327	958
Biofuel	2	5,167	274
Circular economy	1	5,073	568
Biofuels	2	4,949	298
Machine learning	3	4,803	694

Table 5 - Compilation of themes for occurrence analysis (cont.)

Keywords	Cluster	Strenght	Occurence
Economic analysis	2	4,456	313
Anaerobic digestion	1	4,305	298
Biogas	1	4,289	322
Sustainable development	2	3,874	287
Life cycle	2	3,669	240

The most frequent occurrence is related to the word "biomass," which becomes the central term for the entire holistic analysis and is connected to all the main terms of the other clusters, as shown in Figure 7(a). This same word is strongly linked to other themes: circular economy, biofuels, and machine learning.

Thus, as suggested by Ampah et al. (2021), based on the data presented in Table 4 and Table 5, it is possible to indicate that when the context is to develop a methodology that analyzes the renewable biofuel production market using geoprocessing and considering financial aspects of investment, research tends to focus more on studying biofuel production processes under organizational aspects suggested by the circular economy. This aims to meet sustainable development through economic analyses using machine learning, as outlined in Table 5.

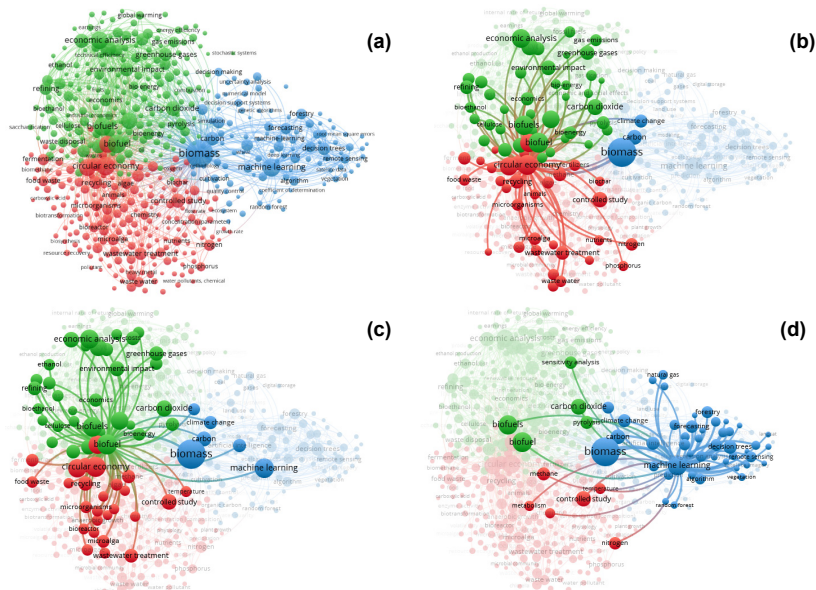


Figure 7 - Network of total keywords by occurrence for the research and main interaction networks between clusters

Although the analyses have shown a strong technical-economic focus in publications, there is a weak connection, representing low occurrence, between economic terms and the keyword network. Terms such as "capital expenditure (CAPEX)" and its possible derivations do not appear, and there is no connection between "operational expenditure (OPEX)" and the central terms or even a direct link between the latter and CAPEX.

At this point, there is a divergence between academia and the market. In the market, during economic feasibility studies that underpin the go/no-go decision for a project, values obtained for CAPEX and OPEX are always developed and used as parameters. The aim is to formulate economic and financial indicators such as NPV, IRR, and payback. These, along with the Minimum Attractive Rate (TMA), defined by the company's strategic planning, assist in the decision-making process of whether to proceed with the investment or not.

3.4.1 Analysis by occurrence and association of keywords: Cluster 1

Cluster 1 is defined by the main term "Circular Economy," as shown in Figure 7(b). The Circular Economy has a strong connection with these top 10 terms: anaerobic digestion, biogas, controlled study, economic aspect, recycle, effluent treatment, methane, nitrogen, microalgae, and fermentation.

There is an indication that in this context, the Circular Economy may be directed towards the creation of biorefineries or increased biogas (methane) production through fermentative processes (anaerobic digestion) by cultivating microalgae in effluent treatment. Analyzing the key articles that appear in the database with a connection strength greater than 100, Stiles et al. (2018) propose that the proper management of organic waste and effluents can be optimized by producing microalgae for subsequent processing in biorefineries to obtain inputs for feed, biofuels, biofertilizers, and high-value-added chemical compounds due to European restrictions in nitrate-vulnerable areas.

On the other hand, Mishra et al. (2019) emphasize that the establishment of biorefineries using microalgae as raw material is not yet economically viable. To address this, the author suggests reducing, recycling, and reusing residues from microalgae processing for biofuel production and high-value-added chemical compounds, especially through life cycle analysis. Alternatively, Al-Jabri et al. (2021) highlight in their article that industrial and municipal effluents are contaminated with a high load of dissolved nitrogen and phosphorus in the environment. According to the authors, with improved effluent treatment, microalgae could be used to optimize the contaminant removal process

and recover their energy value through the production of chemicals and biofuels.

Wainaina et al. (2020) conduct a systematic review of the main technological routes involving anaerobic digestion for biogas production and high-value-added chemical compounds, including nitrogen recovery and fixation. Finally, Kumar et al. (2021) analyze the use of biochar from residues produced in the food industry as an additive to increase biogas production via anaerobic digestion.

3.4.2 Analysis by occurrence and association of keywords: Cluster 2

Cluster 2 is defined by the main term "Biofuels," as shown in Figure 7(c). The term biofuels has a strong connection with the following top 10 terms: economic analysis, sustainable development, life cycle (life cycle analysis), carbon dioxide, techno-economic analysis, environmental impact, waste management, greenhouse gases, biofuel production, and refining.

There is an indication that the term biofuel in this context is directed towards techno-economic analyses that aim for biofuel production, focusing on the product life cycle with the goal of reducing greenhouse gas emissions (carbon dioxide). This, consequently, reduces environmental impacts through proper waste management to meet the criteria established for sustainable development.

Similarly to the analysis in section 3.4.1, when examining the main articles in the database Klein-Marcuschamer et al. (2012) analyze the contribution of enzyme costs in ethanol production from corn, as well as a sensitivity analysis on raw material prices and the fermentation process itself. Venkata Mohan et al. (2016) address the biofuel topic associated with sustainable development in a holistic manner, presenting a study focused on the development of biorefineries that use waste as raw material in different technologies to produce biomaterials and biocompounds through the circular economy as a context, comparing these with the substitution of the same products from fossil sources.

Liska et al. (2009) perform a life cycle analysis of corn-produced ethanol in the United States by transforming the plant into a biorefinery through the inclusion of anaerobic digestion in the process. The authors conclude that this production system can mitigate greenhouse gas emissions not only in the industry but also in the agricultural inventory, consequently reducing the importation of oil for conversion into fuels used in the transportation sector.

3.4.3 Analysis by occurrence and association of keywords: Cluster 3

Cluster 3 is defined by the main term "Biomass," as shown in Figure 7(d). The term "biomass" has a strong connection with these top 10 terms: machine learning, carbon, decision tree, artificial intelligence, climate change, prediction, learning systems, forest, optimization, and neural networks.

With the synthesis of these key terms, the database indicates that Ali et al. (2015) conducted a review of the main machine learning techniques associated with predicting biomass production through spatial analysis via satellite by quantifying and qualitatively interpreting soil moisture and biophysical aspects of crops. Maimaitijiang et al. (2017) similarly analyze soybean production, but with some specificities, using spatial information provided via satellite (images and thermal information) to predict productivity, utilizing biochemical data to determine aspects of the crop both under and above the soil cover.

In contrast, with a weaker connection to the term "biomass" the main studies for biomass production appear in the article by Antwi et al. (2017) in which, through a neural network, the prediction of biogas and methane production is analyzed using UASB reactors with effluents from the potato processing industry. Wang et al. (2020) apply the same prediction process to different biomass types in biogas production to analyze reactor operational parameters and determine production yields. On the other hand, De Clercq et al. (2020) focuses on predicting biogas production by applying the random forest technique in the food industry, evaluating co-digestion.

3.5 Analysis of themes by countries

Relating the publications by origin, the 10 most representative countries in terms of the number of publications and consequently having a greater interest in the entire context defined in section 2.1, are highlighted in Figure 8. Brazil is in 8th place, with 3.43% of the publications.

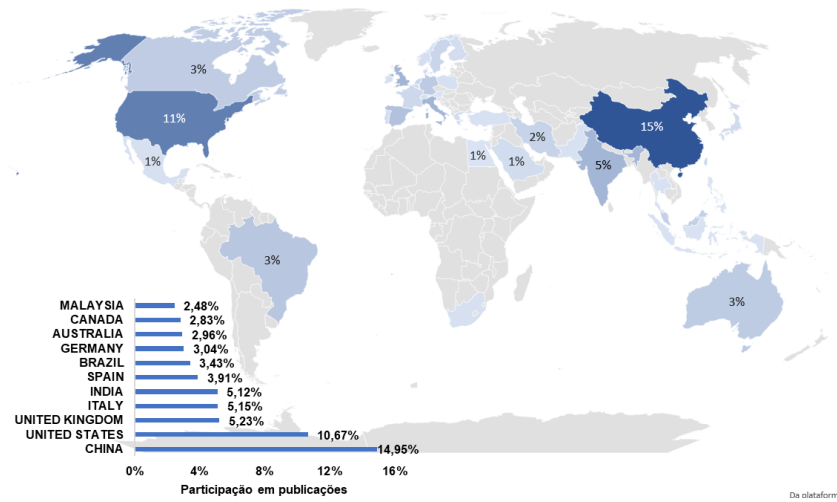


Figure 8 - Global representation percentage regarding the theme

3.6 Research development perspectives and technological advancement

In addition to the occurrence analyses presented in sections 3.4.1, 3.4.2 and 3.4.3, another analysis determined by the bibliographic review of the most recent articles (2022) that adhere to the research context and are chosen by the number of citations can demonstrate the frontier of technological advancement and highlight the gaps that still need to be filled for capital projects related to energy transition to be better implemented in the industry.

Taking a top-down approach to the organization of the economic production sector, Hoang et al. (2022) start with the use and management of urban solid waste in the production of chemical compounds and fuels. Unlike other articles, the authors not only emphasize technological aspects but also address economic cost criteria (implementation and operation) by suggesting supply chain and distribution organization and discuss how this can impact the local economy.

In a complementary analysis to the aforementioned article, Dar et al. (2022) evaluate primary sources of renewable energy through GDP and CO2 emissions as common aspects for comparison with fossil energy sources. The authors employ various causality assessment techniques to establish balance and comparison of indicators, resulting in the suggestion of various long-term public policies for energy transition. To complement these studies, Culaba et al. (2022) focus on the application of artificial intelligence in analyzing economic aspects in creating biorefineries under the Circular Economy context.

As a transition and connection between publications that highlight the economic organization of the energy sector, the article by Aghnashlo et al. (2022) critically analyzes the current methodologies used for studies, such as techno-economic analysis, life cycle analysis, energy analysis, energy, and exergy analysis. In this article, the authors highlight the advantages and disadvantages of each and proposes their interrelation to provide more accurate results.

From a productive perspective, three articles stand out for the number of citations. The first of these was published by Seo et al. (2022), in which the authors discuss the use of lignocellulosic biomass as promising raw materials to replace fossil sources by developing biorefineries. This article focuses on the advantages and disadvantages of using thermochemical technologies for biomass conversion into higher value-added chemicals, considering future technological prospects, including optimizing these processes by associating them with artificial intelligence algorithms. Chilakamarry et al. (2022) address the use of agricultural residues in biochemical (fermentative) processes in biofuel production and how this process can act in remediation to reduce effluents and contaminants under the Circular Economy context. Similarly, analyzing both thermochemical and biochemical processes, Velvizhi et al. (2022) propose that all projects for the production of chemicals from lignocellulosic materials should be analyzed from the perspective of energy integration, recovering and providing inputs inherent to the production stages with the aim of reducing energy consumption, inputs, and raw materials. Finally, Chen et al. (2022) highlight an extremely important step in the conversion chain of lignocellulosic materials, pre-treatment. In his article, the authors describe the procedural characteristics, influencing factors, techno-economic aspects, and challenges that this step still faces.

Making the analysis even more profound from the perspective of production prediction methodologies, Wang et al. (2022) propose the use of artificial intelligence to predict aspects of production processes that use biomass in the production of chemical compounds and fuels. Through a critical analysis, the authors demonstrate the pros and cons, highlighting the limitations of using different artificial intelligence techniques. On the other hand, Andrade Cruz et al. (2022) apply artificial intelligence algorithms to understand the aspects influencing biogas production by anaerobic digestion.

Therefore, it can be noted that with the sample of publications used, there are concentrations of research that address macroeconomic aspects, productive aspects, and a few economic aspects. It is important to note that the way of organizing, developing, and evaluating projects is different from that applied in the market. The interdisciplinary correlation, information generation, financial indicators, and decision-making aspects are quite different from those demonstrated in the

analyzed articles.

Of all the articles, only one publication demonstrated a critical analysis proposing an interconnection between different analysis techniques, developing a methodology for projects, which, even so, is far from the working structure adopted in engineering consulting companies responsible for developing these types of projects in the market. In publications that proposed some kind of economic analysis, CAPEX might have been applied within some other term, or OPEX might have been developed simplistically for determining operational costs as an aid to pricing definition.

Once again, terms like IRR, NPV, TMA, and EBITDA or break-even were not even mentioned, and these are the most important financial aspects used by the industry to evaluate the project and identify whether to proceed with strategic investments or not. Another aspect that cannot be assessed, as there are almost no publications in this context, is analytical methodologies to aid decision-making, such as multi-criteria analysis (MCA), in addition to risk analyses.

In conclusion, it is possible to say that there is a lack of organizational development that seeks to concatenate a holistic methodology for project evaluation, considering methods widely adopted in the market and suggesting new ones from academia to improve performance and results during development. This can bring greater security to investments made by the public and private sectors.

4. CONCLUSION

Although these analyses play an important role in research to demonstrate the advancement of the knowledge frontier, one point to highlight is the potential flaw in the applied methodology. For example, the researched authors may have used various means of technical or financial determination, but when suggesting keywords, they might have chosen another term that represented the researched topics, and these terms might not accurately reflect the exposed data.

In any case, it is important to emphasize that financial and economic indicators that were used in this analysis are commonly employed in the market, following established criteria of good practice that better guide investment decisions. Therefore, it is crucial for academia, in its research endeavors, to align with these practices. This alignment ensures the provision of more accurate and practical insights while adhering to a scientific methodology that is replicable and verifiable. This approach enhances the reliability of the information, a factor often lacking in market data that may not disclose the method behind information determination.

Nevertheless, it was possible to verify that research aiming to optimize the productive sector using biomass as a raw material began

around 1991 with publications involving artificial intelligence techniques. This suggests a temporal lag of 30 years concerning current socio-political and market discussions on these topics.

When comparing energy sources like fossil and renewable, there is a significant difference in the number of publications, about 74.5% between them. Approximately 87% pertain to topics involving renewable sources, while only 13% pertain to fossil sources. Furthermore, there is a trend for researchers over the years to investigate analysis techniques involving the concept of artificial intelligence.

The formation of clusters demonstrated the correlation between different topics, suggesting that the central theme interconnecting the entire research revolves around the term "biomass." Notably, financial indicators demonstrating business profitability are not addressed, implying that research is primarily dedicated to developing technical analyses that evaluate productive aspects. There was an insignificant number of published articles using decision-making methodologies, such as multi-criteria analysis, which was also evident when analyzing the co-occurrence of terms in the formed clusters.

Thus, there may be a gap in the research sector suggesting a methodology and development tool focused on strategic planning for market development with a holistic view. This would enable the correct exploration of regional resources with energy value, providing security for large-scale investments.

The development of this methodology and tool could allow for an evaluation of investments directed towards capital projects in the energy and transformation sector. It would assess regional resources for both the public and private sectors, aiming to maximize the financial return margin with the best geographical distribution for the implementation of biogas, biomethane, synthetic natural gas, and hydrogen production units at a top-down evaluation level.

Otherwise, the dynamics of academic publications often do not prioritize the analysis of economic feasibility. This is partly due to the nature of research, which frequently explores topics distant from advanced stages, such as pilot units or practical demonstrations. A complementary approach to assessing the impact of these publications would be to link them to the Technology Readiness Levels (TRLs) of the addressed technologies. It can be observed that publications with more citations are often associated with technologies in more immature stages, reflecting significant interest in the scientific community even before the practical implementation phase.

REFERENCES

AGHBASHLO, M.; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H.; SHAHBEIK, H. The role of sustainability assessment tools in realizing bioenergy and bioproduct systems. *Biofuel Research Journal*, Terengganu, v. 9, n. 3, p. 1697–1706, Set. 2022. DOI: 10.18331/BRJ2022.9.3.5. Disponível em: <https://doi.org/10.18331/BRJ2022.9.3.5>. Acesso em: 01 nov. 2022.

AL-JABRI, H.; DAS, P.; KHAN, S.; THAHER, M.; ABDSULQUADIR, M. Treatment of wastewaters by microalgae and the potential applications of the produced biomass—a review. *Water*, Basel, v. 13, n. 1, p. 1-26, Dec. 2021. DOI: 10.3390/w13010027. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13010027>. Acesso em: 01 nov. 2022.

ALI, I.; GREIFENEDER, F.; STAMENKOVIC, J.; MAXIM, N.; NOTARNICOLA, C. Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data. *Remote Sensing*, Basel, v. 7, n. 12, p. 16398–16421, Dec-2015. DOI: 10.3390/rs71215841. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs71215841>. Acesso em: 01 nov. 2022.

AMPAH, J. D.; YUSUF, A. A.; AFRANE, S.; JIN, C.; LIU, H. Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 320, p. 128871, Ago-2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128871. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128871>. Acesso em: 01 nov. 2022.

ANDRADE CRUZ, I.; CHUENCHART, W.; LONG, F.; SURENDRA, K. C.; ANDRADE, L. R. S.; BILAL, M.; LIU, H.; FIGUEIREDO, R. T.; KHANAL, S. K.; FERREIRA, L. F. R. Application of machine learning in anaerobic digestion: Perspectives and challenges. *Bioresource Technology*, v. 345, p. 126433, Dec-2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126433. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126433>. Acesso em: 02 fev. 2022.

ANTWI, P.; LI, J.; BOADI, P. O.; MENG, J.; SHI, E.; DENG, K.; BONDINUBA, F. K. Estimation of biogas and methane yields in an UASB treating potato starch processing wastewater with backpropagation artificial neural network. *Bioresource Technology*, v. 228, p. 106–115, Jan-2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.12.045. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.045>. Acesso em: 03 fev. 2022.

CHEN, W.; NIŽETIĆ, S.; SIROHI, R.; HUANG, Z.; LUQUE, R.; PAPA-DOPOULOS, A. M.; SAKTHIVEL, R.; NGUYEN, X. P.; HOANG, A.T. Liquid hot water as sustainable biomass pretreatment technique for bioenergy production: A review. *Bioresource Technology*, v. 344, Out-2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126207. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126207>. Acesso em: 13 dez. 2022.

CHILAKAMARRY, C. R.; MIMI SAKINAH, A. M.; ZULARISAM, A. W.; SIROHI, R.; KHILJI, I. A.; AHMAD, N.; PANDEY, A. Advances in solid-state fermentation for bioconversion of agricultural wastes to value-added products: Opportunities and challenges. *Bioresource Technology*, v. 343, p. 126065, Oct-2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126065. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126065>. Acesso em: 09 jan. 2022.

CULABA, A.; MAYOL, A. P.; SAN JUAN, J. L.; VINOYA, C.; CONCEPCION II, R.; BANDALA, A.; VICERRA, R.; UBANDO, A.; CHEN, W.; CHANG, J. Smart sustainable biorefineries for lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, v. 344, n. PB, p. 126215, Dec-2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126215. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126215>. Acesso em: 09 jan. 2022.

DAR, A. A.; HAMEED, J.; HUO, C.; SARFRAZ, M.; ALBASHER, G.; WANG, C.; NAWAZ, A. Recent optimization and panelizing measures for green energy projects; insights into CO2 emission influencing to circular economy. *Fuel*, v. 314, p. 123094, Dec-2021. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.123094. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123094>. Acesso em: 09 jan. 2022.

DE CLERCQ, D.; WEN, Z.; FEI, F.; CAICEDO, L.; YUAN, K.; SHANG, R. Interpretable machine learning for predicting biomethane production in industrial-scale anaerobic co-digestion. *Science of the Total Environment*, v. 712, p. 134574, Jan-2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134574. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134574>. Acesso em: 03 fev. 2022.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285–296, Mai-2021. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>. Acesso em: 27 set. 2022.

FROSCH, R. A., GALLOPOULOS, N. E. Strategies for Manufacturing the impact of industry on the environment. *Scientific American*, Set-1989. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24987406>. Acesso em: 09 ago. 2020.

GARRIDO, S.; SEQUEIRA, T.; SANTOS, M. Renewable energy and sustainability from the supply side: A critical review and analysis. *Applied Sciences*, v. 10, n. 17, p. 5755, Ago-2020. DOI: 10.3390/APP10175755. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10175755>. Acesso em: 27 set. 2022.

HADDOW, G. Bibliometric research. In: WILLIAMSON, K. et al. (org.). *Research Methods*. Amsterdam: Elsevier, 2018. Cap. 10, p. 241-266.

HOANG, A. T.; VARBANOV, P. S.; NIŽETIĆ, S.; SIROHI, R.; PANDEY, A.; LUQUE, R.; NG, K. H.; PHAM, V. V. Perspective review on Municipal Solid Waste-to-energy route: Characteristics, management strategy, and role in circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 359, Mai. 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131897. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131897>. Acesso em: 27 set. 2022.

KIMES, D. S.; HARRISON, P. R.; RATCLIFFE, A. A knowledge-based expert system for inferring vegetation characteristics. *International Journal of Remote Sensing*, v. 12, n. 10, p. 1987–2020, Mai. 2007. DOI: 10.1080/01431169108955233. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431169108955233>. Acesso em: 27 set. 2022.

KLEIN-MARCUSCHAMER, D.; OLESKOWICZ-POPIEL, P.; SIMMONS, B.; BLANCH, H. The challenge of enzyme cost in the production of lignocellulosic biofuels. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 109, n. 4, p. 1083–1087, Abr. 2012. DOI: 10.1002/bit.24370. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bit.24370>. Acesso em: 10 out. 2022.

KRUGMAN, P.; WELLS, R. *Economics*. 4. Ed. Nova Iorque: Worth Publishers, 2015. 1200 p.

KUMAR, M.; DUTTA, S.; YOU, S.; LUO, G.; ZHANG, S.; SHOW, P.; SAWARKAR, A.; SINGH, L.; TSANG, D. A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge. *Journal of Cleaner Production*, v. 305, p. 127143, Abr-2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127143. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127143>. Acesso em: 21 fev. 2022.

LI, T.; MING, F.; JIQUAN, Y. J. Design and realization of the computer simulation system for the spherical pigging in gas pipeline. *Tianranqi Gongye/Natural Gas Industry*, 1998.

LISKA, A.; YANG, H.; BREMER, V.; KLOPFENSTEIN, T.; WALTERS, D.; ERICKSON, G.; CASSMAN, K. Improvements in life cycle energy efficiency and greenhouse gas emissions of corn-ethanol. *Journal of Industrial Ecology*, v. 13, n. 1, p. 58–74, Fev-2009. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2008.00105.x. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00105.x>. Acesso em: 21 fev. 2022.

MAIMAITIJIANG, M.; GHULAM, A.; SIDIKE, P.; HARTLING, S.; MAIMAITIYIMING, M.; PETERSON, K.; SHAVERS, E.; FISHMAN, J.; PETERSON, J.; KADAM, S.; BURKEN, J.; FRITSCHI, F. Unmanned Aerial System (UAS)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 134, p. 43–58, Nov-2017. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.10.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.011>. Acesso em: 21 fev. 2022.

MERROW, E. W. *Industrial megaprojects: Concepts, strategies, and practices for success*. 1. Ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons. 384 p.

MISHRA, S.; ROY, M.; MOHANTY, K.. Microalgal bioenergy production under zero-waste biorefinery approach: Recent advances and future perspectives. *Bioresource Technology*, v. 292, p. 122008, Ago-2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122008>. Acesso em: 21 fev. 2022.

NEWMAN, D. J. *Decision-Making for Oil and Gas Projects: Using Front End Loading and Decision Analysis More Effectively*. 2019. 162 p. Tese (Doutorado em Petróleo) – Australian School of Petroleum, The University of Adelaide, 2019. Disponível em: https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/121701/1/Newman2019_PhD.pdf. Acesso em: 21 fev. 2020.

NSANZUMUHIRE, S.; GROOT, W. Context perspective on University-Industry Collaboration processes: A systematic review of literature. *Journal of Cleaner Production*, v. 258, p. 120861, jun-2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120861. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120861>. Acesso em: 13 mar. 2021.

PAUNA, T.; LAMPELA, H.; AALTONEN, K.; KUJALA, J. Challenges for implementing collaborative practices in industrial engineering projects. *Project Leadership and Society*, v. 2, p. 100029, Out-2021. DOI: 10.1016/j.plas.2021.100029. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plas.2021.100029>. Acesso em: 09 mar. 2022.

PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. *Economics of Natural Resources and the Environment*. 1. Ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990, 378 p.

SEO, M. W.; LEE, S. H.; NAM, H.; LEE, D.; TOKMURZIN, D.; WANG, S.; PARK, Y. Recent advances of thermochemical conversion processes for biorefinery. *Bioresource Technology*, v. 343, p. 126109, Oct-2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126109. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126109>. Acesso em: 15 nov. 2022.

STILES, W.; STYLES, D.; CHAPMAN, S.; ESTEVES, S.; BYWATER, A.; MELVILLE, L.; SILKINA, A.; LUPATSCH, I.; GRÜNEWALD, C.; LO-VITT, R.; CHALONER, T.; BULL, A.; MORRIS, C.; LLEWELLYN, C. Using microalgae in the circular economy to valorise anaerobic digestate: challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, v. 267, p. 732–742, Ago-2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.07.100. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.100>. Acesso em: 15 nov. 2022.

TAMALA, J.; MARAMAG, E.; SIMEON, K.; IGNACIO, J. A bibliometric analysis of sustainable oil and gas production research using VOSviewer. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 7, p. 100437, Fev-2022. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100437. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100437>. Acesso em: 15 nov. 2022.

TOWLER, G.; SINNOTT, R. *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. 1. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008, 1266 p.

TREINTA, F.; FARIAS FILHO, J. R.; SANT'ANNA, A.; RABELO, L. Metodologia de pesquisa bibliográfica com a utilização de método multicritério de apoio à decisão. *Production*, v. 24, n. 3, p. 508–520, 2013. DOI: 10.1590/s0103-65132013005000078. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132013005000078>. Acesso em: 15 nov. 2020.

VELVIZHI, G.; BALAKUMAR, K.; SHETTI, N. P.; AHMAD, E.; PANT, K. K.; AMINABHAVI, T. M. Integrated biorefinery processes for conversion of lignocellulosic biomass to value added materials: Paving a path towards circular economy. *Bioresource Technology*, v. 343, p. 126151, Out-2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126151. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126151>. Acesso em: 06 dec. 2022.

VENKATA MOHAN, S.; NIKHIL, G. N.; CHIRANJEEVI, P.; REDDY, C. N.; ROHIT, M. V.; KUMAR, A. N.; SARKAR, O. Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: Critical review and future perspectives. *Bioresource Technology*, v. 215, p. 2–12, Jun-2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.130. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.130>. Acesso em: 15 nov. 2020.

WAINAINA, S.; AWASTHI, M.; SARSAIYA, S.; CHEN, H.; SINGH, E.; KUMAR, A.; RAVINDRAN, B.; AWASTHI, S.; LIU, T.; DUAN, Y.; KUMAR, S.; ZHANG, Z.; TAHERZADEH, M. Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. *Bioresource Technology*, v. 301, p. 122778, Jan-2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122778. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>. Acesso em: 09 set. 2021.

WANG, L.; LONG, F.; LIAO, W.; LIU, H. Prediction of anaerobic digestion performance and identification of critical operational parameters using machine learning algorithms. *Bioresource Technology*, v. 298, p. 122495, Dez-2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122495. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122495>. Acesso em: 09 set. 2021.

WANG, Z.; PENG, X.; XIA, A.; SHAH, A.; HUANG, Y.; ZHU, X.; ZHU, X.; LIAO, Q. The role of machine learning to boost the bioenergy and biofuels conversion. *Bioresource Technology*, v. 343, p. 126099, Out-2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126099. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126099>. Acesso em: 09 jan. 2023.

Informações para Autores

Propostas de publicações em consonância com o disposto na missão da Revista Brasileira de Energia (RBE) poderão ser enviadas ao Comitê Editorial para análise, por meio de *link* específico existente no site da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético (www.sbpe.org.br).

A formatação final para publicação ficará por conta do departamento de diagramação da RBE; desta forma, os artigos deverão ser enviados em formatação simples, conforme o disposto a seguir:

- Os trabalhos devem ser editados e enviados em arquivo *Word*.
- Papel A4, margens 20 mm, fonte *Times New Roman* tamanho 12, espaçamento simples.
- Figuras com resolução mínima de 300 dpi.
- Para gráficos, usar mesmo padrão de cores e estilo.
- Equações em formato editável; não devem ser enviadas como figuras.
- No arquivo em word devem constar: título, resumo, palavras-chave, abstract, keywords.
- Os nomes dos autores **NÃO** devem ser abreviados, e as respectivas informações como instituição e e-mail devem ser apresentadas **SO-MENTE** no sistema e **NÃO** devem constar no arquivo *Word*.
- Todos os itens devem ser numerados sequencialmente, exceto Resumo e *Abstract*. Não usar numeração automática do processador de texto. Serão aceitos no máximo 3 subníveis de numeração, a partir dos quais poderão ser usadas letras como único subnível adicional.
- Títulos de figuras e tabelas, abaixo e acima das mesmas, respectivamente, sem descrição de fonte, a qual deverá ser feita ao longo do texto, muito menos a existência do termo “autoria própria”.
- Referências a trabalhos deverão ser citadas no texto com nome do autor (ou autores) e ano de publicação, entre parêntesis [Ex.: (Autor 1, 1928); (Autor 1 e Autor 2, 1928)]. Na existência de mais de dois autores, escreve-se o nome do primeiro autor seguido da expressão et al. [Ex.: (Autor 1 et al, 1928)].

Referências Bibliográficas:

- Somente deverão ser citados autores ou trabalhos que estejam incluídos na lista de referências bibliográficas, assim como todos os trabalhos listados nas referências bibliográficas deverão ter sido citados no texto.

