

revista brasileira de
ENERGIA



Sociedade Brasileira de
Planejamento Energético

Volume 30, Nº 1, 1º Trimestre de 2024

Diagramação

Kelly Fernanda dos Reis

Revisão

Arnaldo Walter

**Revista Brasileira de Energia
Vol. 30 - nº1**

Itajubá, 2024 - SBPE

Editor: Arnaldo Walter
127 p.

1 - Energia - artigos

2 - Publicação científica

ISSN: 2317-6652

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

revista brasileira de
ENERGIA

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

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 – 205 dias –, sendo apenas ligeiramente menor – 203 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 132 dias, sendo de 155 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 97 dias.

O compromisso assumido é alcançar e manter o tempo de tomada de decisão abaixo de 150 dias e, com os resultados deste número, melhoramos mais uma vez os indicadores temporais em relação aos resultados anteriores. O tempo médio de tomada de decisões tem se mantido abaixo de 150 dias desde o primeiro número publicado em 2022. Por outro lado, a RBE segue trabalhando para melhor seus procedimentos, e para que melhores resultados sejam alcançados.

Artigos mais acessados e os mais citados

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

Em pouco mais de seis anos houve pouco mais de 200 mil *downloads* de artigos publicados; o levantamento aqui apresentado foi

feito na primeira semana de abril de 2024. Entre todos os artigos já publicados, os cinco mais acessados são apresentados na Tabela 1; não houve mudanças na lista em relação ao anteriormente divulgado. 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	10.458
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	7.652
Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de Tubarão - SC	Oswaldo L. S. Pereira e Felipe F. Gonçalves	2008	v. 14 n. 01	7.601
<i>Investment analysis for wind energy projects</i>	Wagner Sousa de Oliveira e Antônio Jorge Fernandes	2013	v. 19 n.02	6.521
Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos	Alessandra Magrini	2011	v. 08 n. 01	4.297

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	Araldo Walter	2021	v. 27, n. 3	1.886
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	1.070
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	932

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

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de citações
Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes	Luiz Augusto Horta Nogueira, Rafael Capaz, Electo Silva Lora	2021	v. 27, n. 3	874
(In)Justiça energética: definição conceitual, parâmetros e aplicabilidade no caso do Brasil	Vinicius Eduardo Ribas, André Felipe Simões	2020	v. 26 n. 04	840

Tabela 3 - Artigos com mais citações acadêmicas; levantamento feito com uso do Google Acadêmico na primeira semana de Abril 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	147
Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos	Alessandra Magrini	2001	v. 08 n. 01	112
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	65
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	40
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	39
Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de Tubarão – SC	Osvaldo L. S. Pereira, Felipe F. Gonçalves	2008	v. 14 n. 01	34
Mudança institucional e inovação na indústria brasileira de petróleo	André Tosi Furtado	2002	v. 09 n. 01	33
Planejamento energético: Necessidade, objetivo e metodologia	Sérgio Valdir Bajay	1989	v. 01 n. 01	27

Tabela 3 - Artigos com mais citações acadêmicas; levantamento feito com uso do Google Acadêmico na primeira semana de Abril 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	24

O Comitê Editorial da RBE agradece a contribuição de todos os autores.

Arnaldo Walter

Editor Responsável - Revista Brasileira de Energia

EDITORIAL

Este é o primeiro número do volume 30, de 2024, da Revista Brasileira de Energia (RBE). Desde o primeiro fascículo publicado em 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 Carlos José de Paiva Gama e coautores analisa a liberalização do mercado de energia elétrica no Brasil, e traz uma reflexão à luz das lições apreendidas em outras nações.

Já o trabalho de Breno Bezerra Freitas e coautores apresenta uma metodologia de dimensionamento de plantas fotovoltaicas flutuantes em lagos urbanos e reservatórios, com resultados de estudo de caso feito para Fortaleza.

José Janiere Silva de Souza e coautores analisam os efeitos da deposição de sujeira sobre painéis fotovoltaicos instalados em ambiente urbano, com foco na avaliação dos impactos sobre a eficiência de geração elétrica.

Por sua vez, o artigo de Luíza Lisboa Naegele e coautores analisa as transformações no setor de gás natural, no Brasil, com emprego do conceito de Diamante de Porter.

Finalmente, o artigo assinado por Thais Prates e Conrado Augustus de Melo versa sobre a análise de desempenho de instalações solares fotovoltaicas com células bifaciais, e estudo de caso sobre possível instalação na Bahia.

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

Arnaldo Walter

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

SUMÁRIO

LIBERALIZAÇÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: EXPERIÊNCIAS E LIÇÕES APRENDIDAS COM OUTRAS NAÇÕES.....11

Carlos José de Paiva Gama, Pedro Manuel Gonçalves Cruz, André Pinto Fernandes

METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS FLUTUANTES EM LAGOS URBANOS E RESERVATÓRIOS.....28

Breno Bezerra Freitas, Caio Ramos de Menezes, Cinthya Martins Felix, Daniel Rebouças Jaguaribe, Dionízio Porfírio de Assis, Francisco Elmo Lima Uchoa Filho, Gabriel Henrique Mesquita Pinheiro, João Paulo Dias Liberado, Karol Damasceno Cysne, Kennedy Romualdo Guedes Coimbra, Marcelo Rocha Braga, Otacílio José de Macedo Nunes, Paulo Cesar Marques de Carvalho

EFEITOS DA MITIGAÇÃO MANUAL DE SUJIDADE NO DESEMPENHO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA EM AMBIENTE URBANO.....46

José Janiere Silva de Souza, Paulo Cesar Marques de Carvalho, Ivonne Montero Dupont

AS TRANSFORMAÇÕES EM CURSO NO SETOR BRASILEIRO DE GÁS NATURAL: UMA ANÁLISE DA DINÂMICA COMPETITIVA SOB A PERSPECTIVA DO DIAMANTE DE PORTER.....67

Luíza Lisbôa Naegele, Romeu e Silva Neto

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO BIFACIAL EM USINAS FOTOVOLTAICAS NO NORDESTE DO BRASIL.....103

Thais Prates, Conrado Augustus de Melo

LIBERALIZAÇÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: EXPERIÊNCIAS E LIÇÕES APRENDIDAS COM OUTRAS NAÇÕES

Carlos José de Paiva Gama¹
Pedro Manuel Gonçalves Cruz¹
André Pinto Fernandes¹

¹Universidade da Beira Interior (Portugal)

DOI: 10.47168/rbe.v30i1.836

RESUMO

O artigo visa conhecer as experiências de outras nações que passaram por processos de liberalização do mercado de energia elétrica. O mercado brasileiro de energia elétrica sofreu grandes transformações ao longo de sua existência e está próximo de mais uma mudança: a abertura do mercado de comercialização de energia para todos os consumidores. Desse modo, são colhidas informações sobre as características dos mercados de outras nações que já passaram pelo processo de liberalização e, com base nas informações coletadas, são apresentadas sugestões para o regulador brasileiro, as quais poderão ser adotadas no processo de liberalização do mercado de energia elétrica.

Palavras-chave: Liberalização; Energia elétrica; Brasil; Mercado de energia elétrica; Mercado livre de energia.

ABSTRACT

The article aims to present the experiences of other nations that have gone through energy market liberalization processes. The Brazilian energy market has undergone major transformations throughout its existence and is close to another change, the opening of the energy trading market to all consumers. In this way, information is collected on the characteristics of the markets of other nations that have already gone through the liberalization process and, based on the information collected, suggestions are presented to the Brazilian regulator, which may be adopted in the liberalization process of the Brazilian energy market.

Keywords: Liberalization; Electricity; Brazil; Electricity market; Free energy market.

1. INTRODUÇÃO

O mercado de energia elétrica brasileiro sofreu profundas mudanças ao longo do último século, saindo de um mercado fragmentado e desregulado para um sistema robusto, integrado nacionalmente e fortemente regulado (BERTIM, 2020). No momento, o mercado brasileiro de eletricidade se prepara para mais um passo em direção à liberalização total e abertura competitiva na comercialização, que até então atingiu apenas uma parcela dos consumidores.

Grande parte dos países desenvolvidos reconhece que os subsetores de transmissão e distribuição de energia são monopólios naturais, ao mesmo tempo que aos subsetores de geração e comercialização são considerados potencialmente competitivos (PHAM, 2019). Nesse contexto, a liberalização em muitos países ocorreu a partir da década de 1990 com o objetivo de se alcançar as características de mercados competitivos, ou seja, redução de preços e aumento da qualidade dos serviços prestados.

No entanto, a literatura mostra que os processos de liberalização dos mercados ocorreram de formas diferentes e chegaram a resultados distintos (ALI et al., 2022; GHAZVINI et al., 2016; PALACIOS M. & SAAVEDRA P., 2017; PHAM, 2019). Conhecer os processos de liberalização em outros países é importante, visto que a experiência anterior pode nortear as decisões do regulador brasileiro na difícil missão de regular as relações entre comercializadores e consumidores em um mercado competitivo.

A liberalização dos mercados de energia pode ser bem-sucedida em alguns países, mas pode fracassar em outros (GHAZVINI et al., 2016). Nesse contexto, avaliar se um processo de liberalização foi bem-sucedido ou não, passa pela análise simultânea de vários indicadores, sejam eles relacionados a custo ou qualidade do serviço prestado.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo principal, baseado nas experiências passadas, apresentar sugestões que norteiem o regulador nacional durante o processo de liberalização do mercado de energia brasileiro, visto que se trata de um processo complexo e que envolve demasiados agentes, sejam eles produtores ou consumidores.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: as seções 2 e 3 apresentam a caracterização do sistema elétrico brasileiro; a seção 4 expõe a literatura conhecida sobre a experiência internacional; a seção 5 demonstra as características atuais dos mercados europeus; a seção 6 discorre sobre as sugestões do autor para o regulador brasileiro e a seção 7 conclui o trabalho expondo as limitações e futuras linhas de pesquisas.

2. MATRIZ ELÉTRICA DO BRASIL

Por se tratar de um país com recursos hídricos abundantes, a capacidade instalada brasileira em 2022 era de 206,5 GW, sendo composta por 53,2% de geração hídrica, seguida por 21,4% de geração térmica, 11,8% de geração solar, 11,5% de geração eólica e apenas 1,0% de geração nuclear, tal como apresentado na Figura 1. Desse modo, a matriz elétrica brasileira pode ser considerada uma das mais limpas do mundo, com baixa emissão de CO₂. Comparado a outras nações, em 2022 o Brasil emitiu cerca de 91% menos CO₂ que China, 83% menos que os Estados Unidos e 71% menos que os países europeus da OCDE para gerar cada MWh (EPE, 2023).

COMO ESTÃO ALOCADOS OS 206,5 GW DE CAPACIDADE INSTALADA NO BRASIL?

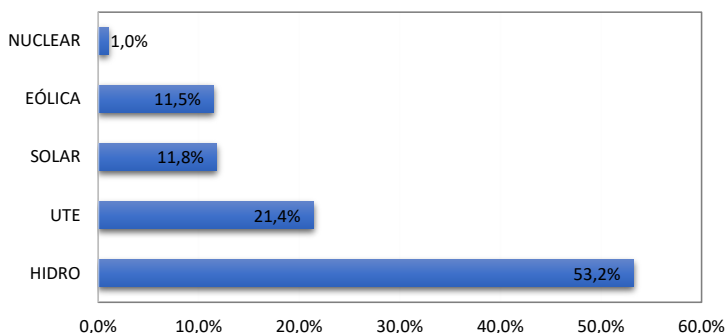


Figura 1 - Perfil de capacidade instalada de geração elétrica, no Brasil

3. A EVOLUÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO NO BRASIL

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) passou por profundas mudanças ao longo do tempo. Inicialmente, o SEB foi estruturado de forma descentralizada e com medidas isoladas de regulamentação, sendo composto por pequenas empresas verticalizadas e de capital privado. A partir de 1930, com o crescimento das cidades e aumento na demanda por energia nas indústrias, o governo brasileiro iniciou um processo de estatização e regulamentação do setor elétrico, passando o Estado a deter todos os meios de geração, transmissão e distribuição de energia (BERTIM, 2020).

A partir da década de 1980 o SEB começou a se deteriorar, em virtude da crise econômica mundial, que diminuiu a capacidade de investimento do Estado. A partir da Constituição de 1988, o Brasil criou

um sistema de concessões para exploração de serviços de energia elétrica (CORREA, 2016).

Em 1993 o setor foi desverticalizado, com a criação do Sistema Nacional de Transmissão de Energia Elétrica (SINTREL), assegurando livre acesso ao sistema de transmissão a todos os agentes do mercado. A partir de 1995, o processo de liberalização no país foi acelerado, com a privatização de várias empresas estatais. A Lei 9.074/95 (BRASIL, 1995) estabelece o regime de concorrência na licitação de concessões para projetos de geração e transmissão de energia elétrica, bem como cria a figura do Produtor Independente de Energia Elétrica e o Consumidor Livre de Energia.

O Produtor Independente de Energia Elétrica é a pessoa jurídica, ou empresas reunidas em consórcio, que recebem concessão ou autorização do poder concedente para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda, ou parte da energia produzida, por sua conta e risco (BRASIL, 1995).

De acordo com a Lei 9.074/95, o Consumidor Livre de Energia é aquele, cuja carga seja igual ou maior que 3.000 kW, que pode escolher o fornecedor com quem contratará sua compra de energia elétrica. Atualmente, a comercialização de energia no Brasil pode ocorrer em dois ambientes, o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), onde estão os consumidores cativos e o Ambiente de Contratação Livre (ACL) formado pelos consumidores livres.

No Ambiente de Contratação Livre os consumidores podem escolher o fornecedor, compram energia diretamente dos geradores ou dos comercializadores, por meio de contratos bilaterais, e podem negociar livremente todas as condições comerciais, como preço, quantidade de energia contratada, período de suprimento, pagamento, entre outras. No Ambiente de Contratação Regulada, os consumidores cativos compram energia das concessionárias de distribuição e pagam apenas uma fatura de energia que contempla os custos de transmissão, distribuição e a geração da energia, além dos encargos, sendo as tarifas reguladas pela agência reguladora (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL).

Ao longo dos últimos anos os requisitos para acesso ao Ambiente de Contratação Livre têm sofrido reduções, de modo que o percentual do consumo cativo de energia foi reduzido de 73%, em 2013, para 60%, em 2022, como pode ser verificado na Figura 2 (EPE, 2023).



O consumo cativo de eletricidade é historicamente superior ao consumo livre. No entanto, esta modalidade de comercialização vem perdendo participação ao longo dos últimos anos.

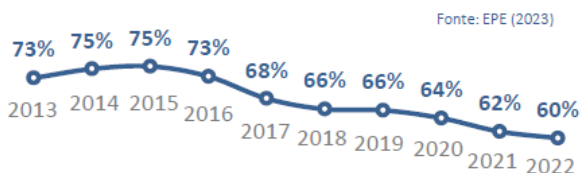


Figura 2 – Evolução da participação do consumo cativo de energia elétrica, no Brasil

Atualmente, todos os consumidores conectados em alta tensão e os demais consumidores com carga acima de 500 kW podem acessar o ACL, mas encontra-se em discussão no âmbito do Poder Legislativo e do Executivo (Ministério de Minas e Energia) a redução dos limites de carga para contratação de energia elétrica por parte dos consumidores ACL. O cronograma em discussão prevê que a partir de 2026 todos os consumidores de baixa tensão, excluídos os residenciais e rurais, poderão acessar o ACL; já em 2028 é prevista a abertura do ACL para todos os consumidores do país. Dada a iminência da abertura do ACL para todos consumidores brasileiros, são grandes os desafios do regulador para que a liberalização do mercado de energia elétrica possa trazer todos os benefícios que se espera de um mercado competitivo.

Na teoria, as agências reguladoras têm a função de maximizar o interesse nacional, ou seja, maximizar os benefícios líquidos que são calculados a partir dos benefícios menos os custos para a sociedade (VISCUSI et al., 2005). No entanto, o mercado é formado por vários agentes, com objetivos distintos: de um lado temos os produtores e do outro lado os consumidores, ambos buscando maximizar seus interesses. Neste contexto, é preciso entender como se comportaram outros mercados que já experimentaram a liberalização e extrair das experiências passadas sugestões para o regulador brasileiro.

4. A EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

A evolução do setor de energia elétrica em grande parte dos países desenvolvidos reconhece que os subsetores de transmissão e distribuição de energia são monopólios naturais, ao mesmo tempo que os subsetores de geração e comercialização de energia são considerados mercados potencialmente competitivos. Desse modo, a garantia de acesso livre às redes de transmissão e distribuição é primordial para o desenvolvimento de um mercado competitivo, com facilidade de entrada e saída de novos competidores.

A liberalização do mercado de energia já é uma realidade em diversos países, tais como: Reino Unido, desde meados da década de 1980, e todos os países da União Europeia desde 2005. Grande parte da literatura constata que a liberalização do mercado varejista de energia elétrica melhora a oferta de serviços complementares, oferece diferentes condições de pagamento e transfere aos consumidores os benefícios da compra de energia no mercado spot.

Para (PALACIOS M. & SAAVEDRA P., 2017), no entanto, os clientes industriais e residenciais de grande porte são os mais engajados no mercado competitivo, enquanto os clientes residenciais de menor porte tendem a permanecer inertes, o que indica que a concorrência no setor está longe de ser perfeita.

Sabe-se que a motivação para a liberalização do setor de energia elétrica varia entre os países (GHAZVINI et al., 2016). Entretanto, é esperado que reformas bem-sucedidas levem a uma maior eficiência, com menores preços ao consumidor e maior qualidade dos serviços prestados.

Para (NICOLLI & VONA, 2019), as políticas de liberalização dos mercados de energia elétrica têm como principal objetivo a redução dos preços. Porém, como externalidade positiva, surge a maior adoção de energias renováveis, uma vez que o acesso às redes por novos e, geralmente, pequenos players no mercado podem fomentar a geração descentralizada de energia, que é altamente compatível com a geração por renováveis.

É interessante observar que a liberalização do mercado de energia é o segundo fator mais importante para a adoção de energias renováveis, sendo menos importante apenas que a renda per capita (NICOLLI & VONA, 2019). Desse modo, a avaliação do impacto da liberalização nos preços da energia pode ser incompleta, ou enganosa, ao desconsiderar os efeitos da liberalização na adoção de energias renováveis, visto que políticas públicas de adoção de energias renováveis tendem a impactar os preços aos consumidores.

A liberalização pode gerar resultados diferentes de acordo com a realidade local em que ocorre. No caso de países como Cingapura, a liberalização do mercado resultou em reduções de preço tanto para os

consumidores industriais quanto para os consumidores residenciais, além de melhora na participação de energias renováveis no mercado. Já no caso das Filipinas, os preços da eletricidade subiram para ambos os consumidores e a participação de energias renováveis no mercado não foi impactada significativamente (ALI et al., 2022).

Para (ALI et al., 2022), a diferença nos resultados alcançados em Cingapura e nas Filipinas pode ser explicada pela abordagem mais cautelosa, ponderada e sistemática de Cingapura, que implementou uma estrutura e regulamentação eficaz para promoção de concorrência e inovação, enquanto nas Filipinas o mercado carece de medidas que o tornem mais competitivo, principalmente para pequenos consumidores.

Em Cingapura, o mercado de eletricidade é totalmente liberalizado, ampliando gradualmente as oportunidades de concorrência no varejo para consumidores de menor porte. Para proteger os clientes de preços elevados, a tarifa regulamentada é combinada com a competição no varejo, permitindo que os consumidores residenciais comprem eletricidade a uma tarifa regulamentada da SP Group, revisada trimestralmente pela EMA para refletir o custo real da eletricidade (ALI et al., 2022). Já nas Filipinas, o mercado de eletricidade ainda não é totalmente liberalizado, com a MERALCO dominando. Apesar de medidas para promover a competição, como a criação de um mercado de varejo, persistem barreiras, desencorajando investidores privados (ALI et al., 2022).

Assim como em alguns países asiáticos, ao contrário do esperado, a liberalização do mercado de energia Esloveno não foi capaz de reduzir os preços de eletricidade, nem para os consumidores residenciais nem para os consumidores industriais (BOJNEC & KRIŽAJ, 2021).

Uma possível explicação para a falta de um ambiente competitivo decorrente da liberalização está associada aos contratos legados com garantia estatal de preços (AMORIM et al., 2013). Um exemplo notável é observado no mercado varejista de Portugal, caracterizado por alta concentração, apesar das significativas mudanças no comportamento dos consumidores, e onde as tarifas do varejo não refletem adequadamente as variações nos preços do mercado atacadista (FOUHI GHAVINI et al., 2019). Apesar do comportamento ativo dos consumidores no mercado varejista português, os benefícios econômicos da liberalização não têm sido efetivamente transferidos para eles, evidenciado pela falta de sincronização entre os preços varejistas e as reduções nos preços atacadistas, atribuída ao crescente déficit tarifário e à concentração do mercado (GHAVINI et al., 2016).

Um indicador importante que mostra o sucesso das políticas de desregulamentação e das práticas de liberalização no mercado varejista de eletricidade é a relação direta entre as variações dos preços

no atacado e as mudanças nas tarifas no varejo. (GHAZVINI et al., 2016). Em um mercado livre e eficiente, espera-se que as tarifas no varejo acompanhem as variações ascendentes e descendentes dos preços no atacado. Entretanto, os comercializadores podem repassar os preços aos clientes de forma assimétrica; existe uma tendência de repasse imediato nos movimentos de subida de preços no atacado e uma rigidez no caso de uma descida dos preços no atacado.

Desta forma, a concorrência no varejo é importante não só porque, tudo mais constante, deveria haver redução nos preços, mas com a concorrência o comportamento dos agentes pode mudar (BENEDETTINI & STAGNARO, 2015). Há a possibilidade de os clientes exercerem a sua liberdade de escolha e de os fornecedores se tornarem ativos em novos segmentos e modelos de negócio, e quanto maior o nível de concorrência maior é a tendência de os preços refletirem os custos. Essa aderência entre preço e custo tende a promover hábitos de consumo sustentáveis, incentivando a demanda a responder à dinâmica dos preços, deslocando o consumo para horas do dia em que os preços são mais baixos, ou seja, para horas fora de ponta, o que torna todo o sistema mais eficiente.

Em 2015 a concorrência no varejo ainda era considerada fraca em vários Estados-Membros da UE, e a explicação estava na existência de diferenças regulatórias entre os países, tornando difícil a total integração de mercados (BENEDETTINI & STAGNARO, 2015). Como resultado, os benefícios potenciais que mercados abertos trariam ainda não eram totalmente capturados pelos Estados-Membros, sendo visto naquele momento como prioridade a criação de um mercado interno competitivo na UE.

A experiência dos países que liberalizaram seus mercados de eletricidade demonstrou que os mercados não produzem naturalmente resultados competitivos, pois aumenta a possibilidade de que algumas empresas possam influenciar os preços exercendo seu poder de mercado (PHAM, 2019). Na teoria, uma liberalização do mercado pode minimizar os custos do bem, promover a inovação e permitir que os usuários finais se beneficiem de preços mais baixos. Porém, o que era simples na teoria se mostrou muito complicado na prática.

O fato é que a liberalização do setor elétrico não necessariamente reduz os preços da eletricidade. A experiência de muitos países revela que a implementação bem-sucedida de uma reforma de liberalização não é fácil e que problemas de desempenho podem surgir caso a liberalização seja implementada de forma incorreta ou incompleta (STAŇKOVÁ et al., 2010) (STREIMIKIENE et al., 2013).

Neste contexto, é importante entender quais as causas que levaram os países com mercados de energia já liberalizados a serem bem-sucedidos ou não em suas liberalizações. Conhecer os casos de sucessos e insucessos pode nos ajudar a entender qual a melhor forma

de tratar o tema em países que estão em processo de liberalização de seus mercados, como é o caso brasileiro.

5. CARACTERÍSTICAS DO MERCADO EUROPEU

A dinâmica de entrada e saída de fornecedores de um bem ou serviço pode indicar o nível de concorrência do mercado, enquanto o número de fornecedores pode indicar a existência de baixas barreiras à entrada ou condições de mercado favoráveis. Porém, é preciso ter em mente que um número baixo de fornecedores pode ser explicado pelo tamanho relativo do mercado (ACER, 2021). Desse modo, para avaliar a competitividade de um mercado, devem ser avaliados outros indicadores em conjunto, tais como: índices de concentração, *mark-ups*, taxas de troca.

A Figura 3 (CEER, 2021) mostra o número de fornecedores nacionais e o número total de consumidores de cada país da UE.

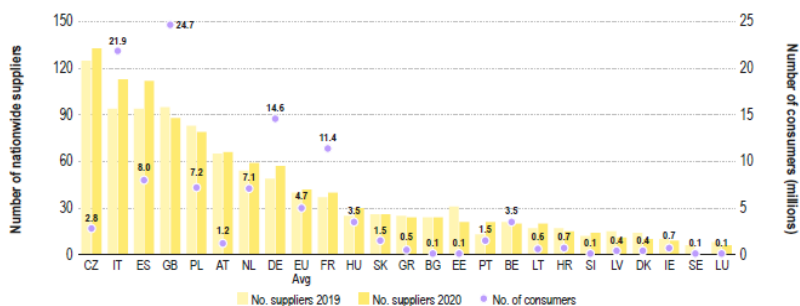


Figura 3 - Número total de fornecedores ativos de eletricidade por país e número total de unidades consumidoras no mercado de varejo, em 2019-2020

Apesar de o número de consumidores poder explicar o número de fornecedores, a Figura 3 nos revela que a relação entre eles é distinta entre os países.

Em geral, um elevado número de fornecedores, aliado a uma baixa concentração de mercado, são indicadores de um mercado competitivo. O poder de mercado dos fornecedores pode ser analisado empiricamente por meio de indicadores, sendo os mais usuais o Índice Herfindahl-Hirschman (HHI) e os rácios de concentração. Um mercado onde o HHI é superior a 2000 pontos, ou onde o CR3 seja superior a 50%, presume-se concentrado (PHAM, 2019).

A Figura 4 (CEER, 2021) apresenta o HHI e o CR3 para o mercado residencial de um conjunto de países europeus para os anos de 2018, 2019 e 2020.

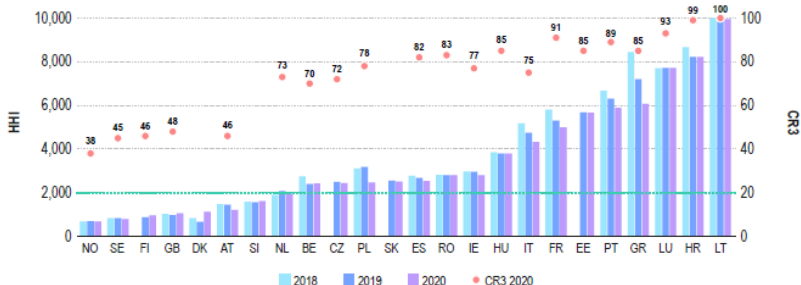


Figura 4 - HHI e CR3 para o mercado residencial de países selecionados - 2018-2020

Importante notar que o HHI dos países não sofreu grande variação entre os anos de 2018 a 2020. Da amostra, verifica-se que oito dos 24 países apresentaram baixos níveis de concentração (HHI < 2000) em 2020, enquanto 16 apresentaram altos níveis de concentração. Nota-se ainda que 17 dos 24 países tiveram redução do HHI em 2020.

A Figura 5 (CEER, 2021) mostra os indicadores de concentração para o mercado não residencial de países selecionados. Nota-se que o mercado não residencial é menos concentrado que o mercado residencial dos respectivos países, o que pode ser explicado pelos consumidores não residenciais serem mais engajados em seu consumo de energia e estarem potencialmente mais abertos à troca de fornecedores. Observa-se que 13 dos 22 países apresentados contavam com um baixo nível de concentração (HHI < 2000) em 2020.

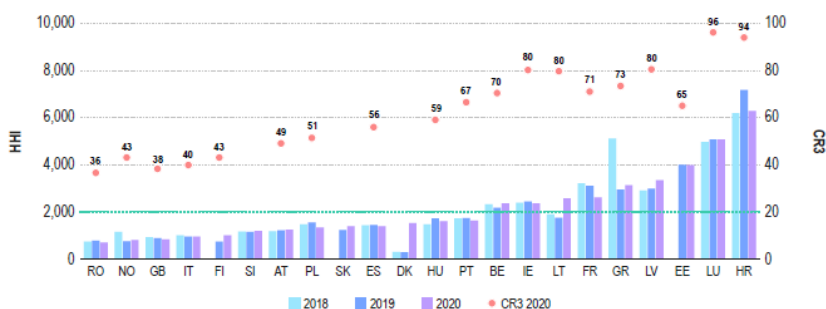


Figura 5 - HHI para o mercado não residencial de eletricidade – 2018-2020

A troca de fornecedor é a forma mais direta de participação dos consumidores de energia elétrica nos mercados já liberalizados. A tro-

ca de fornecedor fortalece a concorrência e exerce uma pressão competitiva sobre os fornecedores para que forneçam melhores preços, produtos e serviços aos consumidores de energia. Atualmente, a diretiva da UE é que em todos os países o tempo máximo de resposta seja de três semanas para realização da troca, quando solicitado pelo consumidor.

O principal indicador para mensurar o bom funcionamento dos mercados varejistas de energia é a taxa de mudança dos consumidores, mas apesar das facilidades para troca de fornecedores ainda há uma alta proporção de consumidores que permanecem com seu fornecedor histórico. Nos mercados em que a taxa de troca é muito baixa deve ser dada especial atenção, mas taxas muito elevadas também podem ser indícios de má qualidade dos serviços prestados e não somente uma disposição por parte dos consumidores de participar ativamente do mercado.

A Figura 6 (CEER, 2021) mostra as taxas de troca de consumidores residenciais para o ano de 2019 e 2020; nota-se que as taxas de troca dos consumidores são muito diferentes entre os diversos países analisados.

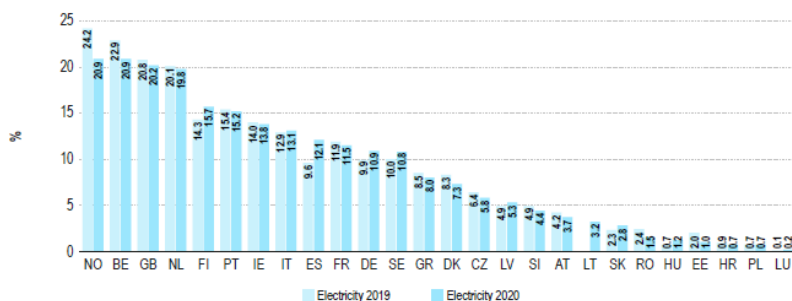


Figura 6 - Percentual de troca externa de consumidores residenciais – 2019-2020

O nível de engajamento dos consumidores é uma das características mais importantes do bom funcionamento do mercado. Uma forma relevante para que os consumidores possam exercer esse engajamento é por meio da comparação de ofertas disponíveis no mercado. Assim, mercados com maior engajamento tendem a apresentar taxas de troca mais altas, assumindo tudo mais constante.

A concorrência entre fornecedores pode levar a ganhos, em termos de preço e qualidade do serviço prestado. Entretanto, o engajamento do consumidor é peça chave para que os mercados funcionem bem, levando a mais pressão sobre os fornecedores,

aumento da concorrência e inovações no mercado. Quando os consumidores não estão envolvidos ativamente, os fornecedores não têm incentivo para oferecer serviços com preços mais baixos e/ou de melhor qualidade.

A adoção de ferramentas de comparação é essencial para que os consumidores assumam uma posição ativa no mercado. As ferramentas de comparação podem capacitar os consumidores, permitindo que comparem facilmente os preços de varejo de eletricidade, facilitando a tomada de decisão e troca de fornecedor. Na União Europeia existem ferramentas de comparação em 25 países, que são operadas pelas próprias agências reguladoras nacionais ou outras entidades públicas.

Um indicador importante que mostra o sucesso das políticas de desregulamentação e das práticas de liberalização no mercado varejista de eletricidade é a relação direta entre as variações dos preços no atacado e as mudanças nas tarifas de varejo (GHAZVINI et al., 2016). Em um mercado livre e eficiente, espera-se que as tarifas do varejo acompanhem as variações ascendentes e descendentes dos preços no atacado. Entretanto, os comercializadores podem repassar os preços aos clientes de forma assimétrica, existe uma tendência de repasse imediato nos movimentos de subida de preços do atacado e uma rigidez no caso de uma descida dos preços.

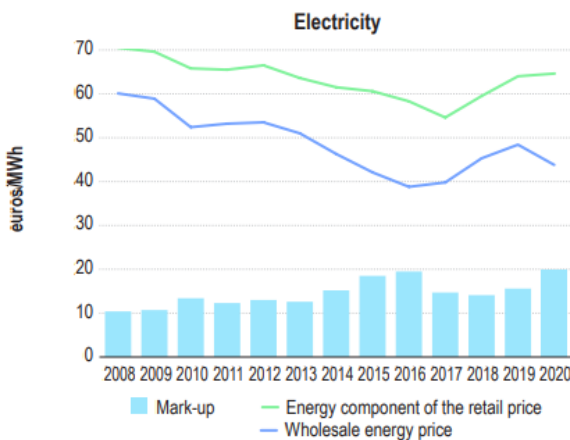


Figura 7 - Diferença entre os preços de atacado e varejo de eletricidade nos países europeus

Na Figura 7 (CEER, 2021) observa-se que uma forte correlação entre os preços de energia no varejo e no atacado é observada

quando os preços de energia no atacado aumentam. No entanto, essa correlação é mais fraca após uma queda nos preços de energia no atacado (um fenômeno conhecido como preços rígidos descendentes). Embora não se espere que os custos de varejo caiam imediatamente em consonância com as reduções de preços no atacado, uma maior participação por parte dos consumidores de energia pode pressionar os fornecedores a diminuir os preços de varejo mais rapidamente. Para conseguir isso, os consumidores de energia precisam ser informados sobre as reduções de preços no atacado, ter acesso a uma variedade de fornecedores e serem capazes de mudar de fornecedor.

A concorrência no varejo é importante não só porque, tudo mais constante, deveria haver redução nos preços, mas o fato de que a existência de concorrência muda o comportamento dos agentes (BENEDETTINI & STAGNARO, 2015). Quanto maior o nível de concorrência, mais os preços tendem a refletir os custos.

Essa aderência entre preço e custo tende a promover hábitos de consumo sustentáveis, incentivando a demanda a responder à dinâmica dos preços, deslocando o consumo para horas do dia em que os preços são mais baixos, ou seja, para horas fora de ponta, o que torna todo o sistema mais eficiente.

Os contratos dinâmicos são a melhor forma de promover a mudança de hábitos dos consumidores, os quais podem contribuir para o ajuste na procura por energia em horários de pico, visto que haverá incentivo monetário para a mudança de hábitos.

Algo que se verificou negativo para a competitividade nos mercados de energia é a intervenção nos preços, o que diminui a competitividade e reduz a atratividade para novos fornecedores. O relatório da ACER 2020 aponta que 15 dos 28 países da UE tinham alguma forma de intervenção nos preços. Os consumidores vulneráveis, ou pobres em energia, devem ser protegidos de alguma forma, mas por meio de políticas sociais que não devem ser confundidas com intervenções públicas no mercado de energia.

6. SUGESTÕES AO REGULADOR BRASILEIRO

É senso comum entre pesquisadores e formuladores de políticas públicas que os subsetores de geração e comercialização de energia são mercados potencialmente competitivos e que deve ser garantido a todos os agentes do mercado o acesso isonômico às redes de transmissão e distribuição de modo que possa ser desenvolvido um mercado competitivo.

A liberalização do mercado de energia já está consolidada em grande parte dos países desenvolvidos, em especial no mercado comum europeu que, desde meados de 2005, foi liberalizado. Espera-se

que um mercado liberalizado opere próximo à concorrência perfeita, mas devido às características e legado histórico do setor de energia elétrica é necessário que o regulador tome medidas para que as ineficiências do mercado sejam sanadas.

A revisão da literatura mostrou que a liberalização pode sim criar mercados competitivos e trazer os benefícios que se espera de um mercado competitivo, tais como: melhora da oferta de serviços complementares, diferentes condições de pagamento, maior eficiência na alocação de recursos, menores preços ao consumidor e maior qualidade dos serviços. Entretanto, a literatura também mostra que a liberalização do mercado pode não refletir automaticamente os benefícios esperados de um mercado competitivo, o que reforça a necessidade de que o regulador esteja atento para intervir nas falhas de mercado que possam surgir, tais como: assimetria de informações, externalidades negativas e excessivo poder de mercado.

O relatório de acompanhamento dos mercados dos Estados-Membros, publicado pela Agência da União Europeia para a Cooperação dos Reguladores de Energia (ACER), revela que mesmo em mercados que estão liberalizados há quase duas décadas, e que seguem as diretivas da União Europeia, há diferenças significativas que expõem o quanto é necessária a atuação das entidades reguladoras nacionais.

Neste contexto, é importante que a entidade reguladora brasileira tenha uma abordagem cautelosa, ponderada e sistemática ao lidar com a liberalização do mercado de energia brasileiro. Com base nos estudos realizados sobre a experiência de outros países, sugerimos ao regulador brasileiro que tenha especial atenção aos seguintes aspectos da estrutura de regulação nacional:

- Facilitar o livre acesso de fornecedores no mercado de comercialização de energia, permitindo, inclusive, a entrada no mercado nacional de players internacionais, de modo que os fornecedores históricos não abusem do seu poder de mercado.
- Incentivar os comercializadores que ofereçam contratos de preços dinâmicos, visto que podem trazer benefícios tanto para os consumidores como para todo o sistema do ponto de vista operacional. Contratos dinâmicos permitem que os consumidores sejam mais ativos no mercado e ofereçam economia àqueles que podem ajustar seu padrão de consumo.
- Investir massivamente em campanhas educacionais sobre o funcionamento e a possibilidade de migração para o mercado livre de energia elétrica. Dessa forma, os consumidores deterão informações suficientes para tomar decisões conscientes.

- Limitar a adoção de tarifas reguladas estritamente por um período de transição, de forma que os consumidores tenham tempo suficiente para comparar os serviços ofertados por todos os fornecedores e se adequem ao novo sistema de contratação.
- Adotar uma fatura de cobrança clara e padronizada, permitindo que o consumidor entenda seu consumo.
- Criar ferramentas de comparação eficientes que permitam a comparação entre os vários fornecedores, deixando que a população tenha um papel mais ativo no mercado.
- Criar facilidades para a troca de fornecedor, tal como a isenção de multas e de outras penalidades que inibam a troca de fornecedor, além de estabelecer um tempo máximo de resposta à solicitação de troca por parte do consumidor. Ao exercer seu direito de escolher um fornecedor, os consumidores podem desbloquear potenciais economias.

7. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a evolução do mercado de eletricidade brasileiro desde o início do século XX até o momento atual, no qual está sendo discutido o cronograma para liberalização do mercado de energia elétrica para todos os consumidores brasileiros.

Foi realizada uma vasta revisão da literatura em busca de casos de liberalização ocorridos nas mais variadas nações, para que o autor pudesse se basear em suas sugestões de atenção ao regulador brasileiro.

Por fim, com base na literatura consultada e, especialmente, baseado no relatório de acompanhamento do mercado europeu, publicado pela Agência Europeia de Cooperação dos Reguladores de Energia, são apresentadas sugestões ao regulador brasileiro de modo que o processo de liberalização no Brasil capte todo os benefícios esperados de um mercado competitivo.

Este trabalho não está isento de limitações, uma vez que os dados demonstrados foram extraídos de relatórios e trabalhos anteriores.

Uma futura linha de pesquisa consiste na realização de trabalho empírico com dados em painel, com o objetivo de demonstrar a relação existente entre a variável dependente *mark-up* e as variáveis independentes (CR3, HHI, razão entre número de fornecedores e o número de unidades atendidas, percentual de taxa de troca externa dos consumidores), como foi feito no estudo da estrutura de mercado das várias nações europeias ao longo dos últimos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, H.; PHOUMIN, H.; SURYADI, B.; FAROOQUE, A. A.; YAQUB, R. (2022). Assessing ASEAN's Liberalized Electricity Markets: The Case of Singapore and the Philippines. *Sustainability*, 14(18), 11307. <https://doi.org/10.3390/su141811307>

AMORIM, F.; VASCONCELOS, J.; ABREU, I. C.; SILVA, P. P.; MARTINS, V. (2013). How much room for a competitive electricity generation market in Portugal? In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 18, pp. 103–118). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.010>

BENEDETTINI S.; STAGNARO C. (2015). Failure to liberalise energy retail markets jeopardizes Energy Union energy.post.eu/failure-liberalise-energy-retail-markets-jeopardizes-energy-union. <https://energy.post.eu/failure-liberalise-energy-retail-markets-jeopardizes-energy-union/>

BERTIM, A. C. (2020). Assimetria no preço da energia elétrica nos ambientes de contratação livre e regulado: O caso da Cidade Universitária da USP na capital.

BOJNEC, Š.; KRIŽAJ, A. (2021). Electricity markets during the liberalization: The case of a European Union country. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14144317>

BRASIL. (n.d.). LEI Nº 9.074, DE 7 DE JULHO DE 1995. In 1995. Retrieved 25 November 1988, from http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9074cons.htm

CORREA, R. dos S. (2016). REGULAÇÃO ECONÔMICA NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL: Emprego das Fórmulas COGE no cálculo do Valor Novo de Reposição do Banco de Preços das Distribuidoras.

EPE. (2023). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023.

EUROPEAN UNION AGENCY FOR THE COOPERATION OF ENERGY REGULATORS AND THE COUNCIL OF EUROPEAN ENERGY REGULATORS. (2021). ACER Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2020-Energy Retail Markets and Consumer Protection Volume.

FOTOUHI GHAZVINI, M. A.; RAMOS, S.; SOARES, J.; CASTRO, R.; VALE, Z. (2019). Liberalization and customer behavior in the Portuguese residential retail electricity market. *Utilities Policy*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.05.005>

GHAZVINI, M. A. F.; RAMOS, S., SOARES, J.; VALE, Z.; CASTRO, R. (2016). Toward retail competition in the Portuguese electricity market. International Conference on the European Energy Market, EEM, 2016-July. <https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521209>

NICOLLI, F.; VONA, F. (2019). Energy market liberalization and renewable energy policies in OECD countries. *Energy Policy*, 128, 853–867. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.018>

PALACIOS M. S.; SAAVEDRA P. E. (2017). Alternative policies for the liberalization of retail electricity markets in Chile. *Utilities Policy*, 49, 72–92. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2017.06.009>

PHAM, T. (2019). Market power issues in liberalized wholesale electricity markets: A review of the literature with a look into the future. In *Revue d'Economie Politique* (Vol. 129, Issue 3, pp. 325–354). Editions Dalloz Sirey. <https://doi.org/10.3917/redp.293.0325>

STANKOVA, K.; OLSDER, G. J.; DE SCHUTTER, B. (2010). On European electricity market liberalization: A game-theoretic approach. *INFOR*, 48(4), 267–280. <https://doi.org/10.3138/infor.48.4.267>

STREIMIKIENE, D.; BRUNECKIENE, J.; CIBINSKIENE, A. (2013). The review of electricity market liberalization impacts on electricity prices. In *Transformations in business & economics* (Vol. 12, Issue 3).

VISCUSI, W. K.; HARRINGTON JR, J. E.; VERMON, J. M. (2005). *Economics of regulation and antitrust* (4th ed).

METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS FLUTUANTES EM LAGOS URBANOS E RESERVATÓRIOS

Breno Bezerra Freitas¹
Caio Ramos de Menezes¹
Cinthya Martins Felix¹
Daniel Rebouças Jaguaribe¹
Dionízio Porfírio de Assis¹
Francisco Elmo Lima Uchoa Filho¹
Gabriel Henrique Mesquita Pinheiro¹
João Paulo Dias Liberato¹
Karol Damasceno Cysne¹
Kennedy Romualdo Guedes Coimbra¹
Marcelo Rocha Braga¹
Otacilio José de Macedo Nunes¹
Paulo Cesar Marques de Carvalho¹

¹Universidade Federal do Ceará

DOI: 10.47168/rbe.v30i1.840

RESUMO

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes (FVF) em espelhos d'água tem sido cada vez mais utilizadas nos últimos anos. O uso de plantas FVF oferece vantagens, como a instalação em superfícies que normalmente não seriam utilizadas para a produção de eletricidade de forma convencional. Além disso, a evaporação da água pode ser reduzida e a eficiência da conversão FV aumenta devido ao arrefecimento dos módulos. Assim, no presente artigo é analisada a utilização de plantas FVF a nível global e proposta uma metodologia de dimensionamento de centrais FVF em lagos e reservatórios urbanos. Como aplicação da metodologia proposta são selecionados corpos d'água adequados na cidade de Fortaleza, considerando as restrições ambientais e regulatórias associadas; sequencialmente, é avaliada a geração esperada com o uso de módulos de 330 Wp, gerando anualmente 65,4 GWh; esta produção significa 1,4% do consumo anual de eletricidade da cidade em 2021 e 496,7% do consumo das escolas do município em 2023.

Palavras-chave: Fotovoltaica flutuante; Lagos urbanos; Reservatórios urbanos.

ABSTRACT

Floating Photovoltaic (FPV) plants on water bodies surfaces have increasingly been used in recent years. The adoption of FPV plants offers advantages, such as the installation on surfaces that wouldn't normally be used for conventional power generation. Additionally, water evaporation can be reduced, and PV efficiency increases due to the modules cooling. Hence, in the present paper we analyze the use of FPV technology, globally, and propose a sizing methodology of FPV plants in urban lakes and reservoirs. As an application of the proposed methodology, suitable water bodies are elected in the city of Fortaleza, considering the associated environmental and regulatory restrictions; sequentially, the expected generation is evaluated with the use of 330 Wp modules, generating 65.4 GWh per year; this production corresponds to 1.4% of the city total demand in 2021 and 496.7% of the demand of the municipality schools in 2023.

Keywords: Floating photovoltaics; Urban lakes; Urban reservoir.

1. INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura, há necessidade de redução das emissões associadas ao uso de combustíveis fósseis, sendo o setor elétrico um dos principais agentes para essa mudança, principalmente com o uso de fontes renováveis (ARAUJO et al., 2020). Nos últimos anos tem crescido o uso de plantas Fotovoltaicas Flutuantes (FVF), que oferecem vantagens em comparação às plantas Fotovoltaicas (FV) em solo (BUSSON et al., 2021). Além de evitar a competição com o uso de terra para fins agrícolas, a utilização de plantas FVF pode aumentar a eficiência de conversão de energia, em função da redução da temperatura dos módulos, e reduzir as perdas do reservatório por evaporação, aspecto que pode ser benéfico para usinas hidrelétricas em uma utilização conjunta (TEMIZ e JAVANI, 2020), (CRUZ et al., 2022).

Por outro lado, devido à característica flutuante dos projetos, há uma grande dependência das plantas FVF em relação à perenidade do espelho d'água em uso. Importante lembrar que uma significativa cobertura da superfície d'água disponível pode incorrer em graves impactos ao bioma local, o que limita a área útil a uma pequena fração (SILVA e BRANCO, 2018). Desta forma, é comum que projetos FVF ocupem pequenas áreas, afastadas das margens, para que se garanta a superfície de flutuação estável mesmo em períodos de redução do volume d'água.

A região litorânea do Ceará, na qual se situa a cidade de Fortaleza, é classificada pela Fundação Cearense de Meteorologia e

Recursos Hídricos (FUNCEME) como de clima “Subúmido/Úmido” (FUNCEME, 2023). Além disso, a região está entre as de maior precipitação média anual do estado (DRUZ et al, 2019). Atualmente a prefeitura de Fortaleza busca investir na tecnologia FV (PMF, 2022) e, diante da grande densidade populacional da cidade, a estratégia de geração FVF, que faz uso de áreas urbanas alheias à disputa territorial demográfica, ganha destaque. Fortaleza, capital do Ceará, possui cerca de 2,4 milhões de habitantes e uma área territorial de 312 km², com uma densidade demográfica de 7.775 habitantes/km², tornando-a a oitava cidade com maior densidade demográfica do Brasil (IBGE, 2022). Conforme dados fornecidos pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE), o consumo de energia elétrica da cidade no ano de 2021 foi de aproximadamente 4,74 TWh (IPECE, 2021), apontando para um consumo per capita anual de cerca de 2,0 MWh/habitante.

Diversos estudos geológicos sobre Fortaleza ressaltam a porosidade do solo, seguido de um subsolo cristalino de baixa permeabilidade, o que caracteriza uma grande capacidade de retenção da água proveniente da estação chuvosa (GOMES, 2008). A água nas regiões mais baixas emerge em lagoas que são mantidas por longos períodos pela água armazenada no solo. Não existem estudos sobre cada espelho d’água da cidade para definição dos mais propícios à instalação de plantas FVF; porém, os dados existentes são considerados suficientes para que se avalie como satisfatória a perenidade de todos os grandes espelhos d’água da capital (GOMES, 2008).

Para além disso, devido aos sistemas FVF serem muito recentes no contexto do Brasil, como um todo, fatores como ancoragem, flutuadores e conexões à rede elétrica ainda são escassos, fato que dificulta a análise dos impactos das diferentes tecnologias até mesmo em sistemas FVF já instalados. Outro fator incluso é que a manufatura dos módulos FVF não é feita no Brasil, e isto inclui os ajustes para o melhor desempenho dos módulos sob as condições nacionais de um país com território de dimensões continentais.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo propor uma metodologia de dimensionamento de plantas FVF urbanas, utilizando-se a cidade de Fortaleza como estudo de caso. Após a introdução, o estado da arte das aplicações de FVF, sob a ótica brasileira e mundial, é apresentado no tópico dois. No terceiro tópico, as etapas metodológicas propostas para a seleção e caracterização de espelhos d’água urbanos são relacionadas; no quarto tópico, o potencial de geração FVF para Fortaleza é estimado, seguido das conclusões no quinto tópico.

2. ESTADO DA ARTE

A presente seção tem como objetivo mostrar um panorama atual dos estudos sobre geração FVF no Brasil e no mundo, procurando evidenciar o que já foi realizado e o que pode ser feito para o desenvolvimento desta tecnologia de geração.

2.1 Análise Bibliométrica da FVF

A produção científica sobre FVF é analisada visando contextualizar o atual cenário da tecnologia. Por meio da utilização da Application Programming Interface (API) de pesquisa da base de dados SCOPUS, é possível a realização de uma análise bibliométrica dos artigos produzidos mundialmente sobre FVF, entre os anos de 2010 e 2022, mostrada na Figura 1.

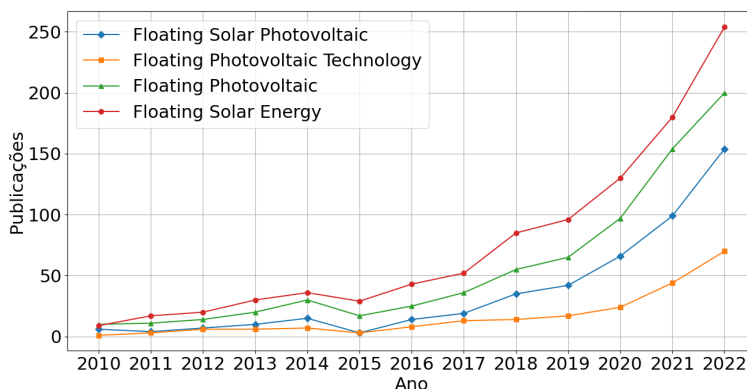


Figura 1 – Evolução da publicação de documentos na base SCOPUS

Diferentes combinações de palavras-chave dos artigos e resumos são utilizadas para pesquisa por título, de modo a permitir uma análise mais específica do âmbito científico acerca do tema, com os termos pesquisados em inglês. O tema está em crescente investigação em qualquer das quatro configurações apresentadas na Figura 1, algumas partindo de um pouco menos de 10 publicações no ano 2010 para centenas de resultados em 2022. Para o termo *floating photovoltaics*, por exemplo, há um crescimento total de 1900% na publicação de artigos, começando com apenas 10 publicações no ano de 2010 para 200 em 2022. Esse crescimento aparenta ser mais notável a partir do ano de 2015, evidenciando um interesse no tópico.

2.2 FVF no Mundo

Segundo dados de 2022, o mercado FVF é de 1,6 GW globalmente, com previsão que crescerá a uma taxa anual de 33,7% até 2026, atingindo 4,8 GW (PV MAGAZINE, 2022). Inúmeros artigos têm focado em plantas FVF nos últimos anos; na presente seção são apresentados artigos representativos nos temas de resfriamento dos módulos, uso em lagos urbanos e redução de evaporação em reservatórios. Apesar do investimento inicial de uma usina FVF ser mais elevado em comparação a uma planta FV sobre o solo, estudos vêm sendo realizados para evidenciar as vantagens da FVF. Com a finalidade de ilustrar os benefícios da utilização de FVF na Índia, um estudo cita um aumento de 2,5% a 3% de eficiência dos módulos em comparação com a planta FV sobre o solo (SIECKER et al, 2017). Por consequência do contato contínuo com a água, é possível manter os módulos em baixa temperatura e, assim, mitigar as perdas térmicas. Adicionalmente, há uma economia anual de água por evaporação de 191 milhões de litros; como conclusão, para uma potência de 1 MWp, a tecnologia FVF é superior à FV sobre o solo.

No Paquistão estão sendo realizados estudos referentes à implantação de FVF em pequenos lagos (HAFEEZ et al., 2022). Uma estimativa do potencial de implantação de um sistema FVF em um lago urbano é proposto e comparado seu desempenho, custo e retorno financeiro com o de uma planta FV sobre o solo, por meio do simulador *System Advisor Model* (SAM). Como conclusão, o Valor Presente Líquido (VPL) é positivo para FVF, o que não ocorre para a planta FV sobre o solo.

Segundo um estudo de caso no Egito, é possível aumentar a potência de duas hidrelétricas localizadas nas barragens de High Adam e Aswan Reservoir, com potência total de 2,5 GW (RAVICHANDRAN et al., 2021). A simulação realizada com o programa Helioscape propõe adição de 5 MW de FVF em cada uma das barragens. Os resultados demonstram que as instalações FVF nas barragens devem melhorar o desempenho no que se refere à redução de emissões de dióxido de carbono com o uso combinado de hidroelétricas e plantas FVF, aumento de eficiência de conversão de energia e economia de água pela redução de evaporação.

2.3 FVF no Brasil

No Brasil, os estudos têm se concentrado em análises de viabilidade e construção de cenários. Um exemplo é um estudo da possibilidade de uma usina FVF no lago Bolonha, em Belém-PA (SILVA e SOUZA, 2018), incluindo uma revisão bibliográfica e aplicação do

programa SAM. O desempenho estimado de uma planta FVF é apresentado, chegando a 112 módulos e uma produção anual de 38 MWh, aproximadamente.

A viabilidade da instalação de uma usina FVF no Rio Mossoró, em Mossoró, RN, é avaliada em (CARVALHO, 2020). Inicialmente, a irradiância solar anual no local é estimada. Em seguida, é determinada a área necessária para a instalação da usina FVF, totalizando 4.767,42 m²; dessa área, 4.122,75 m² são cobertos pelos módulos. O estudo considera a utilização de 2.000 módulos de 405 Wp, com uma eficiência de 19,65%, prevendo uma geração aproximada de 10.800 kWh/mês. Caso o sistema fosse realmente instalado, seria capaz de fornecer energia suficiente para atender às necessidades de mais de 700 residências.

Um estudo avalia a viabilidade da instalação de um sistema FVF no lago do campus da Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais (LOPES E SOUZA JÚNIOR, 2016). A partir da área total do lago de 9.119 m², são utilizadas apenas as áreas planas e sem curvas nas margens, resultando em uma área de 3.030 m², considerando uma distância de um metro em relação às margens. Os pesquisadores concluem que é possível instalar uma capacidade de 206 kW, utilizando 792 módulos de 260 Wp, com eficiência de 16,5%.

A primeira etapa da usina FVF na barragem de Sobradinho (BA) é analisada em (RODRIGUES et al, 2020), comentando sua viabilidade, impactos ambientais e energéticos, e complementaridade entre a geração FVF e hidrelétrica. A produção anual média simulada pelo programa PVSyst é de 1.654 MWh, o que indica uma grande vantagem na implementação da tecnologia FVF em conjunto com hidrelétricas, de modo a otimizar a utilização da área do lago para geração elétrica e da infraestrutura da subestação.

Uma metodologia de dimensionamento de FVF para barragens de regiões semiáridas é proposta em (REGES et al., 2020). Propõe-se a utilização da curva de duração da inundação dos reservatórios e a escolha dos níveis de confiabilidade baixa e alta de 70% e 90%, respectivamente. Considerando os dois cenários, mensura-se que as barragens avaliadas para o estado do Ceará podem gerar anualmente, no total, entre 5.579 e 14.005 GWh de eletricidade, além de reduzirem de 7,42% a 19,08% as perdas por evaporação.

É analisado em (SACRAMENTO et al., 2015) a possibilidade de instalação de uma planta FVF em três reservatórios na região do semiárido brasileiro – Castanhão, Orós e Banabuiú. No estudo, em comparação com as instalações em solo, foi medido um aumento médio de 12,5% na eficiência da conversão para módulos flutuantes nas condições climáticas locais. Quanto à eficiência, um estudo avalia a redução de temperatura nos módulos FVF a partir da proposição de

arrefecimento passivo com o uso de pontes de calor em contato com água (BUSSON et al, 2021). Os testes realizados em Fortaleza, Ceará, evidenciam ganhos de 26,1% em eficiência e redução de 3,2°C na temperatura dos módulos ao comparar um módulo FVF com um módulo convencional sobre o solo.

3. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS FVF EM ÁREAS URBANAS

A definição do potencial de geração FVF em áreas urbanas requer, inicialmente, a seleção dos espelhos d'água aptos a hospedar os módulos FV a serem instalados. Para tanto, são estudados os dados hídricos provenientes de diferentes referências e estabelecidos critérios de seleção. Os fatores que podem influenciar na disponibilidade dos espelhos também devem ser considerados. Posteriormente, são estabelecidos os critérios de seleção de módulos FV e definidos os modelos de referência para as estimativas.

Os dados hidrográficos são, usualmente, disponibilizados abertamente por órgãos governamentais das esferas municipal, estadual e federal. Conforme a metodologia proposta, fazem-se necessárias tanto avaliações geométricas dos espelhos d'água, em especial suas áreas, como aspectos qualitativos, como tipo de espelho (rio, alagado, lagoa, açude) e seus respectivos nomes. Desta forma, são considerados os dados fornecidos em formato *shape file*, comumente utilizados em programas de georreferenciamento, que contêm projeções poligonais dos espelhos, posicionadas em suas correspondentes coordenadas geográficas e associadas individualmente a diversas informações pertinentes, como apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Exemplo de poligonal selecionada do espelho d'água

Inicialmente, devem ser buscados e analisados dados municipais e estaduais; em seguida os dados nacionais disponibilizados pela

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), mediante acesso à sua plataforma digital de dados abertos (ANA, 2020). O estudo requer que, para além do formato de arquivo, os dados utilizados apresentem polígonos independentes para cada espelho d'água associado a metadados relevantes, de modo a viabilizar tanto a filtragem dos dados como a sua identificação individual. Para acessar os dados dos arquivos em *shape file*, filtrá-los e traduzir os resultados em imagens é utilizado o programa de código aberto QGIS (QGIS, 2023). QGIS permite sobrepor polígonos geolocalizados de diversas fontes de dados, possibilitando uma visualização comparada de todos os dados obtidos.

A escolha dos módulos para a planta FVF deve ser baseada em critérios técnicos, econômicos e financeiros; se possível, deve ser observada a experiência do fabricante com plantas flutuantes. Além disso, em qualquer projeto FV os módulos devem seguir algumas diretrizes, como a disponibilidade no mercado nacional e a autenticação dos parâmetros técnicos pelo órgão responsável (CARVALHO, 2020). Atualmente, há diversos fabricantes e modelos de módulos FV disponíveis no mercado, sendo que a maioria deles obedece às orientações referidas. Em 2022 foram identificados 51 fornecedores de módulos FV no mercado nacional.

O passo seguinte é o dimensionamento da planta FVF com ocupação de um percentual escolhido da área do espelho d'água; o número de módulos, e conseqüentemente a potência nominal da planta, é calculado a partir da divisão da área prevista para a planta FVF pela área individual do módulo. Neste cálculo deve ser acrescentado um percentual de 34% da área para fluxo de técnicos e eventuais manutenções (STRANGUETO, 2016). Como etapa final, é estimada a geração da planta FVF com uso do fator de capacidade de plantas FV já em operação na cidade. Apesar de eventuais diferenças de rendimento entre as duas modalidades (plantas flutuantes e convencionais), o fator de capacidade (FC) das plantas em operação fornece uma boa base para uma primeira estimativa de geração, pois considera as condições meteorológicas da cidade estudada.

Na Figura 3 é apresentado fluxograma com as principais etapas da metodologia proposta.

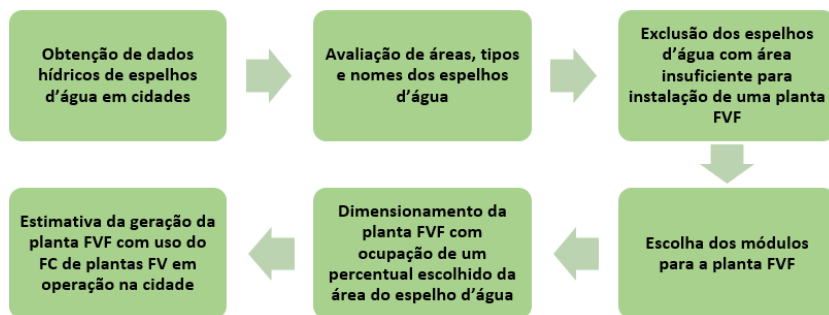


Figura 3 – Fluxograma das etapas da metodologia

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA: ESTUDO DE CASO PARA FORTALEZA-CE

Os primeiros dados avaliados para o presente estudo de caso são os disponibilizados pelo Instituto de Planejamento de Fortaleza (IPLANFOR), mediante plataforma digital “Fortaleza em Mapas” (IPLANFOR, 2018). O arquivo identificado por “lagoas” é utilizado, que inclui também alguns espelhos artificiais. O arquivo contém 284 polígonos, com metadados associados ao nome de cada espelho, todos coletados e gerados pelo próprio IPLANFOR, no ano de 2018. Diante de muitos espelhos com área desprezível ou nomes idênticos — o que indica uma fragmentação de um espelho maior em períodos de pouca chuva — faz-se necessária uma limpeza e filtragem destes dados. Em seguida, são avaliados os dados disponibilizados em 2020 pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) mediante acesso a sua plataforma digital de dados abertos (ANA, 2020). Os arquivos apresentam massas d'água de todo o território nacional, cada um correspondente a um polígono associado a diversos metadados relevantes, facilitando a filtragem dos dados e identificação individual.

Outros arquivos em formato *shape* de Fortaleza também são fornecidos pelo Laboratório de Estudos da Habitação (LEHAB) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Estes são originários do processamento de desenhos da hidrografia de 2006, disponíveis no acervo digital da Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF, 2006). Embora sejam antigos e não possuam os metadados necessários, estes dados apresentam de forma detalhada a hidrografia da cidade, auxiliando nas avaliações e no estabelecimento de critérios para o presente estudo. As demais fontes de dados consultadas não disponibilizam dados em formato *shape* ou, se o fazem, não individualizam os corpos d'água, tornando-as incompatíveis com o estudo.

A partir de uma análise inicial, comparando os dados do

IPLANFOR, da ANA e do LEHAB, sobrepostos a uma fotografia de satélite fornecida pelo Google Earth, é possível observar que, mesmo diante da grande diferença de tempo entre as fontes, existe pouca variação na maioria dos espelhos da cidade. A exceção é a lagoa da Precabura, que apresenta uma variação considerável na sua área de polígono de 2006, explicável, provavelmente, pela baixa qualidade dos dados de satélite da época, visto que as fotografias de satélite do Google Earth daquele ano são compostas por imagens de qualidades e precisões distintas na fronteira entre Fortaleza e o município vizinho, onde se situa a lagoa mencionada. Esta análise dos dados corrobora, portanto, a hipótese de perenidade dos espelhos d'água da capital, conforme estabelecido inicialmente.

Visando filtrar os dados das diferentes fontes, o primeiro critério de seleção é a presença de metadados identificando o nome do espelho d'água e sua área. Dessa forma, enquadram-se as bases IPLANFOR e ANA. Após exclusão de espelhos sem nome e dados repetidos da base do IPLANFOR, verifica-se que, a partir dela, Fortaleza possui 38 espelhos d'água em sua extensão territorial, totalizando uma área de 6,4 km². Na Figura 4 é apresentada a classificação das superfícies de acordo com a área.

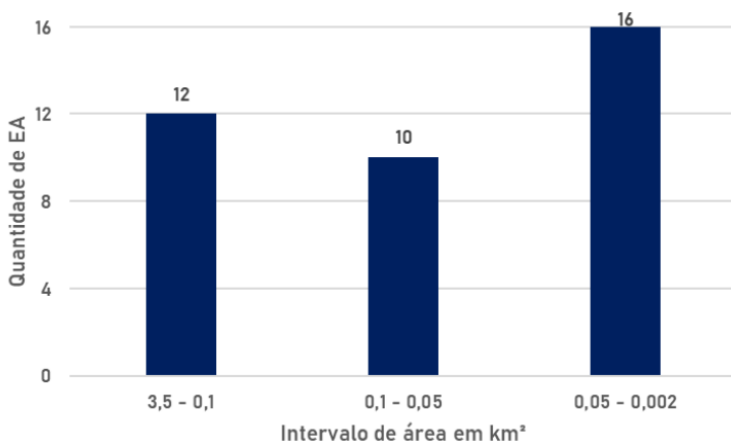


Figura 4 – Quantidade de espelhos d'água em função das áreas, adaptado de (IPLANFOR, 2018)

Considerando o volume de dados, torna-se necessário filtrá-los pela área, uma vez que significativa parcela não possui dimensões suficientes para instalação de uma usina FVF, como é o caso de 26 dos espelhos citados. Dessa forma, o critério de seleção utilizado consiste na escolha de áreas superiores a 0,1 km², resultando em 12 espelhos

d'água.

Através de uma comparação entre as poligonais das superfícies filtradas do IPLANFOR e imagens de satélite do Google Earth, verifica-se que o açude do Cocó e a lagoa do Cocó não estão presentes no referido banco de dados. Constatada a presença destes espelhos no banco de dados da ANA, é realizada a integração das poligonais no grupo filtrado do IPLANFOR; na Figura 5 é representado um mapa contendo a localização dos espelhos d'água selecionados. Na Tabela 1, esses dados são organizados em ordem decrescente de área, adicionando-se informações complementares a respeito de Zonas de Proteção Ambiental (ZPA) (IPLANFOR, 2018) e qualidade da água (SEUMA, 2022).

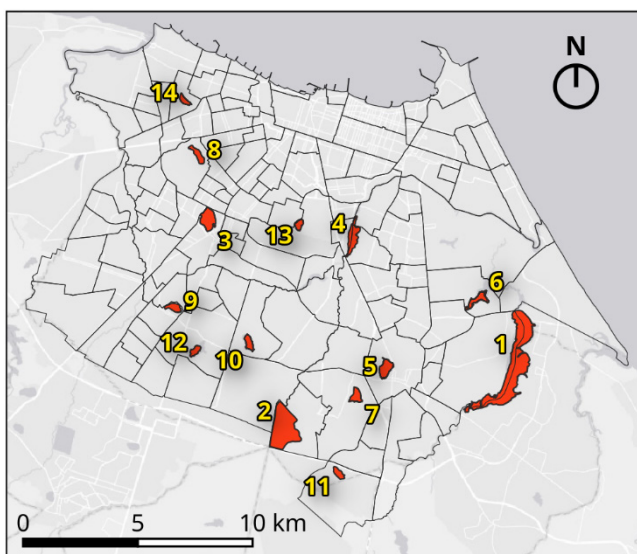


Figura 5 – Localização dos espelhos d'água selecionados a partir de dados fornecidos por (ANA, 2020), (IPLANFOR, 2018)

Tabela 1 – Caracterização dos espelhos d'água selecionados, adaptado de (ANA, 2020), (IPLANFOR, 2018), (SEUMA, 2022)

Classificação	Espelho d'água	Área (km ²)	Uso para banho/consumo
1	Lagoa da Precabura	3,044	Imprópria
2	Açude Cocó	1,698	-
3	Lagoa da Parangaba	0,475	Imprópria
4	Lagoa do Cocó	0,452	-
5	Lagoa da Messejana	0,326	Imprópria

Tabela 1 – Caracterização dos espelhos d'água selecionados, adaptado de (ANA, 2020), (IPLANFOR, 2018), (SEUMA, 2022) (cont.)

Classificação	Espelho d'água	Área (km ²)	Uso para banho/consumo
6	Lagoa Sapiranga	0,252	Imprópria
7	Lagoa do Jangurussu	0,217	Imprópria
8	Açude Santo Anastácio	0,202	Imprópria
9	Lagoa do Mondubim	0,179	Imprópria
10	Açude São Jorge	0,172	-
11	Lagoa do Ancuri	0,144	-
12	Açude Osmani Machado	0,134	-
13	Lagoa do Opaia	0,120	Imprópria
14	Lagoa do Urubu	0,113	-

Todos os 14 espelhos d'água estão em ZPA (IPLANFOR, 2018), o que inviabiliza a exploração dos mesmos e do seu entorno em atividades não sustentáveis. Desta forma, embora estudos de impacto ambiental mais aprofundados se façam necessários, uma vez inviabilizados para banho, consumo e uso não sustentáveis do ponto de vista ambiental, a utilização destes espelhos d'água para a geração FVF se mostra uma alternativa de grande valor. Vale salientar ainda que, além dos 14 espelhos d'água serem classificados como ZPA (IPLANFOR, 2018), em (COSTA, 2017) e (SILVA e BRANCO, 2018) são realizados estudos de impacto ambiental referente à utilização de FVF, nos quais são explicitados o baixo grau de impacto e as diversas vantagens do uso da tecnologia flutuante em relação à convencional sobre o solo.

Quanto à escolha dos módulos, em qualquer projeto FV os mesmos devem seguir algumas diretrizes, como a disponibilidade no mercado nacional e a autenticação dos parâmetros técnicos pelo órgão responsável (CARVALHO, 2020). Dessa forma, escolheu-se o módulo Eagle 72p, com potência de 330 Wp, eficiência de 17% e dimensões de 1956 × 992 × 40 mm. O motivo da escolha se deve ao fato deste modelo ser usado no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da UFC, em Fortaleza.

5. RESULTADOS

Para a determinação da estimativa de geração FVF em cada espelho d'água descrito na Tabela 1, simula-se a instalação física dos módulos FV em 5% da área da superfície alagada e, dentro dessa porcentagem, leva-se em consideração uma área de 34% definida para fluxo dos técnicos e eventuais manutenções (STRANGUETO, 2016). Na Tabela 2 são apresentadas a quantidade de módulos FV e a Potência Instalada (Pinst) em cada espelho d'água.

A estimativa de geração mensal em MWh pode ser descrita pela Equação 1.

$$\text{Energia} = 720 \times \text{FC} \times \text{Pinst} \tag{1}$$

Os valores mensais médios de FC para os anos de 2019 e 2022 são obtidos de plantas FV instaladas no LEA - UFC, em Fortaleza (SILVA et al., 2020). As curvas mostradas na Figura 6 representam os valores mensais do FC para estes anos e a média desses dados.

Tabela 2 – Potência instalada em cada espelho d’água selecionado

Espelho d’água	Quantidade de Módulos	Pinst (MWp)
Lagoa da Precabura	51.777	17,09
Açude Cocó	28.883	9,53
Lagoa da Parangaba	8.085	2,67
Lagoa do Cocó	7.688	2,54
Lagoa da Messejana	5.542	1,83
Lagoa Sapiranga	4.289	1,42
Lagoa do Jangurussu	3.691	1,22
Açude Santo Anastácio	3.437	1,13
Lagoa do Mondubim	3.043	1,00
Açude São Jorge	2.917	0,96
Lagoa do Ancuri	2.456	0,81
Açude Osmani Machado	2.284	0,75
Lagoa do Opaia	2.045	0,67
Lagoa do Urubu	1.924	0,63

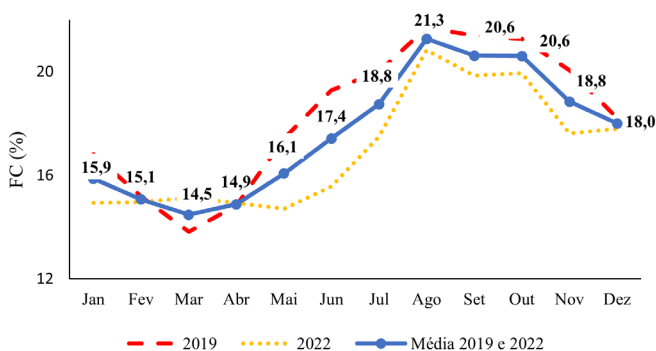


Figura 6 – Fator de capacidade em 2019, 2022 e a média, adaptado de (Silva et al, 2020).

Com base nos dados do FC, é estimada a geração de eletricidade, representada na Figura 7, considerando a instalação física em todos os espelhos d'água descritos na Tabela 1. Como esperado, os valores de geração FV no primeiro semestre são menores do que os do segundo semestre, refletindo a sazonalidade do regime de chuvas de Fortaleza. Uma geração total anual de 65,4 GWh é estimada, representando 1,4% do consumo de eletricidade anual do município em 2021.

Como exemplo de uso para atender demandas específicas, a geração FVF pode abastecer o consumo de eletricidade das escolas municipais de Fortaleza. Segundo (PMF, 2023), era necessária uma geração mínima de 13,2 GWh anuais para este fim, em 2023. Assim, a estimativa encontrada corresponde a 496,7% dessa demanda, justificando a instalação de plantas FVF no município.

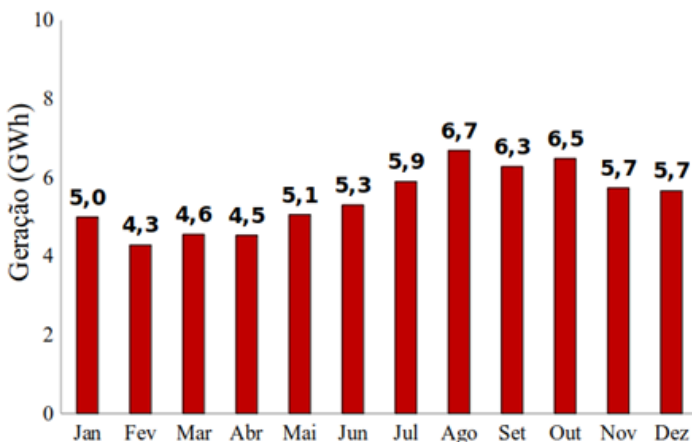


Figura 7 – Total da estimativa de geração FVF

6. CONCLUSÕES

No presente artigo é proposta uma metodologia de dimensionamento de plantas FVF urbanas, utilizando-se da cidade de Fortaleza como estudo de caso; a geração FVF anual estimada é comparada com o consumo da cidade e com a demanda de escolas municipais. Para tal, são listadas as superfícies alagadas, naturais e artificiais, sendo imprescindível a identificação do nome do espelho e sua área; metadados do IPLANFOR e da ANA são utilizados, que asseguram tais informações. Em seguida, são selecionadas apenas áreas superiores a 0,1 km², uma vez que superfícies menores dificultam a instalação de

uma planta FVF; ao final da seleção, são analisados 14 espelhos d'água.

Para a estimativa de geração é definida uma área de cobertura de 5% do espelho, sendo uma fração de 34% desta destinada ao espaçamento entre módulos; são considerados no estudo módulos de 330 Wp. Como resultado, é calculada uma geração de 65,4 GWh anuais, correspondendo a 1,4% do consumo de Fortaleza e 496,7% da demanda de escolas municipais. Tais valores podem ser otimizados com estudos aprofundados específicos sobre a área de cobertura dos módulos, para cada espelho.

Além disso, por ser uma aplicação recente, falta uma consolidação de tecnologia para sistemas de flutuação, ancoragem e conexões elétricas, etapa em que são definidos fatores como o material dos flutuadores, as conexões dos mesmos ao sistema de ancoragem, o tipo de ancoragem a ser feita e os cabos mais resistentes à umidade e à maresia. Esses aspectos dificultam estimar os custos do projeto FVF, visto que, com exceção dos custos com módulos e inversores, é difícil a mensuração dos demais componentes devido à escassez de dados de plantas FVF no Brasil e o reduzido número de empresas que fabricam flutuadores, o que representa um desafio para o avanço do setor no país. Outra questão que precisa ser aprofundada é a influência da temperatura ambiente no desempenho dos módulos FVF, pois os estudos no país sobre o tema são poucos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Massas d'Água. 2020. Disponível em: <https://11nk.dev/ANAEspelhos>. Acesso em: 04 de jun 2023.

ARAÚJO, A. J. N.; RANK, N. I.; BUENO, T. B. A. Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba," B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

ARAUJO, D. N.; BATISTA, N. E.; CARVALHO, P. C. M.; REGES, J. P.; COSTA, D.; DIAS, R.; FREITAS, D.; LIMA, S.; RAMOS, K.; RIBEIRO, S. Renewable hybrid systems: characterization and tendencies. IEEE Latin America Transactions, vol. 18, no. 01, pp. 102–112, 2020

BUSSON, B. O.; SANTOS, L. O.; CARVALHO, P. C. M.; FILHO, C. O. C. Experimental assessment and modeling of a floating photovoltaic module with heat bridges. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 12, pp. 2079–2086, 2021.

CARVALHO, T. F. Estudo sobre usinas solares flutuantes em reservatórios de água no Brasil: Estudo de caso no Rio Mossoró. Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), 2020.

COSTA, S. G. Impactes ambientais de sistemas fotovoltaicos flutuantes. PhD thesis, 2017.

CRUZ, I. S.; BATISTA, N. E.; CARVALHO, P. C. M. Renewable hybrid systems for water pumping: a review. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 10, pp. 2263–2274, 2022.

DRUZ, M.; JÚNIOR, L.; FERREIRA, A.; ELISA, M. Tendência da precipitação no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 24, 2019.

FUNCEME, “Índices de aridez do Estado do Ceará.” 2023. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=5826. Acesso em: 07 de jul 2023.

GOMES, M. C. R. Aspectos hidrogeológicos do município de Fortaleza - Ceará. Monografia de Especialização em Gestão Hídrica pelo Instituto de Geociências pela Universidade Federal do Pará, fev 2008.

HAFEEZ, H.; JANJUA, A. K.; NISAR, H.; SHAKIR, S.; SHAHZAD, N.; WAQAS, A. Techno-economic perspective of a floating solar PV deployment over urban lakes: A case study of nust lake islamabad, *Solar Energy*, vol. 231, pp. 355–364, 2022.

IBGE, CENSO Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IPLANFOR. Fortaleza em Mapas - Informações Georreferenciadas de Fortaleza. 2018. Disponível em: <https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 21 de jun 2023.

IPECE, “Ipecedata | sistema de informações geossocioeconômicas do Ceará.” 2021. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-dataweb/>. Acesso em: 01 de jul 2023.

LOPES, M. M.; SOUZA JUNIOR, P. A. Sistemas fotovoltaicos flutuantes: análise do tema e estudo de caso para o lago da UNIFEI. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, vol. 10, 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (PMF), “Acervo Digital de Fortaleza.” 2006. Disponível em: <https://acervo.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 23 de jun 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (PMF), “Comitê de Energias Renováveis analisa projeto de indicação que cria Programa Fortaleza Solar.” 2022. Disponível em: <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/comitede-energias-renovaveis-analisa-projeto-de-indicacao-que-cria-programafortaleza-solar>. Acesso em: 29 de jun 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (PMF), “Cpi 002/2023 – concessão administrativa, para implantação, gestão, operação e manutenção de geração de energia distribuída.” 2023. Disponível em: <https://compras.sepog.fortaleza.ce.gov.br/publico/detalhelicitacao.asp?id=1905&fonte=Novo>. Acesso em: 05 de jul 2023.

PV MAGAZINE. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2022/01/19/floating-pv-could-reach-4-8-gw-globally-by-2026/>. Acessado em 16/04/2024.

QGIS. “Welcome to the QGIS project!” 2023. Disponível em: <https://www.qgis.org/en/site/index.html>. Acessado em 17 de set de 2023.

RAVICHANDRAN, N.; FAYEK, H. H.; RUSU, E. Emerging floating photovoltaic system—case studies high dam and Aswan reservoir in Egypt. *Processes*, vol. 9, no. 6, p. 1005, 2021.

REGES, J. P.; CARVALHO, P. C. M.; ARAÚJO, J. C.; CARNEIRO, T. C. Sizing methodology of floating photovoltaic plants in dams of semi-arid areas. *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 144, no. 4, p. 041003, 2022.

RODRIGUES, P. S. F.; JATOBÁ, E. B.; NOBREGA, D. B. G.; FILHO, J. B. M. Plataforma fotovoltaica flutuante de Sobradinho (BA)-desafios e estratégias de implantação. Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, 2020.

SACRAMENTO, E. M.; CARVALHO, P. C. M.; ARAÚJO, J. C.; RIFFEL, D. B.; CORRÊA, R. M. C.; PINHEIRO NETO, J. S. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 8, pp. 1019–1024, 2015.

SEUMA. Monitoramento da qualidade da água dos recursos hídricos. 2022. Disponível em: <https://shre.ink/SEUMA-qualidade-agua>. Acesso em: 21 de jun 2023.

SIECKER, J.; KUSAKANA, K.; NUMBI, B. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 192–203, 2017.

SILVA, F.; CARNEIRO, T.; CARVALHO, P. C. M. Análise estatística da geração de eletricidade de plantas fotovoltaicas do laboratório de energias alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC). Iconnip, in Congresso Internacional Virtual de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação do Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

SILVA, G. D. P.; BRANCO, D. A. C. Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal*, vol. 36, no. 5, pp. 390–400, 2018.

SILVA, G.; SOUZA, M. J. R. Estimativa de geração de energia através de um sistema fotovoltaico: implicações para um sistema flutuante no lago Bolonha, Belém-Pará, *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, vol. 6, no. 2, pp. 149–164, 2017.

STRANGUETO, K. M. Estimativa do potencial brasileiro de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidroelétricas. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.

TEMIZ, M.; JAVANI, N. Design and analysis of a combined floating photovoltaic system for electricity and hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 5, pp. 3457–3469, 2020.

EFEITOS DA MITIGAÇÃO MANUAL DE SUJIDADE NO DESEMPENHO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA EM AMBIENTE URBANO

José Janiere Silva de Souza¹
Paulo Cesar Marques de Carvalho²
Ivonne Montero Dupont²

¹*Instituto Federal do Ceará*

²*Universidade Federal do Ceará*

DOI: 10.47168/rbe.v30i1.845

RESUMO

A energia solar tem sido utilizada em diversas aplicações, como a geração de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos (FV). Porém, o desempenho elétrico desses sistemas é influenciado pelas condições ambientais, climáticas e antropológicas do local de instalação, como sujeira. Considerando esse contexto, este artigo tem como objetivo analisar os efeitos de intervenções de limpeza manual em uma usina FV instalada em Fortaleza-Ceará (Brasil). Verifica-se um aumento de produção de energia elétrica de 1,92% em 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) face a 19/08/2018 (30 dias antes da 2ª limpeza); *SRatio* (Relação de Sujidade) e η (eficiência) apresentaram uma melhoria de 3,45% e 3,62%, respectivamente. Após 21 dias da 2ª limpeza, a geração da unidade LEA1 foi 1,96% menor mesmo com a irradiação sendo 2,31% maior; *SRatio*, η e Y_{FV} (Produtividade) apresentam redução de 4,82%, 4,82% e 2,02%, respectivamente. Ao analisar o valor médio mensal das métricas PR_{Corr} , *SRatio* e η em 2018, foi observado que as intervenções de limpeza na planta FV mostraram-se efetivas, com uma melhoria de 7,36% no valor médio mensal de η em outubro (posterior às limpezas) em relação a agosto (anterior à limpeza).

Palavras-chave: Planta FV; Limpeza manual; Sujidade; *SRatio*.

ABSTRACT

Solar energy has been used in various applications, such as the generation of electricity through photovoltaic (PV) systems. However, the performance of these electrical systems is influenced by environmental, climatic, and anthropological conditions of the installation site, such as soiling. Considering this context, our article aims to analyze the effects of intensifying manual cleaning of a PV plant in Fortaleza-Ceara (Brazil). An electricity production increase of 1,92% was verified on

09/21/2018 (three days after the 2nd cleaning) compared to 08/19/2018 (30 days before the 2nd cleaning); $SRatio$ (Soiling Ratio) and η (Efficiency) experienced an improvement of 3.45% and 3.62%, respectively. After 21 days of the 2nd cleaning, the generation by the unit LEA1 was 1.96% lower even with the irradiation being 2.31% higher; $SRatio$, η and Y_{FV} (Yield) showed a reduction of 4.82%, 4.82% and 2.02%, respectively. When analyzing the average monthly value of the PR_{Corr} , $SRatio$ and η in 2018, it was observed that the cleaning interventions in the PV plant proved to be effective, with an improvement of 7.36% in the average monthly value of η in October (after the cleaning) compared to August (before the cleaning).

Keywords: PV Plant; Manual cleaning; Soiling; $SRatio$.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2019), a população mundial deve atingir o montante de 8,5 bilhões em 2030, 9,7 bilhões em 2050 e 10,9 bilhões em 2100; com isso, cresce a busca por fontes sustentáveis para geração de eletricidade para suprir o consumo. A energia do Sol tem sido usada pelo ser humano em diversas aplicações: aquecimento de ambientes, secagem de alimentos e dessalinização de água. A utilização da energia solar para a geração de eletricidade, em escala comercial, tem se tornado uma tendência em diversos países como forma de substituição/redução do uso de combustíveis fósseis (KAZEM et al., 2020).

Ao analisar os dados de geração fotovoltaica (FV) a nível global, é observado um aumento de 270 TWh, incremento de 26% em 2022; estima-se que a geração FV ultrapassará a geração a partir de carvão até 2027. Em especial, esse crescimento deve-se à utilização dos sistemas FV nos países pertencentes à Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) e China (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). Assim, justifica-se o crescente interesse da comunidade científica na realização de estudos referentes à utilização de sistemas FV em diferentes vertentes: (HERNANDEZ e SANTOS, 2021), (BUSSON et al., 2021), (NIETO et al., 2021), (MONTANO et al., 2022), (SILVA et al., 2022) e (LIMA et al., 2023).

Os módulos FV são classificados sob Condições Padrão de Teste (*Standard Test Conditions* - STC) que não correspondem, necessariamente, às condições ambientais de uma determinada localidade; em áreas urbanas, por exemplo, os módulos FV estão suscetíveis a altas temperaturas, poluição do ar, sombreamento e sujidade (SAILOR; ANAND; KING, 2021). É comum encontrar na literatura autores que classificam irradiância/sombreamento, tempera-

tura e sujidade, nessa ordem, como os fatores que mais impactam o desempenho de módulos FV. No tocante aos sistemas FV, estudos têm sido realizados para evidenciar os efeitos da sujidade em várias tecnologias FV, sobretudo em regiões áridas e semiáridas; à medida que há aumento na implementação de usinas FV, o interesse pela temática da sujidade evolui (COSTA; DINIZ; KAZMERSKI, 2018) e (SOUZA; CARVALHO; BARROSO, 2022).

Os efeitos da sujidade são observados em módulos de silício amorfo (a-Si) em Adrar (Argélia) (BENABDELKRIM et al., 2021). Ao observar um módulo sujeito a um ano de deposição de sujidade, sem limpeza manual, é observada uma redução de 87% da potência em relação ao estado limpo; a Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}) é reduzida em 79,89%, a Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) em 3,06%, enquanto a eficiência e Fator de Forma (FF) em 72,5% e 40,54%, respectivamente. As perdas por sujidade são quantificadas em módulos FV em Abuja (Nigéria) (BADAMASI et al., 2021); são utilizados diferentes ângulos de inclinação (8°, 20°, 35°, 45°, 60°). É relatado que as perdas de energia do módulo sujo passam de 13% para o ângulo de 8°, para 7,74% para a inclinação de 20°, para o ângulo de 35° as perdas são de 12,8%, passando para 7,49% para 45° e 11,4% para a inclinação de 60°.

Um estudo, com duração de um mês, verifica o impacto da sujidade em módulos bifaciais em Jaipur (Índia) (RAINA et al., 2021). As perdas por sujidade ao final do experimento são de 6,86%, enquanto a Taxa de Sujidade (*Soiling Rate* – SRate) é de aproximadamente 0,23%/dia; a métrica SRate representa a variação percentual diária da relação de sujidade devido à ausência de limpeza dos módulos FV (MICHELLI et al., 2017). Os efeitos da sujidade são avaliados em um sistema FV de 2.000,3 kWp instalado em um telhado em Sonargaon (Bangladesh), com módulos FV sob diferentes intervalos de limpeza (ALAM et al., 2021). Os valores da Relação de Desempenho (*Performance Ratio* - PR) variam entre 74,40% e 78,83% antes de uma limpeza; após a limpeza a PR passa a variar na faixa de 85,15% a 87,57%. De modo geral, há uma melhoria entre 10 e 12% da PR considerando a adoção de três limpezas por mês.

O impacto da sujidade na geração de energia elétrica de módulos FV é quantificado em Jaipur (Índia) (RAINA; SHARMA; SINHA, 2022). As perdas por sujidade, após 30 dias, são de 6,86%, enquanto o SRate fica na faixa de 0,23% a 0,27%/dia; o SRate médio no final do período de teste é de 0,23%/dia. As características da sujidade e os efeitos no desempenho de uma planta FV de 9,5 MWp com módulos de silício policristalino (p-Si), nas proximidades de uma plantação de arroz na Tailândia, são avaliados em (SAKARAPUNTHIP et al., 2021). A maior densidade de deposição de sujidade é de 1,64 g/m² (após 70 dias de exposição), que está associada a uma redução de 41,96% da transmitância das amostras de vidro (expostas junto aos módulos);

após a incidência de chuvas, e consequente limpeza natural dos módulos, as perdas de corrente reduzem para a faixa entre 1 e 3%.

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo apresentar os efeitos de intervenções manuais de limpeza da sujidade em uma planta FV com módulos p-Si instalados no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA – UFC), localizado no ambiente urbano de Fortaleza, estado do Ceará, Brasil.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

Um módulo com sujidade em sua superfície pode estar sujeito a condições de sombreamento parcial, a depender da distribuição (uniforme ou não uniforme) e da espessura da camada de sujidade. A deposição não uniforme pode causar o surgimento de pontos quentes que, eventualmente, podem danificar permanentemente as células FV; tipicamente, a deposição não uniforme é observada em módulos FV com molduras (BRAGA, 2018). Adicionalmente, a deposição não uniforme também pode estar relacionada à presença de excrementos de animais e proliferação de fungos, musgo e algas.

2.1 Composição da sujidade

A distribuição do tamanho das partículas de sujidade é diferente para cada localidade, pois depende da fonte, geração e dispersão; as características químicas são específicas de cada local, pois estão relacionadas aos mecanismos de produção (RAO; MANI; RAMAMURTHY, 2018). Assim, a caracterização da composição da sujidade, bem como a forma de sua distribuição pela superfície dos módulos FV, são fatores cruciais para o entendimento das interações partículas-módulos, determinação dos seus efeitos no desempenho elétrico e escolha de métodos de mitigação.

O carregamento de partículas na atmosfera está principalmente relacionado à ação de erosão causada pelo vento no solo. Após o início da movimentação das partículas, os mecanismos de transporte dependem sobretudo do seu tamanho (PICOTTI et al., 2018). Partículas maiores são afetadas principalmente por efeitos inerciais e gravitacionais, enquanto as partículas menores são influenciadas pelas interações inter-partículas. Assim, partículas finas (<1 μm) tendem a se acumular com maior rapidez do que as partículas grossas (>5 μm) (SALAMAH et al., 2022).

A sujidade apresenta natureza orgânica e inorgânica; na presença de água ou em condições com alta umidade, a parte solúvel tende a formar gotículas microscópicas de soluções salinas que envolvem a parte não solúvel (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013). Subsequentemente, durante o processo de secagem, o material salino

precipitado provoca a formação de pontes sólidas entre o material não solúvel e a superfície dos módulos, atuando como um cimento; consequentemente, as partículas não poderão ser removidas por rolamento/deslizamento. Caso esse processo se repita de forma periódica, sem que haja nenhuma intervenção de limpeza, provocará o acúmulo de camadas de partículas cimentadas. Desse modo, o processo de limpeza (manual ou natural) torna-se mais complicado e, em casos mais extremos, pode alterar de forma definitiva as propriedades do vidro dos módulos FV (ILSE et al., 2018).

2.2 Métodos de mitigação

O primeiro estágio para o enfrentamento da sujidade é a realização de um monitoramento adequado a fim de determinar o melhor método de mitigação, uma vez que não há uma estratégia universalmente validada em virtude da influência de características locais (BESSA et al., 2021). Embora as perdas diárias de desempenho de plantas FV variem de uma localidade para outra, diversos estudos experimentais mostram que tais perdas se acumulam com o tempo. Dessa forma, a escolha do método de limpeza, periodicidade, eficiência e custos associados dependem de um estudo de caso prévio (KAZEM et al., 2020).

Após a instalação, um dos principais métodos de melhoria da eficiência de plantas FV é a limpeza dos módulos; fatores como a inclinação, tipo de módulo e a metodologia de limpeza (úmida ou seca) devem ser considerados ao projetar mecanismos de limpeza (LAKSAHANI et al., 2021). Geralmente os sistemas de limpeza são de alto custo e economicamente viáveis apenas para sistemas de médio e grande porte; em sistemas de pequeno porte, as soluções disponíveis são do tipo manual, a fim de não impactar significativamente no custo total da planta FV (KHAN et al., 2021).

Em certas condições, a limpeza natural provocada pela incidência de chuvas fortes ou derretimento de neve pode ser suficiente para restaurar o desempenho da geração FV impactado pela presença de sujidade (STYSZKO et al., 2018). As chuvas exercem papel de mitigação de sujidade, em especial em plantas FV que não adotam cronograma de limpeza (ALAM et al., 2021). Todavia, chuvas de baixa intensidade podem contribuir com maior deposição de contaminantes, bem como acelerar o processo de cimentação da sujidade (JASZCZUR et al., 2019).

A limpeza mecânica manual é similar à limpeza de sujeira de janelas em edifícios, com escovas de cerdas macias. Devido à ação localizada, essa metodologia pode se apresentar mais eficiente que a limpeza natural ou limpeza mecânica não manual com água canalizada. Contudo, a interação direta com a superfície pode causar danos

físicos nos módulos, como abrasões e rachaduras, pela falta de uniformidade dos movimentos/pressão ou manuseio incorreto de equipamentos (KAZEM et al., 2020); o risco de acidentes de pessoal e as dificuldades de movimentação, má manutenção e desperdício de água são outras desvantagens (LAKSAHANI et al., 2021).

Na limpeza mecânica não manual são utilizados dispositivos semiautomáticos, que precisam da intervenção/supervisão de trabalhadores, ou totalmente automáticos que, com auxílio de sensores, se movem pela superfície dos módulos utilizando escovas, com uso de água ou não, para realizar a remoção da sujeira. Os sistemas baseados em limpeza mecânica não manual a seco podem ser uma solução viável para áreas com dificuldade de acesso à água; contudo, o contato direto das escovas com a superfície dos módulos pode causar danos físicos (KAZEM et al., 2020). Os sistemas mecânicos não manuais úmidos agem de forma similar à chuva, sendo a água canalizada até os módulos FV a fim de remover a sujidade. Contudo, esse método requer disponibilidade de água e utilização de bombas para aumentar a pressão da água; em alguns casos, podem ser adicionados agentes de limpeza para auxiliar no processo de remoção das partículas (KAZEM et al., 2020).

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização do local

O LEA – UFC encontra-se no Campus do Pici da UFC, em Fortaleza – CE, cujas coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) são: latitude 3° 44' 15" S, longitude 38° 34' 22" W e elevação de 21 m. Como característica específica do local, destaca-se a proximidade da Av. Mister Hull, via com alto fluxo de veículos. Fortaleza localiza-se em uma região semiárida com clima tropical quente subúmido (ou tropical chuvoso), apresentando temperatura anual média de 26,6°C. A pluviosidade média anual é de 1.338 mm, insolação média de 2.840 horas/ano, baixo grau de nebulosidade, evaporação média de 1.500 mm/ano e alta umidade relativa do ar (valor médio anual de 78,8%) (MAIA, 2015) e (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2019). Além disso, possui período chuvoso no primeiro semestre (entre fevereiro e maio) e período seco no segundo semestre (entre agosto e novembro) (MOURA et al., 2015).

O LEA – UFC possui duas plantas FV conectadas à rede elétrica de baixa tensão. A primeira, denominada LEA1, representada na Figura 1 e utilizada nesse estudo, foi instalada em julho de 2016, com potência de 1,5 kWp, inclinação de 10° orientada ao norte geográfico e constituída por seis módulos de 250 Wp do tipo p-Si conectados em série.

LEA1 é conectada à rede elétrica através de um inversor modelo PHB1500-SS. O registro dos parâmetros elétricos é realizado por um *datalogger*, do mesmo fabricante do inversor, com amostragem de aproximadamente 10 minutos; os dados são enviados, armazenados e disponibilizados em um servidor *web* do fabricante do inversor.

A planta LEA1 passou por intervenções de limpeza manual com a utilização de água, sabão neutro, pano de algodão e rodo nos dias 08 e 18 de setembro de 2018 (CHAVES et al., 2019) (DUPONT et al., 2019); essas intervenções possibilitam a observação dos efeitos de limpezas manuais no desempenho da LEA1, foco deste estudo.



Figura 1 – Planta FV LEA1, instalada no Campus do Pici da UFC

3.2 Métricas de avaliação de desempenho da planta FV

Uma métrica difundida na comunidade científica para determinação dos efeitos da sujidade é a Relação de Sujidade (*Soiling Ratio* - SRatio), que pode ser determinada através dos dados de I_{sc} (Corrente de Curto-Circuito) ou P_{Max} (Potência Máxima) de módulos sujos e limpos. A SRatio é uma métrica adimensional que varia entre 0 e 1; à medida que os valores se aproximam de 1 considera-se que há menor impacto da sujidade, enquanto valores próximos de 0 indicam forte efeito da sujidade no desempenho dos módulos FV. A SRatio pode ser estimada através de (1) (GOSTEIN; DUSTER; THUMAN, 2015).

$$SRatio_{P_{Máx}} = \frac{P_{Máx_{Sujado}}}{P_{Máx_{STC}} \cdot \left[1 + \gamma (T_{m_{Sujado}} - T_{STC}) \right]} \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \quad (1)$$

Em que $P_{Máx_{Suj}}$ é a potência máxima medida no módulo, $P_{Máx_{STC}}$ é a potência sob STC, γ e $T_{m_{Suj}}$ são, respectivamente, os coeficientes de temperatura para potência e a temperatura do módulo sujo; T_{STC} e G_{STC} são a temperatura e irradiância nas condições de referência (25°C e 1.000 W/m²) e G_{POA} é a irradiância incidente no plano dos módulos.

SRatio varia no decorrer do dia, com maiores valores geralmente próximos ao meio-dia. Esse comportamento deve-se ao fato da irradiação direta e difusa variarem com o ângulo de incidência no decorrer do dia (ZORRILLA-CASANOVA et al., 2012). Em vista disso, a IEC 61724-1 recomenda que a determinação da SRatio em sistemas de ângulo fixo, ou sistemas de rastreamento com ângulo de incidência menor que 35°, seja estimada a partir de medições no intervalo de ± 2 horas em relação ao meio-dia. Neste estudo são utilizados filtros visando minimizar o impacto de variações ambientais na determinação das métricas de avaliação, a saber:

- São consideradas apenas medições de 10 às 14 horas;
- Neste período, a irradiância deve ser superior a 700 W/m² e apresentar variação menor que $\pm 10\%$ no intervalo de 10 minutos;
- São considerados apenas dados para condição de céu limpo;
- Dados espúrios, provocados por inconsistências e/ou ausência de dados de irradiância ou potência no período utilizado para os cálculos das métricas, são excluídos.

Para estabelecer a condição do céu é utilizado o Índice de Clareza Modificado (*Modified Clearness Index* - k'_t , que apresenta menor dependência do ângulo de elevação solar em relação ao Índice de Clareza (*Clearness Index* - k_t) (AMILLO; HULD; MÜLLER, 2014); (2), é utilizado para determinar k'_t .

$$k'_t = \frac{k_t}{1,031 \cdot \exp\left(\frac{-1,4}{0,9 + \frac{9,4}{AM}}\right) + 0,1} \quad (2)$$

Onde AM é a massa de ar (DJAFER; IRBAH, 2013) e k_t é determinado por (3).

$$k_t = \frac{G_H}{G_{sc} \cdot \cos(\theta_z)} \quad (3)$$

Em que G_{sc} é a constante solar (1.367 W/m²), G_H é a irradiância no plano horizontal e θ_z é o ângulo de zênite.

As condições do céu podem ser definidas a partir de três intervalos distintos de k'_t : nublado ($0 < k'_t \leq 0,3$), parcialmente nublado ($0,3 < k'_t \leq 0,65$) e limpo ($0,65 < k'_t \leq 1$). Assim, os dados de SRatio são filtrados considerando $k'_t > 0,65$ (AMILLO; HULD; MÜLLER, 2014); o valor diário de k'_t é determinado pela média dos valores de k'_t entre as 10 e 14 horas.

Outra métrica utilizada com recorrência é a Relação de Desempenho (*Performance Ratio* – PR), que estabelece uma relação de eficácia de conversão em energia elétrica de um módulo/planta FV em relação ao valor teórico. Trata-se de uma métrica adimensional, que varia entre 0 e 1; valores mais próximos de 1 indicam funcionamento próximo ao teórico (ARAÚJO, 2020). A determinação de PR normalizado em relação à irradiância mostra-se menos afetada por variações da irradiância. Todavia, apresenta vulnerabilidade devido à variação da temperatura e vento; para a determinação de PR em estudos de sujidade é conveniente a remoção da influência da variação da irradiância, temperatura e vento (URREJOLA et al., 2016).

Diante do exposto, a utilização do PR corrigido pelo clima (*Weather-Corrected Performance Ratio* – PR_{Corr}), proposto pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL), apresenta maior apelo para estudos de sujidade, pois reflete comportamento sazonal condizente para a determinação do PR para qualquer tecnologia FV em uma determinada localidade, enquanto o valor do PR padrão pode variar até -0,9% para elevações de 3°C na T_m e de 3 m/s na velocidade do vento (DIERAUF et al., 2013) e (URREJOLA et al., 2016). O valor de PR_{Corr} é definido por (4).

$$PR_{Corr} = \frac{\sum_i E_{CA_i}}{\sum_i \left\{ P_{Máx_{STC}} \cdot \left[1 + \gamma (T_{c_{avg}} - T_{c_i}) \right] \cdot \frac{G_{POA_i}}{G_{STC}} \right\}} \quad (4)$$

Em que E_{CA_i} é a energia elétrica produzida pela planta FV no instante i ; $T_{c_{avg}}$ é a temperatura média anual da célula FV, conforme expresso em (5), definida como sendo o somatório hora a hora, durante 365 dias, do produto entre a irradiância e a temperatura da célula; T_{c_i} é a temperatura da célula, estimada conforme (6).

$$T_{c_{avg}} = \frac{\sum_i G_{POA_i} \cdot T_{c_i}}{\sum_i G_{POA_i}} \quad (5)$$

$$T_{c_i} = T_{m_i} + \frac{G_{POA_i}}{G_{STC}} \cdot \Delta T \quad (6)$$

O parâmetro ΔT é a diferença entre a temperatura da célula FV e a parte traseira do módulo, sendo dependente da construção dos módulos. Tipicamente, o valor de ΔT varia entre 2 e 3°C para módulos planos com montagem e vão aberto (KRATOCHVIL; BOYSON; KING, 2004). Na presente pesquisa considera-se $\Delta T = 3^\circ\text{C}$. Para determinação de $T_{c_{avg}}$ são utilizados os dados de temperatura dos módulos da planta LEA1, mensurados entre 08/01/2018 e 27/04/2019, sendo utilizadas 8.760 amostras horárias, o que corresponde à medição horária durante 24 horas no período de 365 dias; obtêm-se que $T_{c_{avg}}$ para a planta LEA1 é de 52,47°C.

Para a determinação da eficiência de conversão (η) é utilizada a equação (7) (JASZCZUR et al., 2018); em que A é a área dos módulos. Outra métrica utilizada é o Fator de Capacidade (FC), que representa a relação entre a geração de energia elétrica medida e a geração caso houvesse operação com potência nominal durante o período; o FC é determinado através de (8); Δt é o período analisado em horas. A Produtividade da planta (Y_{FV}) representa a relação entre a geração de energia elétrica e a potência instalada da planta, conforme (9).

$$\eta = \frac{P_{Máx}}{A \cdot G_{POA} [1 + \gamma (T_c - T_{STC})]} \quad (7)$$

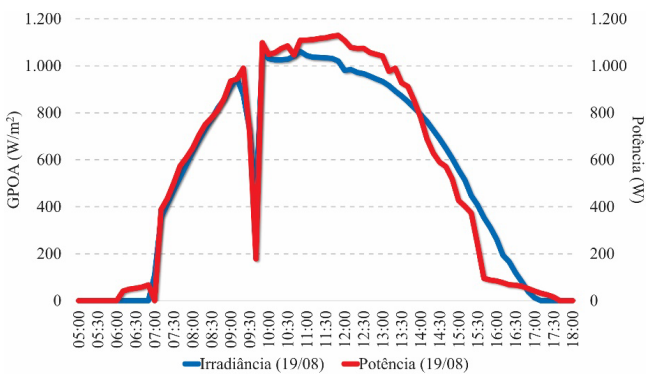
$$FC = \frac{E_{CA}}{P_{Máx_{STC}} \cdot \Delta t} \cdot 100 \quad (8)$$

$$Y_{FV} = \frac{E_{CA}}{P_{Máx_{STC}}} \quad (9)$$

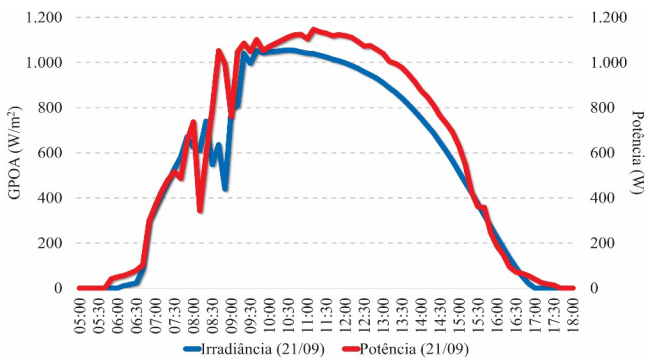
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As limpezas manuais em LEA1 foram realizadas nos dias 08/09/2018 e 18/09/2018. Os dados do dia 08/09/2018 não foram usados nesta análise em virtude das possíveis interferências nos cálculos das métricas devido à ação direta na planta FV. As medições do dia 18/09/2018 (2ª limpeza) foram descartados devido à realização de um

experimento de sombreamento estático entre 12:30 e 14:30h. Desse modo, o dia 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) foi definido como um dia claro de referência e tomado como dia de operação normal da planta LEA com módulos limpos. Para seleção dos dias para comparação dos efeitos da sujidade, foram escolhidos dias com $k'_t > 0,65$ e com irradiação $\pm 5\%$ em relação ao dia de referência. Para a 1ª comparação, foram utilizadas as medições obtidas nos dias 19/08/2018 (30 dias antes da 2ª limpeza) e 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza). Na Figura 2 (a) e (b) são comparadas a irradiação e potência desses dias, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 2 - Comparação de irradiação e potência: (a) 19/08/2018 e (b) 21/09/2018

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da comparação das métricas de avaliação entre os dias 19/08/2018 e 21/09/2018. As setas $\uparrow \downarrow$ simbolizam aumento ou redução, respectivamente, das mé

tricas em relação ao dia de referência. Vale salientar que o cálculo de todas as métricas corresponde às medições realizadas entre as 10 e 14 horas de cada dia.

Tabela 1 - Comparação das métricas de desempenho em 08/09/2018 e 21/09/2018

Métrica	19/08/2018	21/09/2018	Diferença (%)
Irradiação (kWh/m ²)	3,84	3,81	↓0,79
Geração (kWh)	5,10	5,20	↑1,92
<i>S</i> Ratio	0,84	0,87	↑3,45
<i>PR</i> _{Corr}	0,86	0,83	↓3,61
η (%)	12,78	13,26	↑3,62
<i>FC</i> (%)	14,17	14,44	↑1,87
<i>Y</i> _{FV} (kWh/kW _p)	3,47	3,54	↑1,98

A planta LEA1 apresentou aumento nos valores das métricas de avaliação de seu desempenho no dia 21/09/2018, mesmo considerando que a irradiação foi 0,79% menor quando comparada à do dia 19/08/2018; apenas a métrica *PR*_{Corr} apresentou redução de 3,61%, enquanto η aumentou em 3,62%. Considerando a operação da planta durante todo o dia (07:00 às 17:00), a η do dia 21/09/2018 é 5,31% superior em relação ao dia 19/08/2018.

Considerando os critérios adotados, compara-se as medições dos dias 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) e 02/10/2018 (14 dias após a 2ª limpeza). O dia 02/10/2018 foi escolhido por ser o dia válido mais próximo do dia 21/09/2018. Na Figura 3 é apresentada a irradiação e potência do dia 02/10/2018.

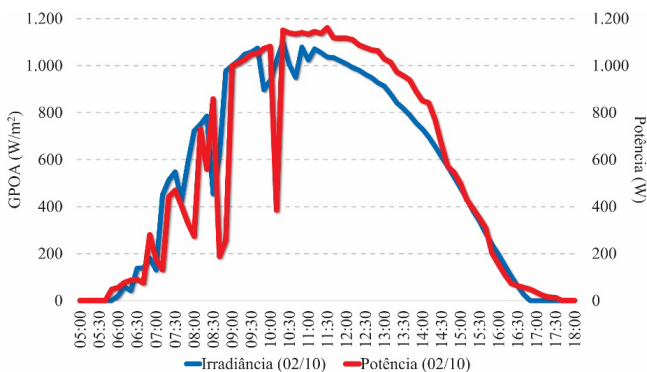


Figura 3 - Comparação da irradiação e potência do dia 02/10/2018

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da comparação das métricas de avaliação entre os dias 21/09/2018 e 02/10/2018; os valores de diferença relativa são calculados tendo como referência o dia 21/09/2018.

Tabela 2 - Comparação das métricas de desempenho em 21/09/2018 e 02/10/2018

Métrica	21/09/2018	02/10/2018	Diferença (%)
Irradiação (kWh/m ²)	3,81	3,79	↓0,53
Geração (kWh)	5,20	5,10	↓1,96
<i>SRatio</i>	0,87	0,86	↓1,16
<i>PR_{Corr}</i>	0,83	0,81	↓2,47
η (%)	13,26	13,03	↓1,77
<i>FC</i> (%)	14,44	14,17	↓1,91
<i>Y_{FV}</i> (kWh/kW _p)	3,54	3,47	↓2,02

A irradiação de 02/10/2018 foi 0,53% inferior à do dia 21/09/2018; houve uma redução de 1,96% na geração. No intervalo analisado foram registradas duas precipitações, ambas de 0,40 mm, ocorridas em 29/09/2018 e 02/10/2018, que não se mostraram suficientes para evitar a redução das métricas de avaliação; todas as métricas de avaliação do dia 02/10/2018 foram inferiores às do dia 21/09/2018, sendo destacada a redução de 2,47% de *PR_{Corr}* e 2,02% de *Y_{FV}*.

Na Figura 4 é apresentada a irradiância e potência do dia 09/10/2018. Na Tabela 3 são apresentados os resultados da comparação das métricas de avaliação entre os dias 21/09/2018 e 09/10/2018. Apesar da irradiação do dia 09/10/2018 ter sido 2,31% maior em relação à irradiação do dia 21/09/2018, verificou-se uma geração 1,96% menor. Observa-se que houve redução de todas as métricas analisadas, sobretudo em *SRatio*, o que indica que o período de 21 dias após a limpeza já mostra acúmulo de sujeira no local em estudo; entre 21/09/2018 e 09/10/2018 foram registradas quatro precipitações de pequena intensidade, sendo a de maior volume com 2,20 mm no dia 08/10/2018.

Diante do exposto, observou-se que o dia 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) apresentou o melhor desempenho da planta LEA1, embora a irradiação nessa data não tenha sido o maior valor registrado entre os dias analisados. Ademais, destaca-se que o intervalo de 21 dias após a realização de uma limpeza foi suficiente para reduzir a η em 4,82%.

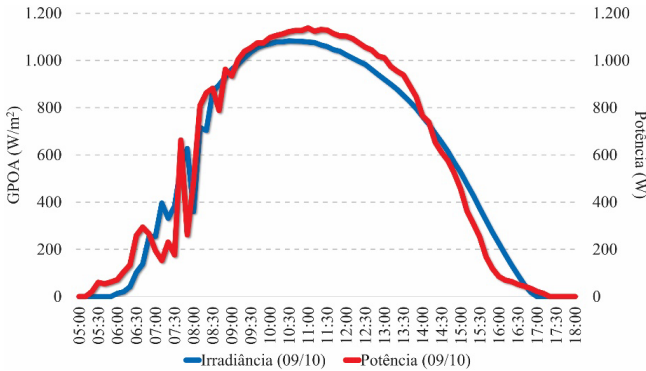


Figura 4 - Comparação da irradiância e potência do dia 09/10/2018

Tabela 3 - Comparação das métricas de desempenho em 21/09/2018 e 09/10/2018

Métrica	21/09/2018	09/10/2018	Diferença (%)
Irradiação (kWh/m ²)	3,81	3,90	↑2,31
Geração (kWh)	5,20	5,10	↓1,96
<i>SRatio</i>	0,87	0,83	↓4,82
<i>PR_{corr}</i>	0,83	0,82	↓1,22
η (%)	13,26	12,65	↓4,82
<i>FC</i> (%)	14,44	14,17	↓1,91
<i>Y_{FV}</i> (kWh/kW _p)	3,54	3,47	↓2,02

Para verificar o comportamento de longo prazo da planta LEA1 foram calculados os valores médios mensais das métricas *PR_{corr}*, *SRatio* e η , conforme mostrado na Figura 5; foram considerados dias com $k_t > 0,65$ e sem lacunas nas medições de parâmetros ambientais e operacionais motivadas pela desconexão dos sistemas de monitoramento. Devido às intervenções recorrentes na planta, para estudos de sombreamento realizados por Chaves (2019) e Dupont (2019), os dados referentes ao mês de setembro de 2018 foram excluídos dessa análise.

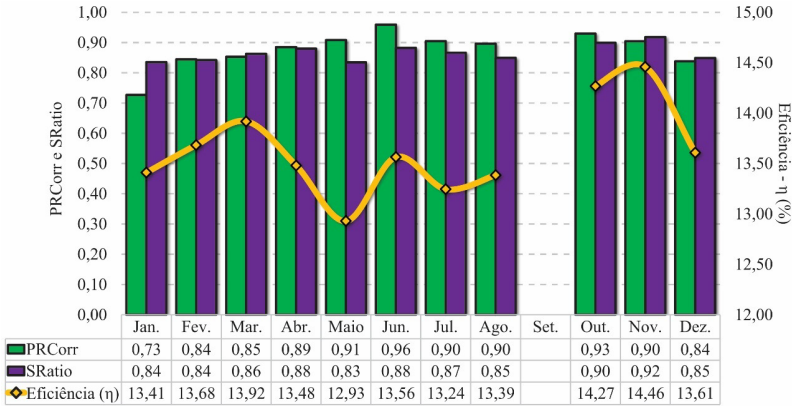


Figura 5 – Comportamento médio mensal das métricas PR_{Corr} , $SRatio$ e η em 2018

Nos meses subsequentes às limpezas manuais na planta LEA1, a η apresentou valor médio superior aos meses anteriores às limpezas; antes das limpezas (janeiro - julho) o valor médio mensal da η foi de 13,42% para 14,21% após as limpezas (outubro - dezembro), o que equivale a uma melhoria de 5,56%. O valor médio mensal de PR_{Corr} passou de 0,87 para 0,89 (melhoria de 2,45%), enquanto na métrica $SRatio$ registrou-se melhoria de 4,49% no valor médio mensal. Comparando o período imediatamente anterior (agosto) e posterior (outubro), registrou-se uma melhoria de cerca de 7,36% na η .

5. CONCLUSÕES

No presente artigo foram apresentados os resultados de um estudo sobre os efeitos de intervenções de limpeza manual em uma planta FV instalada em um ambiente urbano de uma região semiárida (Fortaleza). Foi observada uma melhoria de 3,62% na η da planta no dia 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) em relação ao dia 19/08/2018 (30 dias antes a 2ª limpeza); a melhoria de η chegou a 5,31% quando considerada a operação da planta das 07:00 às 17:00 horas. Após 21 dias (09/10/2018) da 2ª limpeza a geração da planta foi 1,96% menor, mesmo com uma elevação de 2,31% da irradiação; $SRatio$, PR_{Corr} e η apresentaram redução de 4,82%, 1,22% e 4,82%, respectivamente. Ao analisar o valor médio mensal das métricas PR_{Corr} , $SRatio$ e η em 2018 foi observado que as intervenções de limpeza na planta FV mostraram-se efetivas, uma vez que propiciaram o incremento em todas as métricas de avaliação analisadas; quando comparado o valor médio mensal de agosto (anterior à limpeza) e outubro (posterior à limpeza), a melhoria da η foi de 7,36%.

6. AGRADECIMENTOS

Ao IFCE – Campus Cedro, pelo afastamento concedido a José Janiere Silva de Souza para cursar o doutorado. Ao CNPq, pela bolsa de pesquisador dada a Paulo C M Carvalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, M. N. et al. Impact of solar PV panel cleaning frequency on the performance of a rooftop solar PV plant. In: 2021 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENT IN RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGY (ICDRET), 2021, Dhaka, Bangladesh. 2021 6th international conference on development in renewable energy technology (ICDRET). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icdret54330.2021.9752681>. Acesso em: 10 nov. 2023.

AMILLO, A.; HULD, T.; MÜLLER, R. A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation. *Remote Sensing*, v. 6, n. 9, p. 8165-8189, 28 ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs6098165>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ARAÚJO, D. N. Investigação experimental dos efeitos da sujidade no desempenho de plantas fotovoltaicas instaladas no campus do Pici da UFC. 2020. 104 p. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

BADAMASI, Y. A. et al. Effect of tilt angle and soiling on photovoltaic modules losses. In: 2021 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIDISCIPLINARY ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE (ICMEAS), 2021, Abuja, Nigeria. 2021 1st international conference on multidisciplinary engineering and applied science (ICMEAS). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icmeas52683.2021.9692375>. Acesso em: 10 nov. 2023.

BENABDELKRIM, B. et al. Evaluation of the impact of climatic conditions on amorphous Silicon PV module performance in the desert environment. In: 2020 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW AND RENEWABLE ENERGY (SIENR), 2021, Ghadaia, Algeria. 2020 6th international symposium on new and renewable energy (SIENR). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/sienr50924.2021.9631890>. Acesso em: 10 nov. 2023.

BESSA, J. G. et al. Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies. *iScience*, v. 24, n. 3, p. 102165, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102165>. Acesso em: 14 nov. 2023.

BRAGA, D. S. Interrelação entre os parâmetros de desempenho e distribuição de sujidade em módulos fotovoltaicos. 2018. 127 p. Dissertação de Mestrado — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

BUSSON, B. O. et al. Experimental assessment and modeling of a floating photovoltaic module with heat bridges. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 12, p. 2079-2086, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2021.9480150>. Acesso em: 10 nov. 2023.

CHAVES, M. P. et al. Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em zona urbana de Fortaleza-CE. *Revista Tecnologia*, v. 40, n. 1, 19 jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5020/23180730.2019.8898>. Acesso em: 14 nov. 2023.

CONCEIÇÃO, R. et al. Soiling effect in solar energy conversion systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 162, p. 112434, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112434>. Acesso em: 10 nov. 2023.

DIERAUF, T. et al. Weather-Corrected performance ratio. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1078057>. Acesso em: 14 nov. 2023.

DJAFER, D.; IRBAH, A. Estimation of atmospheric turbidity over Ghardaïa city. *Atmospheric Research*, v. 128, p. 76-84, jul. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.03.009>. Acesso em: 14 nov. 2023.

DUPONT, I. M. et al. Novel methodology for detecting non-ideal operating conditions for grid-connected photovoltaic plants using Internet of Things architecture. *Energy Conversion and Management*, v. 200, p. 112078, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112078>. Acesso em: 14 nov. 2023.

GOSTEIN, M.; DUSTER, T.; THUMAN, C. Accurately measuring PV soiling losses with soiling station employing module power measurements. In: 2015 IEEE 42ND PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2015, New Orleans, LA. 2015 IEEE 42nd photovoltaic specialists conference (PVSC). [S. l.]: IEEE, 2015. ISBN 9781479979448. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/pvsc.2015.7355993>. Acesso em: 14 nov. 2023.

HERNANDEZ, A. G.; SANTOS, S. P. Modelling and experimental validation of aging factors of photovoltaic solar cells. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 8, p. 1270-1277, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2021.9475857>. Acesso em: 10 nov. 2023.

ILSE, K. et al. Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 98, p. 239-254, dez. 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.015>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key world energy statistics 2021. Paris: OECD, 2021. E-book (81 p.). ISBN 9789264706774. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/2ef8cebc-en>. Acesso em: 10 nov. 2023.

JASZCZUR, M. et al. Impact of dust and temperature on energy conversion process in photovoltaic module. *Thermal Science*, v. 23, Suppl. 4, p. 1199-1210, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/ts-ci19s4199j>. Acesso em: 14 nov. 2023.

JASZCZUR, M. et al. Study of dust deposition and temperature impact on solar photovoltaic module. *MATEC Web of Conferences*, v. 240, p. 04005, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201824004005>. Acesso em: 14 nov. 2023.

KAZEM, H. A. et al. A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 123187, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>. Acesso em: 10 nov. 2023.

KHAN, M. U. et al. Modeling and design of low-cost automatic self cleaning mechanism for standalone micro PV systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 43, p. 100922, fev. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100922>.

KRATOCHVIL, J. A.; BOYSON, W. E.; KING, D. L. Photovoltaic array performance model. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/919131>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LAKSAHANI, U. C. et al. Design mechanism for solar panel cleaning process. In: 2021 10th International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAFS), 2021, Negambo, Sri Lanka. 2021 10th international conference on information and automation for sustainability (iciafs). [S. l.]: IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/iciafs52090.2021.9606104>.

LIMA, R. A. et al. Impacto da geração de plantas fotovoltaicas flutuantes sobre a matriz energética de estados do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Energia*, v. 29, n. 1, 6 abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47168/rbe.v29i1.778>. Acesso em: 14 nov. 2023.

MAIA, M. H. A. Projeto: plano de desenvolvimento econômico e social - fortaleza 2040. Fortaleza: IPLANFOR, 2015. 95 p.

MICHELI, L. et al. Time series analysis of photovoltaic soiling station data: version 1.0, august 2017. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1390775>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MONTANO, J. J. et al. Estimation of the parameters of the mathematical model of an equivalent diode of a photovoltaic panel using a continuous genetic algorithm. *IEEE Latin America Transactions*, v. 20, n. 4, p. 616-623, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2022.9675467>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MOURA, Í. J. M. et al. Caracterização dos períodos seco e chuvoso da cidade de Fortaleza (CE). *Ciência e Natura*, v. 37, 7 mar. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460x16206>. Acesso em: 14 nov. 2023.

NIETO, A. E. et al. Classification of electric faults in photovoltaic systems based on voltage-power curves. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 12, p. 2071-2078, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2021.9480149>. Acesso em: 10 nov. 2023.

PICOTTI, G. et al. Soiling of solar collectors – Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 2343-2357, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.043>. Acesso em: 10 nov. 2023.

PREFEITURA DE FORTALEZA. Plano Fortaleza 2040: qualidade do meio ambiente e dos recursos naturais. Fortaleza: IPLANFOR, 2019. 24 p.

RAINA, G. et al. Decoding the effects of soiling on bifacial gain from latitude mounted bifacial modules. In: 2021 IEEE 2nd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), 2021, Bilaspur, Chhattisgarh, India. 2021 IEEE 2nd international conference on smart technologies for power, energy and control (STPEC). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/stpec52385.2021.9718682>. Acesso em: 10 nov. 2023.

RAINA, G.; SHARMA, S.; SINHA, S. Analyzing the impact of dust accumulation on power generation and bifacial gain. *IEEE Transactions on Industry Applications*, p. 1-8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tia.2022.3189613>. Acesso em: 10 nov. 2023.

RAO, R. R.; MANI, M.; RAMAMURTHY, P. C. An updated review on factors and their inter-linked influences on photovoltaic system performance. *Heliyon*, v. 4, n. 9, p. e00815, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00815>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SAHANA, L. et al. Impact of soiling on energy yield of solar PV power plant and developing soiling correction factor for solar PV power forecasting. *European Journal of Energy Research*, v. 1, n. 2, p. 21-29, 14 jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24018/ejenergy.2021.1.2.7>. Acesso em: 14 nov. 2023.

SAILOR, D. J.; ANAND, J.; KING, R. R. Photovoltaics in the Built Environment: a critical review. *Energy and Buildings*, p. 111479, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111479>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SALAMAH, T. et al. Effect of dust and methods of cleaning on the performance of solar PV module for different climate regions: comprehensive review. *Science of The Total Environment*, v. 827, p. 154050, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154050>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SAKARAPUNTHIP, N. et al. Dust accumulation and its effect on PV performance in tropical climate and rice farm environment. In: 2021 IEEE 48TH PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2021, Fort Lauderdale, FL, USA. 2021 IEEE 48th photovoltaic specialists conference (PVSC). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/pvsc43889.2021.9519048>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SARVER, T.; AL-QARAGHULI, A.; KAZMERSKI, L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 698-733, jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.

SILVA, A. W. B. et al. Methodology based on artificial neural networks for hourly forecasting of PV plants generation. *IEEE Latin America Transactions*, v. 20, n. 4, p. 659-668, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2022.9675472>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SOUZA, J. J. S.; CARVALHO, P. C. M.; BARROSO, G. C. Analysis of the characteristics and effects of soiling natural accumulation on photovoltaic systems: a systematic review of the literature. *Journal of Solar Energy Engineering*, p. 1-99, 12 dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4056453>. Acesso em: 10 nov. 2023.

STYSZKO, K. et al. An analysis of the dust deposition on solar photovoltaic modules. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 9, p. 8393-8401, 29 mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1847-z>. Acesso em: 14 nov. 2023.

UNITED NATIONS. World population prospects 2019: highlights. [S. l.]: UN, 2019. E-book (43 p.). ISBN 9789210042352. Disponível em: <https://doi.org/10.18356/13bf5476-en>. Acesso em: 10 nov. 2023.

URREJOLA, E. et al. Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile. *Energy Conversion and Management*, v. 114, p. 338-347, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.016>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ZORRILLA-CASANOVA, J. et al. Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, n. 4, p. 790-796, 1 fev. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.1258>. Acesso em: 14 nov. 2023.

AS TRANSFORMAÇÕES EM CURSO NO SETOR BRASILEIRO DE GÁS NATURAL: UMA ANÁLISE DA DINÂMICA COMPETITIVA SOB A PERSPECTIVA DO DIAMANTE DE PORTER

Luíza Lisbôa Naegele¹
Romeu e Silva Neto¹

¹*Instituto Federal Fluminense*

DOI: 10.47168/rbe.v30i1.850

RESUMO

O mercado de gás natural no Brasil tem se caracterizado por um processo evolutivo, no qual o insumo vem apresentando um crescimento de participação no conjunto nacional de recursos energéticos. O aumento de sua demanda, o reconhecimento das dificuldades mercadológicas estruturais e um contexto de subaproveitamento do gás natural têm fomentado grandes iniciativas para reconfigurar o cenário, como a Nova Lei do Gás. A partir do exposto, o objetivo do trabalho proposto é, portanto, analisar os movimentos do mercado brasileiro de gás natural e sua capacidade produtiva. Por meio do Diamante de Porter essa indústria foi desmembrada em seis diferentes atributos (i. Condições de Fatores; ii. Governo; iii. Estratégia, Estrutura e Rivalidade; iv. Condições de Demanda; v. Indústria Correlatas e de Apoio e vi. Acaso) para compreender o histórico, as mudanças em andamento e as inclinações futuras do setor. Os dados foram obtidos de materiais científicos e acadêmicos oriundos de bases consolidadas além de relatórios oficiais de órgãos governamentais. Os achados da pesquisa apontam para um mercado que vêm se alterando para um modelo mais dinâmico e competitivo com o reconhecimento do gás natural enquanto possível grande contribuidor para o desenvolvimento econômico do país. Além disso, contrapondo Porter, as evidências colocam o Governo como um fator poderoso na definição das vantagens competitivas.

Palavras-chave: Óleo e gás; Transição energética; Competitividade; Estratégia.

ABSTRACT

The natural gas market in Brazil has been characterized by an evolutionary process, showing a participation growth in the national energy resources. The increase in its demand, the recognition of structural marketing constraints as well as the natural gas underutilization

context have encouraged major initiatives to reconfigure the scenario, such as the New Gas Law. Based on this, the objective of the proposed work is, therefore, to analyze the movements of the Brazilian natural gas and its productive capacity. Through Porter's Diamond, this industry was analyzed by six different attributes (i. Factor Conditions; ii. Government; iii. Firm strategy, Structure and Rivalry; iv. Demand Conditions; v. Related and Supporting Industries and vi. Chance) to understand the industry's history, the ongoing changes, and the future trends. Data were obtained from scientific and academic materials from consolidated databases, in addition to official reports from government agencies. The research findings expose a market that has been changing towards a more dynamic and competitive model with the recognition of natural gas as a possible main contributor to the country's economic development. In addition, contrasting with Porter, the evidence places the government as a powerful factor to define competitive advantages.

Keywords: Oil and gas; Energy transition; Competitiveness; Strategy.

1. INTRODUÇÃO

O mercado global de óleo e gás natural (O&G), apesar de ser a grande base da matriz energética mundial (EIA, 2021), apresenta grandes incertezas relacionadas à forte interferência de pressões geopolíticas internas e externas, sobretudo devido ao seu caráter estratégico para as regiões. No cenário presente, o dinamismo das atividades petrolíferas e sua alta influência sobre diversos setores, como comércio, indústria e construção civil, têm fomentado discussões acerca dos impactos e das perspectivas sob o âmbito da economia (AZEVEDO; SILVA NETO, 2020; SANTOS; FERREIRA; MENDES, 2020).

A compreensão do contexto brasileiro se delimita de forma semelhante, sendo marcado por uma instabilidade mercadológica intrínseca. As inúmeras transformações no marco regulatório no Brasil, com uma gama de oscilações de ordem política e institucional durante os séculos XX e XXI – e principalmente após a crise de 2014, que adquiriu contornos mais dramáticos com os desdobramentos da operação Lava Jato –, vêm provocando, na indústria de petróleo e gás, uma reestruturação setorial, a qual tem sofrido inúmeros impactos (ALVES; POLETTE, 2021; COLOMBINI, 2020).

Dentre os desdobramentos positivos desse processo estão os aumentos dos investimentos ligados ao que se tem chamado de indústria do gás natural (GN). A descoberta do pré-sal, que vem assumindo destaque na agenda nacional de debates nas mais variadas esferas por ser uma importante fonte de novos recursos, tem possibili-

tado uma ampliação da produção de petróleo e, conseqüentemente, uma maior produção de gás associado (ALVES; POLETTE, 2021). Observa-se também que as mudanças no setor elétrico em direção ao uso de fontes menos impactantes na geração de CO₂ vem estimulando crescentemente a demanda por gás natural como uma alternativa para complementar a geração de energia elétrica em períodos de seca nos reservatórios hidrelétricos (MENDES et al., 2015).

Embora essa indústria seja amplamente reconhecida como uma poderosa oportunidade de crescimento econômico para o país, essas são iniciativas recentes e uma observação do histórico aponta para uma realidade altamente verticalizada e pouco competitiva. O mercado brasileiro de gás natural se estruturou à sombra do petróleo, e esse combustível, o qual possui um menor impacto ambiental associado ao seu uso, sendo mais sustentável e menos poluente, assumiu um papel secundário (PESSANHA, 2017; MENDES et al., 2015; FIOREZE et al., 2013).

Por outro lado, ainda que o GN seja ambientalmente mais vantajoso, o seu transporte exige um processo dispendioso de liquefação e regaseificação próximo ao local de uso, aumentando consideravelmente o seu custo de produção e de oferta no mercado quando a sua circulação não se dá sob a forma gasosa através dos gasodutos (PESSANHA, 2017). A falta de uma infraestrutura robusta de exploração e dutoviária – que decorrem também do alto percentual de gás subaproveitado que é reinjetado nos poços, com uma média de 45% no ano de 2021 (ANP, 2021a) – são fatores determinantes para a subutilização desse insumo no Brasil.

As discussões para viabilizar uma maior abertura desse mercado já se estendem por algumas décadas, entretanto, as novas mudanças na política regulatória e seu fortalecimento, nos últimos anos, têm propiciado o surgimento de novas relações competitivas, alterando a forma como as empresas interagem nesse setor. Essa indústria, que foi formada tendo como eixo central um modelo monopsonista, caracterizado pelo poder exclusivo de compra da Petrobras e raramente abordado na literatura científica, encontra-se em transição para um cenário mercadológico mais dinâmico.

O objetivo do trabalho proposto é, portanto, analisar as transformações em curso no mercado brasileiro de gás natural – sem desassociá-lo do mercado de petróleo – e a sua capacidade competitiva por meio da utilização do Diamante de Porter, buscando identificar os fatores que têm motivado novos investimentos para a sua extração e utilização como fonte de energia em termelétricas. De modo complementar, a pesquisa também visa delinear o perfil da dinâmica competitiva dessa indústria e investigar o reflexo do monopsonio puro ao longo dos anos, o que fornecerá base para o entendimento sobre o futuro do Novo Mercado de Gás no Brasil.

2. METODOLOGIA

Para iniciar o trabalho e consolidar parte da produção acadêmica sobre a indústria de petróleo em sua totalidade, bem como a de gás natural, sua reestruturação e transformações, a etapa de levantamento bibliográfico foi realizada com busca a artigos, teses, dissertações, livros e demais publicações científicas, utilizando-se de pesquisa nas bases Scopus, Google Acadêmico, Scielo, Web of Science e em Anais de Congressos, no geral. Por se tratarem de fontes em sua maioria de cunho internacional, foram adotadas palavras-chave em inglês que remetesse ao setor petrolífero e aos estudos relacionados à disciplina de Estratégia que incluem, mas não estão limitadas, às seguintes: *Oil and Gas*; *Natural Gas*; *Competitiveness*; *Porter's Diamond*. As mesmas foram combinadas de maneiras variadas durante o processo de busca.

Além disso, a coleta dos dados contou com a obtenção de *inputs* estatísticos oriundos de *dashboards*, anuários, indicadores de fontes oficiais e órgãos governamentais. Constituíram, pois, a principal origem de dados os seguintes itens: as informações da exploração dos insumos provenientes da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP); os estudos destinados ao entendimento do setor energético vindos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE); e os relatórios da Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). As figuras e tabelas apresentados posteriormente foram tratados via Excel.

Por último, o cerne da metodologia foi representado pela aplicação do Diamante de Porter, o procedimento técnico escolhido para cumprir os objetivos aqui pretendidos. O modelo criado pelo economista norte-americano Michael Porter dispõe da possibilidade de um entendimento profundo acerca da dinâmica da vantagem competitiva nacional por intermédio de variáveis de mercado de simples aplicabilidade.

3. DIAMANTE DE PORTER

Em um mundo onde a competitividade se designa como global e crescente, à medida que os fundamentos da concorrência tendem cada vez mais para a criação e assimilação do conhecimento, os países ganham força como importantes engrenagens do sistema (PORTER, 1990). Diferenças na estrutura econômica, social e cultural, bem como as instituições e a história são fatores que contribuem para o êxito competitivo que é sustentado mediante um processo altamente localizado, em que o cenário nacional não é capaz de obter sucesso em todos os setores, mas sim em algum deles (PORTER, 1990).

Tendo essa circunstância reconhecida, o Diamante da Vanta-

gem Nacional é concebido por Porter (1990) a fim de entender de que forma ocorre a construção do ambiente nacional em que as empresas nascem e aprendem a competir; o que estaria por trás de um cenário capaz de possibilitar a acumulação mais rápida de ativos; e os componentes que favorecem a consecução do sucesso competitivo internacional.

Smit (2010) coloca que o modelo é tido como um framework geral que promove uma ligação entre as fontes de vantagens competitivas específicas de um território e as suas empresas atuantes, averiguando os fatores que podem elevar as chances de alcançar bons níveis de concorrência no âmbito internacional. Segundo o autor, o centro da motivação de Porter é a tentativa de elucidar o porquê de alguns países terem maior sucesso do que outros em determinadas indústrias (SMIT, 2010). Já Márkus (2008) afirma que o diamante é uma base teórica significativa para medir a competitividade em um nível empresarial sob diferentes pontos de vista.

Conforme Porter (1990), as respostas para esses questionamentos residem em quatro atributos que, isolada ou conjuntamente, lapidam o diamante da vantagem competitiva (Figura 1) em um país:

- i. Condições de Fatores: é a posição de uma nação quanto aos fatores de produção necessários para competir em um setor, em que a maior importância é associada ao que tange investimentos vultosos, periódicos e exigem especialização. A grande diferenciação frente ao mercado estaria na capacidade de criação e estímulo ao fortalecimento desses recursos de entrada (ex.: mão de obra, tecnologia, território, recursos físicos e financeiros, entre outros).
- ii. Estrutura, Estratégia e Rivalidade: refletem o cenário competitivo de atuação das companhias, como elas se organizam, concorrem e interagem entre si. As circunstâncias nacionais exprimem forte influência sobre como se desenharão os sistemas gerenciais e os modelos organizacionais.
- iii. Condições de Demanda: ajudam a criar vantagens quando uma determinada atividade econômica é maior ou mais visível no mercado doméstico em relação aos mercados externos, ou seja, esse fator tem a capacidade de estimular a propensão de uma indústria para estabelecer-se em uma região. A natureza da demanda tem o poder de forçar iniciativas de inovação por intermédio das exigências dos consumidores, podendo gerar uma disparada em comparação a outras localidades.
- iv. Indústrias Correlatas e de Apoio: descreve como é constituída a cadeia de suprimentos da indústria em questão. Os fornecedores internos, quando disponíveis e dotados de capacidade produtiva, podem prover insumos com maior eficácia de custo/cronograma, um cenário de comunicação direto que propicia a inovação, e, quan-

do integrantes da cadeia global, possibilitam o maior acesso a tecnologias e matérias primas, fontes essas diretamente indutoras da competitividade.

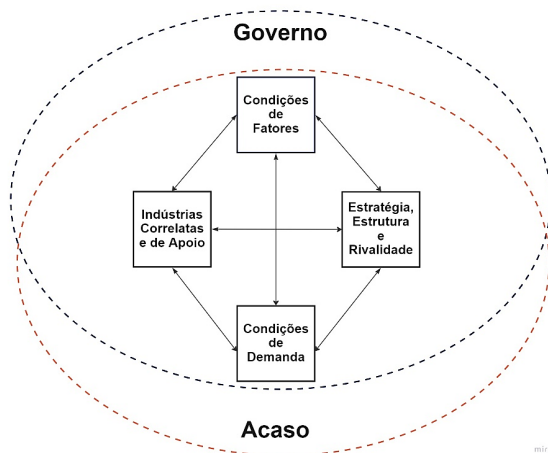


Figura 1 - Modelo do Diamante de Porter

Outros dois fatores tidos como complementares são analisados como impactantes na estrutura do modelo: a atuação do Governo e o poder do Acaso. O papel do governo é de encorajar ou até mesmo impelir as companhias a almejem maiores aspirações e galgarem níveis mais altos de desempenho, porém os resultados positivos só são esperados na ocasião em que sua ação ocorre em conjunto com outras condições favoráveis adjacentes (PORTER, 1990). Segundo o autor, o fator governo, portanto, não apresenta influência significativa se não estiver combinado com outras faces do diamante. Já o acaso, isto é, a ocorrência de eventos não controláveis (ex.: guerras, catástrofes naturais, choques de oferta, demanda, custos e outros), através da imprevisibilidade intrínseca, pode criar bases geradoras ou destrutivas da competitividade.

Moon et al. (1998) apontam que o modelo de Porter erra ao considerar o governo como uma força exógena quando deveria ser uma variável de mesma importância, com potencial para agir sobre todos os quatro componentes. Na realidade, ao estudar a competitividade da Coreia e de Singapura no âmbito global, o artigo conclui que, no caso de economias pequenas, o fator governo é o mais relevante, com poder para transformar o meio (MOON et al., 1998). De maneira análoga, os fenômenos do acaso, – dependendo de sua magnitude – podem transitar de uma característica de suporte para um determinante significativo dos padrões da vantagem competitiva. O presente

trabalho busca, portanto, incorporar ao modelo essas duas forças, investigando sua estrutura com igual profundidade e, assim, equiparando sua relevância aos demais atributos.

No meio científico, percebe-se um forte movimento de análise crítica ao Diamante concentrado na década de 1990, logo após a publicação da Vantagem Competitiva das Nações. No entanto, independentemente das críticas configuradas, Porter é uma referência internacional no que tange a área de estudos sobre Estratégia. As bibliometrias de Schneider et al. (2009) e Chagas et al. (2013) confirmam o autor como um dos mais citados do meio e fornecem grandes indícios da continuidade da sua influência e integração com teorias mais recentes. A profunda capacidade analítica atribuída aos seus modelos, somada à fácil interpretação e à aplicação prática, acaba por tornar os conceitos de Porter um caminho eficaz para o entendimento dos mercados (SCHNEIDER et al., 2009).

Após a contextualização teórica sobre a ferramenta, a Figura 2 apresentada abaixo, fundamentada no modelo de Porter (Figura 1), destaca-se como uma representação visual que sintetiza as principais palavras-chave estudadas para cada uma das dimensões do diamante. Por exemplo, para as "Condições de Fatores", serão abordados tópicos detectados como fundamentais para delimitar o tema da pesquisa e atender aos objetivos propostos, tais como: (i) Recursos naturais; (ii) Crise Hídrica e Geração de Eletricidade; (iii) Recursos Humanos; (iv) Infraestrutura e, (v) Tecnologia e Inovação. As variáveis que não tiveram sua temática subdividida foram analisadas de maneira mais abrangente.

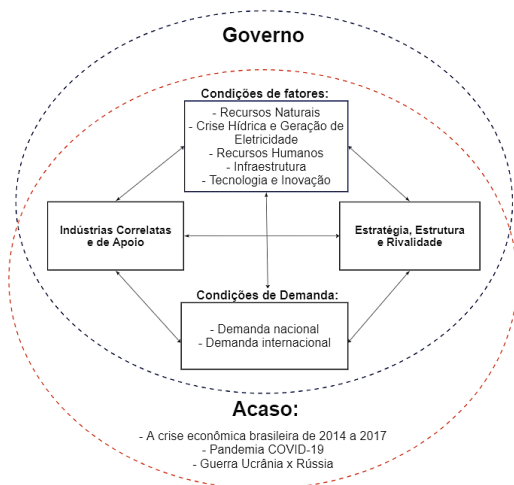


Figura 2 - Palavras-chave por dimensão do Diamante de Porter

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Condições de fatores

4.1.1 Recursos naturais

O aspecto geológico fez do território brasileiro uma região com a presença de importantes reservatórios de petróleo e gás natural. A vasta disponibilidade desses recursos naturais pode ser comprovada em termos numéricos: em sua totalidade, o país possui 38 bacias sedimentares em terra e nos oceanos, todavia, a Bacia de Santos e Bacia de Campos fornecem 88% do total de petróleo e gás do país (ZABANBARK; LOBKOVSKY, 2020).

Apesar da longa trajetória das atividades de exploração, foi a descoberta da província do pré-sal na Bacia de Santos, em 2006, composta por grandes acúmulos de óleo de baixa densidade com alto valor de mercado internacional, o fator que proporcionou ao país a condição de autossuficiência em relação ao petróleo e o tornou um núcleo principal para o atendimento à demanda de energia global (SOUZA; SGARBI, 2020).

A solidificação da Bacia de Santos, como centro estratégico de novos investimentos, acelerou um processo de desinvestimento com decorrente diminuição da produtividade da Bacia de Campos, que veio gradativamente perdendo participação na matriz energética. Os dados informados pela ANP (2022a), de janeiro de 2006 a maio de 2022, mostram que enquanto a descoberta do pré-sal apontava para um crescimento da produção de Gás Natural Total — medida em barris de óleo equivalente (boe) — na Bacia de Santos, o movimento oposto era sentido na Bacia de Campos.

O painel ANP (2022a) afirma que, em relação ao gás natural, os reservatórios do pré-sal possuem um enorme potencial de produção com possibilidades de altos ganhos econômicos. Contudo, a presença de teores variáveis de CO₂ nesse gás, somada aos desafios tecnológicos inerentes à operação em campos de águas ultraprofundas e afastados do litoral, fazem com que o aproveitamento dos grandes volumes ainda seja de difícil monetização.

Mesmo dado o subaproveitamento, o panorama geral dos últimos anos exibe um cenário sólido para garantir a continuidade e crescimento da exploração desse insumo. Em 2020, o Brasil ocupou a trigésima terceira posição no ranking das maiores reservas provadas de gás natural do mundo, com aproximadamente 0,35 trilhão de m³ de capacidade (ANP, 2021b). No ano subsequente, houve aumentos de 11,7%, 20,3% e 24,0%, respectivamente, para as reservas provadas, provadas + prováveis e provadas + prováveis + possíveis, constatando o potencial de evolução da produção e viabilizando projetos comerciais

para exploração adicional de 75% dos volumes já produzidos no Brasil até 2021 (ANP, 2022b).

a. Crise hídrica e geração de eletricidade

O parque brasileiro de geração elétrica foi desenvolvido essencialmente com base na fonte hidráulica. As vantagens do aproveitamento da água dos rios, que se constituiu como um recurso natural renovável e que tem baixo custo de operação, incentivaram os investimentos nas usinas hidrelétricas. Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), em 2021, 55,3% da energia elétrica nacional foi proveniente das hidrelétricas, enquanto as demais fontes somadas geraram 44,7%. Uma vez que a matriz hidráulica é extremamente suscetível às condições climáticas, a dependência do Brasil acerca dos reservatórios hídricos causa certa incerteza para a estabilidade do sistema de geração de energia.

A intermitência e sazonalidade da pluviometria podem ocasionar períodos de secas e crises hídricas que afetam não só o mercado de eletricidade, mas toda disponibilidade de água para as mais variadas demandas sociais. Esse quadro brasileiro, marcado pela dificuldade no abastecimento tem se manifestado de forma recorrente. O caso mais recente, de 2021, fruto de uma seca grave, mostrou algumas bacias hidrográficas das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste com os reservatórios apresentando níveis críticos e vazões muito abaixo das médias históricas (DINIZ et al., 2021). Adicionalmente, estima-se que os problemas relacionados à escassez desse recurso se agravem, considerando as alterações climáticas que vêm sendo sentidas em decorrência do aquecimento global.

As reflexões sobre a necessidade de se expandir a utilização do gás natural foram fortalecidas no início dos anos 2000. Por efeito do déficit de geração hidrelétrica, acarretado pelas crises hídricas que assolaram diversas regiões do país, as usinas termelétricas (UTES) vieram a ser acionadas mais frequentemente com o propósito de auxiliar o fornecimento de energia elétrica em épocas de baixo regime de chuvas (SANTOS et al., 2018).

Com relação às perspectivas de longo prazo, as projeções indicam que a geração termelétrica manterá um crescimento acentuado até 2032, enquanto a demanda industrial, residencial, comercial e de transporte seguirá em certo nível de estabilidade (EPE, 2023). É previsto que uma redução no custo do combustível após a recuperação dos impactos gerados pela guerra Ucrânia x Rússia, e que a regulação da Nova Lei do Gás traga uma maior estabilidade jurídica aos investidores, dado que existe a expectativa de um ambiente regulatório mais favorável aos investimentos privados, encorajando a ampliação da sua utilização nas UTES (EPE, 2020a).

4.1.2 Recursos humanos

Tem-se, nos recursos humanos, uma rica fonte de geração de vantagem competitiva para as empresas. Por se tratar de uma atividade de cunho tecnológico e complexidade inerente, o setor de O&G necessita de um perfil especializado de capital humano. Em resposta à expansão dessa indústria, verificada na década de 1990, e como um dos desdobramentos da Lei do Petróleo, a ANP iniciou um programa para incentivar a formação de mão de obra capacitada (ANP, 2023).

Segundo a ANP (2021b), a iniciativa veio para apoiar o desenvolvimento econômico do mercado e foi denominada Programa de Recursos Humanos da ANP (PRH-ANP), sendo suportada por duas fontes de financiamento: o Fundo Setorial CT-Petro (Plano Nacional de Ciência e Tecnologia do Setor de Petróleo) e a Cláusula de PD&I. Por meio de editais públicos, a concessão de bolsas de estudo para diversas instituições de ensino superior, além das bolsas para o gerenciamento dos PRHs nas universidades, fomentou a capacitação de profissionais e formou uma base sólida de ensino voltado ao mercado (ANP, 2021b). Um aporte de R\$ 260,7 milhões foi despendido, de 2013 a 2022, para a provisão de bolsas de estudo e taxa de bancada, sendo R\$ 64,9 milhões investidos em 2022 no PRH-ANP/MCT Superior (ANP, 2023).

Por sua vez, a pesquisa econométrica de Perlotti et al. (2016), instituída em São Paulo, comprovou que a presença de uma indústria forte de gás natural levou a uma maior variação da disponibilidade do trabalho industrial ao longo do tempo, indicando que a presença de gasodutos de transporte na região apresenta correlação direta e significativa com o volume de emprego gerado. A disponibilidade geográfica de gás natural, bem como da malha dutoviária, age como um indutor no processo de desenvolvimento regional e econômico, o que pode ser medido pela maior presença das atividades industriais (PERLOTTI et al., 2016).

4.1.3 Infraestrutura

No decorrer da história, a indústria de gás no Brasil, mediante a atuação da Petrobras, recebeu diversos investimentos para desenvolvimento da infraestrutura com a construção de gasodutos, rotas de escoamento, terminais de regaseificação de GNL e de importação, entre outros. No entanto, o maior entrave atual localiza-se em torno da malha de distribuição, que não é suficiente para atender a toda demanda de escoamento do país.

A infraestrutura existente conta com uma rede dutoviária relativamente pequena, totalizando, em 2022, 2.257 km de dutos de transferência e 9.306 km de dutos de transporte, dos quais, no horizonte de

curto prazo, espera-se a adição de mais 83 km, ainda em construção (trecho Horizonte/CE – Caucaia/CE do GASFOR II) (ANP, 2023; EPE, 2019). A falta de extensão do conjunto vigente impede a exploração do potencial do combustível, levando a um enredo de subaproveitamento. Para evitar a queima do excedente que não é absorvido pela malha de transporte, a reinjeção do gás natural nos campos, com o propósito de aumentar a pressão dos poços e otimizar a produção de petróleo, tornou-se uma prática usual no Brasil, e, no ano de 2021, quase metade do fluido produzido foi reinjeado (ANP, 2021a). Para tentar solucionar a problemática, o Ministério de Minas e Energia, por meio do lançamento do Novo Mercado de Gás, definiu a ampliação dos investimentos em infraestrutura, processamento, transporte e distribuição como uma prioridade.

Os resultados esperados por esse programa incluem a desverticalização da indústria, que pode gerar benefícios decorrentes da atenuação da concentração financeira, promovendo maior facilidade e rapidez no aporte de capital em infraestruturas de oferta de gás, uma vez que, se tudo está reunido em uma ou em poucas empresas, a captação de recursos pode enfrentar maiores restrições (MENDES et al., 2015). O aumento dos *players* de mercado estimularia a realização de parcerias, consórcios e negociações entre as próprias companhias, potencializando o compartilhamento de possíveis redes de dutos (MENDES et al., 2015).

4.1.4 Tecnologia e inovação

A lei nº 9.478, instituída em 1997, além de formalizar a criação da ANP, atribuiu, como competência deste órgão, prover incentivos à pesquisa e ao avanço de novas tecnologias na exploração, produção, transporte, refino e processamento do petróleo e do gás natural (ANP, 2021b). Para tal, a inclusão de uma cláusula de investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) foi posta como obrigatória nos contratos com as empresas petrolíferas, garantindo que um montante de 0,5% a 1% da receita bruta de produção fosse inevitavelmente disposto para essa natureza (ANP, 2023).

Somado a isto, o apoio contínuo da Petrobras, por meio de investimentos na geração de novas tecnologias e do fomento aos planos governamentais de desenvolvimento, fez com que o sistema brasileiro de inovação se firmasse, viabilizando a modernização de infraestruturas científicas, centros de estudo, o crescimento acelerado do número de laboratórios, a maior qualificação de recursos humanos e variedade de serviços prestados (MCTIC, 2018). Iniciativas como o fundo CT-PETRO, que fomentou R\$ 1,4 bilhão em projetos de tecnologia entre 1999 e 2016, e o Programa de Estímulo à Competitividade da Cadeia Produtiva, ao Desenvolvimento e ao Aprimoramento de Fornecedores

do Setor de Petróleo e Gás Natural (PEDEFOR), também representaram um papel chave para formar um ambiente de integração, com maior maturidade tecnológica em diversos segmentos petrolíferos estratégicos (MCTIC, 2018).

O Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação, desenvolvido pelo MCTIC (2018), identificou quatro principais desafios tecnológicos para o O&G no horizonte de 2018-2022: (a) a exploração e produção (E&P) em terra; (b) a produção de gases em reservatórios não convencionais (*shale gas*); (c) a E&P *offshore* em águas profundas e ultraprofundas; (d) o amadurecimento do conteúdo local e a competitividade de fornecedores. Com base nos resultados positivos obtidos pelos Estados Unidos com as atividades de exploração e produção de *Shale Gas* — i.e. gás natural encontrado em reservatórios não convencionais — o Estado brasileiro vem estudando maneiras de viabilizar as primeiras atividades extrativistas no país (MCTIC, 2018; DELGADO, 2020). O gás de xisto é o gás natural encontrado em reservatórios não convencionais, ou seja, em rochas sedimentares argilosas de baixa permeabilidade, e sua extração é realizada por técnicas de fraturamento hidráulico que são consideradas de alto custo e complexidade tecnológica (MCTIC, 2018).

Para o caso brasileiro, os desafios da viabilidade econômica e, sobretudo, ambiental, colocam dúvidas sobre o nível de patrocínio que será fornecido pelo governo no curto prazo para o processo de *fracking*. Mesmo com a oferta natural existente, a falta de conhecimento aprofundado sobre as características petrofísicas e geomecânicas dos folhelhos adiciona riscos para a aplicação do fraturamento, como a ocorrência de abalos sísmicos, alto consumo de água, vazamentos de gases, contaminações em aquíferos, emissões de gases estufa, incertezas que devem ser estudadas para o estabelecimento de tecnologias seguras (MCTIC, 2018).

4.2 Governo

O setor petrolífero brasileiro conta com uma atuação ativa do governo federal que busca melhorar as condições de demanda, fixar padrões rigorosos de qualidade, garantir o cumprimento da legislação ambiental e estimular o uso de outros energéticos alternativos, tais como o gás natural (ZAMITH; SANTOS, 1998). Entretanto, no “diamante” do setor de gás, a forte participação governamental, materializada por meio de órgãos como a ANP, Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e, em especial, da Petrobras, que veio para garantir as aspirações nacionais dentro do setor, fez por criar um mercado concentrado e verticalizado.

Embora haja uma evolução dos marcos regulatórios, o movimento para criar ações efetivas em políticas públicas que permitam ala-

vancar essa indústria é recente e, mesmo com o fim formal do monopólio e consequentes desinvestimentos por parte da Petrobras, ela continua a representar um papel de liderança, sendo capaz de ditar o ritmo de expansão da infraestrutura, bem como os preços (RODRIGUES, 2021; GOMES, 2014). Andrea Rodrigues (2021) define que um fator apropriado para exprimir a falta de competitividade a nível global é o fato de os preços ofertados ao consumidor final serem mais elevados do que no mercado internacional, com valores médios de U\$ 11,2 MM/GJ no ano de 2018 em comparação com U\$ 3,6 MM/GJ nos Estados Unidos.

No que se refere a atual regulamentação do setor, a ANP, vinculada ao MME, representa a principal responsável pela regulação do mercado de gás natural (MENDES et al., 2015). Conforme Mendes et al. (2015) e Gomes (2014), no Brasil a legislação difere de acordo com o tipo de atividade a ser analisada:

i. *Upstream* – existem três marcos regulatórios vigentes:

(a) Concessão: o concessionário usufrui de todos os insumos extraídos do bloco e deve, obrigatoriamente, pagar à União todos os tributos aplicáveis; (b) Cessão onerosa: define que a Petrobras possui o direito de contratar diretamente atividades de E&P em áreas do pré-sal ainda não licitadas; (c) Partilha de produção: o vencedor da licitação é quem oferece ao governo a maior participação no volume de óleo produzido, e a Petrobras, como operadora, detém uma participação mínima de 30%.

ii. *Midstream* – a ANP é responsável pela concessão, que pode ocorrer por via de licitação ou autorização para as atividades de construção, ampliação e operação de unidades de processamento de gás natural, gasodutos de escoamento da produção e instalações de liquefação e de regaseificação de gás natural.

iii. *Downstream* – os estados operam diretamente os serviços, possuindo seu próprio órgão responsável pela legislação e pelas regras para a concessão do serviço. Essa forma de regulação estatal interfere no preço final cobrado por cada distribuidora.

Mendes et al. (2015) conclui que o arcabouço regulatório vigente não engloba, pois, modelos de concessão que contemplem as diferenciações e adaptações necessárias para explorações não convencionais, e a falta de capacidade da cadeia de suprimento consiste em uma possível barreira ao desenvolvimento no país. Por fim, a Lei do Gás, como um instrumento de desconcentração, atesta como a regulação se torna muito relevante para aumentar a cooperação entre os agentes, sendo imprescindível para a maximização dos investimentos no mercado (MENDES et al., 2015).

4.3 Estratégia, estrutura e rivalidade das empresas

O mercado de gás natural brasileiro estrutura-se sob e sobre forte participação da Petrobras em todos os elos da cadeia de valor, desde a produção até a distribuição final. No que tange a produção, os dados das cinco empresas com maiores volumes explorados em 2022, exibidos na imagem abaixo (Figura 3), que foi elaborada com base no Anuário Estatístico Brasileiro da ANP (2023), constata o controle da Petrobras, que deteve 92,99% como operadora do total nacional produzido e 69,57% como concessionária, em áreas que são exploradas em regime de partilha.

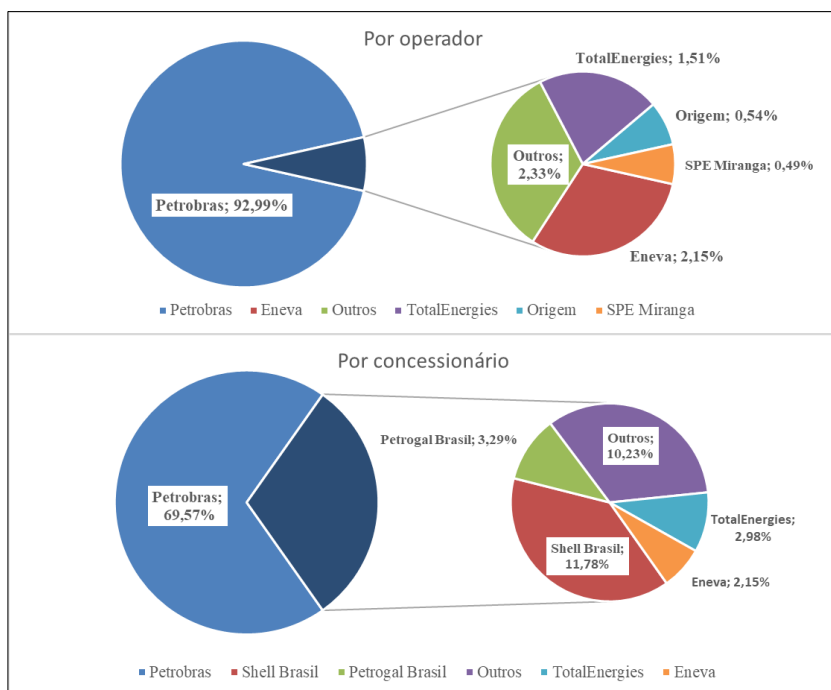


Figura 3 - Produção de gás natural em 2022, por operador e por concessionário

A soberania da estatal influencia de forma ainda mais contundente quando a análise é feita na etapa de transporte. A malha de gasodutos brasileira é consideravelmente pequena, além de sua distribuição estar centralizada em algumas regiões do país. A maior extensão está presente no litoral, menores trechos de dutos também podem ser encontrados no Amazonas e, por fim, tem-se o gasoduto Brasil-Bolívia (GASBOL) (EPE, 2019; ANP, 2021b). De forma a adicionar uma variá-

vel de impacto em relação à ausência de um sistema de infraestrutura desenvolvido, a Petrobras ainda detém praticamente toda a capacidade da malha de transporte disponível e possui participação acionária na grande maioria das distribuidoras de gás canalizado.

Logo, sem o direito de acessar a rede de gasodutos e transporte, os produtores privados ficam reféns do poder de compra de um único tomador: a Petrobras (NAEGELE et al., 2019). Esse contexto transforma o mercado de gás brasileiro em uma estrutura monopsonista, que, de acordo com Ashenfelter, Farber e Ransom (2010), é um tipo de competição imperfeita que se refere ao caso de um só comprador confrontado por muitos vendedores. O monopsonio provê à empresa beneficiada o poder de influenciar substancialmente os preços e a demanda de bens ou serviços para a obtenção de maiores lucros, o que pode ser prejudicial à livre competição de mercado.

Combinado às barreiras de entrada inerentes do segmento de petróleo, representadas pela necessidade de altos investimentos para se operar no setor, essa característica monopsonista acaba coibindo o acesso de novos produtores na exploração e produção de gás no Brasil, refletindo em um potencial efeito nocivo à concorrência e aos consumidores finais (NAEGELE et al., 2019). O contexto pouco dinâmico é, dessa forma, um retrato antigo e introduziu ao Governo Federal a necessidade de um olhar cuidadoso para o planejamento da malha de transporte, em que a construção de novos gasodutos passou a ser objeto de concessão, cabendo à ANP organizar processos licitatórios e fixação das tarifas de transporte (MENDES et al., 2015).

Esse novo marco regulatório foi instituído em 2009, através da chamada Lei do Gás. Os esforços frente a maior dinamicidade ganharam força em 2019 quando novas medidas foram definidas para dissolver o monopólio da Petrobras. Em junho, o Termo de Compromisso de Cessação de Prática (TCC), proposto pelo Conselho Administrativo de Defesa Econômica (Cade) e assinado pela companhia, firmou um compromisso de venda integral de oito refinarias – que eram responsáveis por cerca de 50% da capacidade produtiva da estatal – e dos respectivos ativos de transporte (MORAIS, 2021). Além desse acordo, o programa Novo Mercado de Gás, com a Resolução Nº 16, veio para propor diretrizes e aperfeiçoamentos de políticas energéticas, visando a promoção da livre concorrência nessa indústria, para desverticalização e conseqüente redução dos preços (BRASIL, 2019).

A revogação da Resolução Nº 16 por meio da Resolução Nº 3, emitida em 7 de abril de 2022, que busca definir os fundamentos do período de transição da abertura de mercado, comprovam que os esforços para a maior competitividade, assim como a evolução das malhas de gasodutos e infraestrutura de distribuição, continua sendo pauta em ascensão dentro do Governo Brasileiro. As mudanças adotadas resultam em progressos lentos, porém, ainda que a Petrobras con-

tinue exercendo um forte domínio sobre a produção e um monopólio sobre o transporte, espera-se um futuro com transformações significativas na estrutura mercadológica.

4.4 Condições de demanda

4.4.1 Demanda nacional

No momento atual, a produção nacional de gás natural objetiva atender aos segmentos industriais, de cogeração, automotivo, residencial e de geração de energia. De acordo com a EPE (2020a), as duas principais demandas são ligadas ao: (a) setor termelétrico, que possui um perfil de consumo variável, oscilando consideravelmente ao longo do tempo; (b) setor industrial, considerado o consumidor mais firme no Brasil e localizado de forma mais presente nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

As regiões brasileiras apresentam padrões de consumo diferenciados. Mesmo com as reduções das vendas de gás natural observadas em 2020, decorrentes dos impactos da pandemia de COVID-19, o Sudeste se manteve como o maior consumidor do país, demandando 58,7% de todo o volume comercializado. Já em 2022, essa região demandou um volume ainda maior de GN (cerca de 62,6%), seguido do Nordeste com 20,2%, Sul com 7,7%, Norte com 7,0% e, por fim o Centro-Oeste, com 2,5% (ANP, 2023).

Para complementar a produção interna e atender a toda a demanda do território nacional, o processo de importação de gás natural, iniciado em 1999 (ANP, 2021b), deixou de ser esporádico e passou a acontecer de forma sistemática. Segundo a Tabela 1, fundamentada nos dados da ANP (2023), as importações brasileiras totalizaram 8,99 bilhões de m³ em 2022, dos quais 6,38 bilhões de m³ (70,1%) GN proveniente da Bolívia. Essa importação é viabilizada pela maior rede de transporte de gás da América Latina, o Gasoduto Brasil-Bolívia (Gasbol), que conecta os dois países através de uma longa extensão de dutos, com 557 km na Bolívia e 2.593 km no Brasil. O volume restante correspondeu a compra de gás natural liquefeito (GNL), proveniente da Bélgica, Catar, Cingapura, Espanha, Estados Unidos, Guiné Equatorial e Nigéria (ANP, 2023).

Em se tratando de importação/exportação, o GNL é um tipo amplamente utilizado, correspondendo a uma mudança de estado físico — do gasoso para o líquido — do insumo bruto. Essa alteração possibilita que o transporte seja realizado através de tanques criogênicos. A fim de ser injetado na malha de gasodutos com destino ao consumidor final, posteriormente, esse combustível deve ser submetido a um processo de regaseificação.

Tabela 1 - Importação de gás natural (milhões de m³)

Gás Natural (a)										
Ano	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total (a)	11.648	12.049	11.854	10.369	8.886	8.071	6.795	6.551	7.324	6.384
GNL (b)										
Ano	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total (b)	4.866	5.349	7.258	2.952	1.756	2.771	3.061	1.323	9.583	2.601
Total Geral (a)+(b)	16.513	17.398	19.112	13.321	10.643	10.842	9.855	7.874	16.974	8.985

No quadro atual, o Brasil apresenta grande dependência da geração hidrelétrica, ficando refém de um sistema sazonal no qual crises hídricas prejudicam a geração de energia elétrica. Visando aumentar a confiabilidade do fornecimento de eletricidade no país, as projeções futuras, expostas na Figura 4 retirada da EPE (2023), mostram um cenário de crescimento da demanda termelétrica — com ressalva para o intervalo entre 2024 e 2025 em que aconteceu uma queda devido ao término do contrato de algumas UTEs — como reflexo da tentativa de redução da dependência do potencial hídrico e dos novos investimentos no gás natural (SANTOS et al., 2018). Conclui-se que, no geral, a demanda total tem previsão para aumentar 2,3% ao ano durante o próximo decênio (EPE, 2023).

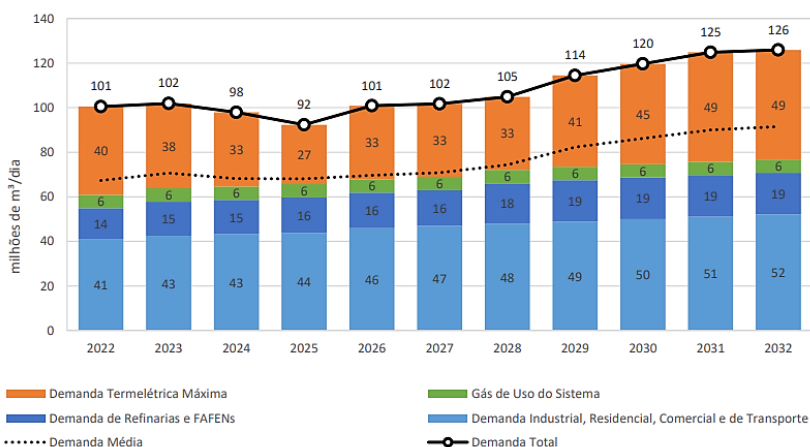


Figura 4 - Projeção de demanda total por gás natural

Além disso, é previsto que uma parte dessa expansão da demanda possa utilizar, de forma direta ou indireta, a capacidade disponível dos terminais de regaseificação de GNL – sejam os já existentes ou os planejados (EPE, 2021). No futuro, com a entrada em operação de novos terminais, será possível garantir uma maior estabilidade de abastecimento da rede de gás natural, o que também contribuirá para uma maior segurança no sistema brasileiro de geração de energia elétrica (EPE, 2021).

4.4.2 Demanda internacional

Com o decorrer dos últimos anos, o panorama da matriz energética no contexto mundial aponta para um aumento da participação do gás natural, principalmente dado o maior compromisso das nações com a promoção de práticas sustentáveis e a diminuição da emissão de gases de efeito estufa. Para ilustrar tal cenário, a Figura 5 (EPE, 2020a) demonstra a evolução da demanda de gás no mercado internacional que, de 2009 a 2019, obteve um crescimento médio de 3% ao ano.

A norma técnica da EPE (2020a) define que a distribuição da demanda global desse combustível fóssil apresenta-se 90% localizada na América do Norte, na Europa e na Ásia, tendo sua estrutura fortemente influenciada pelas particularidades dos países de maior consumo e dos principais segmentos demandantes, sendo estes os setores de geração termelétrica (27%), cogeração (11%) e residencial (13%), com destaque no setor industrial para os segmentos químico e petroquímico (4%).

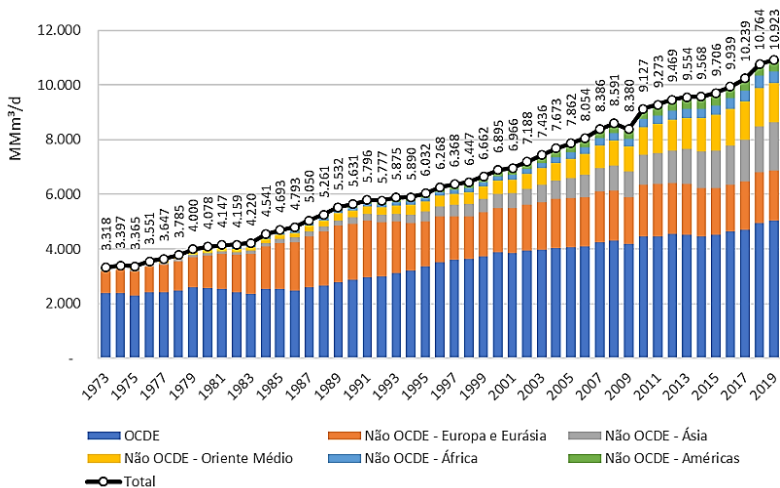


Figura 5 - Crescimento do consumo mundial de gás natural

As reservas de gás natural se distribuem de forma heterogênea ao redor do mundo, sendo o domínio predominantemente do Oriente Médio e da Ásia. Em 2020, repetindo o comportamento de anos anteriores, a Rússia permaneceu na liderança no ranking de países com maiores reservas provadas de gás natural, com 37,4 trilhões de m³ (19,9% do total mundial). Ao se juntar ao Irã, com 32,1 trilhões de m³, e Catar, com 24,7 trilhões de m³, os três países somam 50,1% das reservas globais (ANP, 2021b). Ainda de acordo com Anuário Estatístico Brasileiro da ANP (2021b), a hegemonia russa se mantém acerca da produção, ocupando o segundo lugar, com 638,5 bilhões de m³ (16,6% do total mundial), perdendo apenas para os Estados Unidos, que produziu em 2020 914,6 bilhões de m³ (23,7% do total mundial).

Em 2022, os Estados Unidos assumiram a liderança como maiores exportadores de GNL frente as demais nações. Com o desenvolvimento de uma nova estratégia de exportação para os países da União Europeia, utilizando o gás de xisto, os EUA conseguiram ganhar protagonismo no mercado internacional (DELGADO, 2020). Essas exportações para a Europa têm como uma de suas motivações a disputa inter-imperialista, objetivando reduzir o papel da Rússia como principal fornecedor de gás nos países do continente Central e Oriental (DELGADO, 2020).

O Brasil, mesmo com uma condição consolidada vinculada à presença das reservas provadas de gás, tem sua produção altamente voltada para suprir a demanda nacional. Os dados da ANP (2021b), referentes aos volumes de GNL em equivalente na forma gasosa e carregados em navios, revelam que as exportações não têm constância, abrangem apenas alguns países, sendo o principal a Argentina; representam pequenos volumes e, por isso, geram baixas receitas. Em 2019 e 2020, não houve qualquer atividade de exportação registrada, confirmando assim o foco no atendimento interno.

4.5 Indústria correlatas e de apoio

O monopólio das atividades petrolíferas, que teve como marco a fundação da Petrobras, caracterizou por muitos anos o caso brasileiro como pouco atrativo para a formação de fortes aglomerados produtivos (XAVIER JUNIOR, 2012). Em meados da década de 1990, o fim do controle exclusivo exercido pela Petrobras, com a promulgação da Emenda Constitucional número 9, a aprovação da Lei do Petróleo e a criação da ANP, deu início a uma nova era de grandes investimentos oriundos de empresas estrangeiras e de novas firmas constituídas no Brasil (XAVIER JUNIOR, 2012). O mercado de E&P, ao se tornar alvo também de grandes multinacionais, teve a consolidação da sua indústria correlata formada por companhias fornecedoras de tecnolo-

gia, matérias primas, equipamentos e serviços.

O estímulo para o progresso do sistema de apoio formado por entidades brasileiras veio especialmente a partir do lançamento da política de conteúdo local (CL). O conceito de CL, ou dos índices de nacionalização, deve ser compreendido como um instrumento que busca incrementar a participação e competitividade do segmento produtivo interno (AZEVEDO FILHO; PERESTRELO; MOLINA-PALMA, 2015). A implementação dessa política envolve a aplicação de requisitos contratuais para assegurar que as operadoras atinjam um certo nível de contratação de origem local, garantindo o aumento da participação nacional diante da expansão da demanda (AZEVEDO FILHO; PERESTRELO; MOLINA-PALMA, 2015; ROMANO SCHUTTE, 2021).

O processo gradual de abertura do mercado, bem como os fatores acima pontuados, fez com que grandes nomes do ramo petrolífero instituísem fábricas e sedes no Brasil. As empresas para-petroleiras se constituíram, então, como aliadas das operadoras, impulsionando a exploração dos recursos. A partir daí, a realidade brasileira passou a expor um parque extenso e diversificado de empresas fornecedoras de bens e serviços para o segmento de petróleo e gás, incluindo, por exemplo, desde o escopo de fornecimento das plataformas *offshore*, mapeamento geodésico, até as atividades de perfuração, instalação de dutos flexíveis, rígidos e equipamentos submarinos (ZAMITH, 1999; QUEIROZ; MENDES, BERGSTEN, 2020).

Segundo Morais (2011), outro fator que também estimulou a criação de um ambiente cooperativo entre os diversos atores do sistema foi a dificuldade encontrada na produção petrolífera em ambientes marítimos cada vez mais complexos, representados por maiores profundidades. As empresas para-petroleiras, universidades e órgão governamentais, viram a necessidade de construir uma rede de troca de conhecimento para obter meios de produção aprimorados e ampliar as oportunidades de negócio (MORAIS, 2011).

Apesar do crescimento constatado da cadeia de apoio em um recorte mais amplo do mercado, isto é, no mercado petrolífero como um todo, especificamente para o gás natural a forte participação da estatal em todas as fases — *upstream*, *midstream* e *downstream* — ainda deixa o mercado menos atrativo para a maior participação de empresas privadas. Contudo, a desverticalização esperada nos próximos anos deve atrair mais companhias, aumentando a atuação de outras empresas no segmento e redistribuindo atividades. Vale ressaltar que os reais interesses dos agentes privados devem ser avaliados futuramente com as repostas do mercado frente aos novos marcos regulatórios, de forma a entender se esse processo terá resultados na fortificação da indústria ou no seu enfraquecimento dado que, em geral, o maior foco desses atores costuma ser os lucros próprios e não o reinvestimento na economia nacional.

4.6 Acaso

4.6.1 A crise econômica brasileira de 2014 a 2017

A realidade brasileira da década de 2007 a 2016 foi marcada pela vivência de fases distintas do ciclo econômico, com um período inicial de forte expansão em contraste com uma profunda instabilidade encontrada a partir de 2014 (PESSANHA, 2017). O colapso político e socioeconômico é entendido como uma espécie de sequele da crise financeira mundial ocorrida entre 2008 e 2009, desencadeada inicialmente no mercado imobiliário americano, que nacionalmente foi respondida com medidas anticíclicas e desonerações fiscais adotadas pelo governo federal (PESSANHA, 2017).

O desequilíbrio da indústria de O&G também veio na forma de rebote, quando grandes nações consumidoras de petróleo, como China e Alemanha, tiveram suas economias desaceleradas e diminuíram sua demanda no mesmo passo em que a produção de óleo xisto nos EUA e Canadá crescia, fazendo com que esses países caminhassem mais próximos a autossuficiência (CERQUEIRA; SILVA, 2018). Ao encarar as oscilações era esperado que a OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) assumisse uma posição rumo a diminuição da produção, fato este que não ocorreu, causando um colapso na economia petrolífera, com um grande abismo instituído entre a Oferta x Demanda (NOGUEIRA, 2014, apud CERQUEIRA; SILVA, 2018).

Os dados do histórico da OECD (2023), consolidados na Figura 6, exibem que o preço médio do barril despencou de US\$ 98,99 em 2014 para US\$ 54,23 em 2017. Essa grande queda do valor do barril do petróleo no mercado internacional ocasionou o que Azevedo e Silva Neto (2020) denominam como o “contrachoque do petróleo de 2014”, que de acordo com os autores se caracterizou como uma das maiores crises da história. Posteriormente, observa-se um perfil similar entre 2019-2020 em função da pandemia de COVID-19 e um pico em 2022 decorrente da Guerra da Ucrânia x Rússia, fatos que serão explicitados nas seções subsequentes.

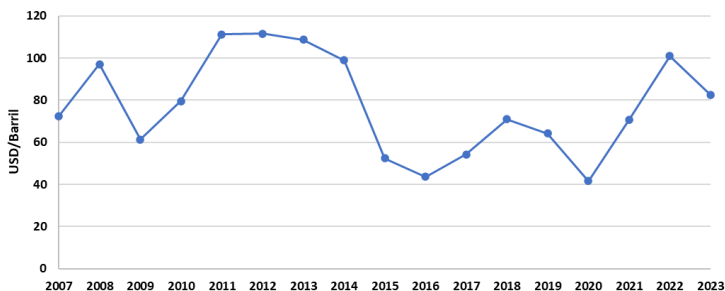


Figura 6 - Oscilação do preço do Brent no mercado internacional

Entretanto, o complexo quadro socioeconômico e político brasileiro pós 2014 foi consequência de um conjunto de causas que agiram concomitantes ao contrachoque: a investigação de esquemas de corrupção e lavagem de dinheiro, batizada de Operação Lava Jato; a instabilidade política no Brasil que culminou no *impeachment* da presidente Dilma Rousseff — eleita democraticamente — e os reflexos de todos esses impactos sobre a Petrobras, como a queda de suas ações no mercado e a desnacionalização/privatização que ganharam robustez sob o argumento da necessidade de saneamento das dívidas (PESSANHA, 2017; AZEVEDO; SILVA NETO, 2020). É estimado que estatal tenha perdido em 2015 US\$ 70 bilhões em valor de mercado (AZEVEDO; SILVA NETO, 2020).

Além disso, a política de “desinvestimentos” da Petrobras gerou um enfraquecimento da política de conteúdo local e declínio da indústria petrolífera brasileira, como um todo (AZEVEDO; SILVA NETO, 2020). As empresas estrangeiras adquiriram força reestabelecendo o controle da produção, principalmente no pré-sal, aumentando o domínio sobre a fabricação das máquinas e equipamentos, e, adquirindo maior participação na pesquisa científica e tecnológica (AZEVEDO; SILVA NETO, 2020). Com as postergações dos projetos, aumento do desemprego na indústria e redução dos investimentos, o desenvolvimento socioeconômico nacional e as receitas das regiões dependentes dos *royalties* foram diretamente afetados, em especial no estado do Rio de Janeiro (CERQUEIRA; SILVA, 2018; AZEVEDO; SILVA NETO, 2020).

Instituído o colapso mencionado acima, os preços do GN e GNL tiveram o mesmo comportamento de queda considerando a estreita vinculação com os ciclos de preços do petróleo, tanto em fases de crescimento quanto de depressão. No entanto, a situação pouco afetou o desenvolvimento dos projetos de GNL, que seguiram em expansão (PESSANHA, 2017). Pessanha (2017) afirma que outro impacto no mercado brasileiro de gás natural também foi representado pela mudança de posicionamento estratégico da Petrobras, uma vez que em 2016 a estatal acabou por colocar à venda três unidades de regaseificação junto a Usinas UTEs que utilizavam o gás como combustível para geração de energia elétrica, diminuindo a demanda nacional do insumo.

Quanto ao transporte, a malha brasileira era composta por: (i) Malha Sudeste, (ii) Malha Nordeste, (iii) Gasene e (iv) Gasbol. Os três primeiros gasodutos citados, que até 2016 eram, em sua totalidade, de domínio da estatal, foram vendidos para multinacionais com a participação minoritária da Petrobras em todos. De acordo com Pires (2019), as empresas que passaram a ser detentoras dos ativos, além de não terem a capacitação necessária para coordenação integrada da rede,

acabam sendo agentes que possuem inclinações econômicas para outros elos da cadeia de valor da indústria de GN, podendo negligenciar o foco no aumento da eficiência do sistema em benefício de maiores lucratividades e de outros interesses próprios.

A recuperação do Produto Interno Bruto (PIB) iniciada em 2017 não foi suficiente para mitigar as diversas perturbações do contracheque de 2014. Percebe-se, então, que até hoje os efeitos são sentidos e devem ser considerados, acima de tudo durante a revisão do arcabouço regulatório que vai nortear a formação do Novo Mercado de gás natural, a fim de evitar uma reforma incompleta e incapaz de se sustentar a médio prazo (PIRES, 2019).

4.6.2 Pandemia COVID-19

No final de 2019, a humanidade se viu frente ao que seria um dos maiores exemplos da ação do acaso: a pandemia de COVID-19. A ameaça invisível, que teve seu aparecimento inicial na China, espalhou-se rapidamente pela maioria dos países do mundo, forçando a adoção de medidas restritivas que repercutiram nos mercados, em especial o de energia (RODRIGUES, M., et al., 2021). Os impactos da pandemia, por sua vez, não se restringiram aos padrões de consumo e foram muito mais profundos, alterando consideravelmente as formas de relação humana, comunicação, hábitos e meios de trabalho.

Os bloqueios exigidos pelo governo, os fechamentos planejados de fábricas e as restrições de viagem para minimizar a propagação do vírus, afetaram em escala mundial toda a cadeia de suprimentos da indústria de óleo e gás (PIYA et al., 2022). Como resultado das contrações econômicas, mudanças significativas foram sentidas na oferta e demanda de combustível, particularmente petróleo bruto, e tiveram reflexo direto na queda abrupta dos preços, que passaram de cerca de US\$ 60/barril, no início de 2020, para aproximadamente US\$ 15/barril, comportamento evidenciado na Figura 7 desenvolvida a partir das informações da OECD (2023).

Em março daquele ano, o maior declive dos preços foi percebido por duas razões centrais, que evidenciaram a influência do jogo geopolítico em curso: (i) a guerra de preços entre Rússia e Arábia Saudita, com uma conseqüente inviabilidade de acordo para corte da produção; (ii) a Europa tornando-se o novo epicentro da pandemia. A tendência de recuperação foi lenta e começou a consolidar-se apenas em 2021, conforme o andamento das campanhas de vacinação.



Figura 7 - Evolução do preço do Brent durante o período pandêmico

No recorte brasileiro e validando o exposto por Rodrigues et al. (2021), a Tabela 2, com dados da ANP (2021b) e ANP (2023), mostra que, em 2020, a demanda da grande maioria dos derivados do petróleo diminuiu, tendo como uma de suas exceções a comercialização do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), conhecido popularmente como gás de cozinha. Esse ponto é justificado devido ao longo período de isolamento social adotado no Brasil, o que leva de maneira direta a um aumento do consumo doméstico. Em termos percentuais, no recorte do início da pandemia, as vendas de GLP tiveram um crescimento de 3,0% em 2020, totalizando um volume de 13,6 milhões de m³, que correspondeu a 12,1% do total de vendas de derivados no ano (ANP, 2021b). Em contrapartida ao consumo, no cenário brasileiro os níveis de produção do GLP mantiveram-se estáveis com um aumento de apenas 0,44%, o que é explicado pela redução do processamento de petróleo e da paralisação de algumas unidades de Craqueamento Catalítico Fluido (FCC), responsáveis pela conversão do óleo cru pesado para óleo leve, nas refinarias nacionais (EPE, 2020b).

Tabela 2 - Vendas nacionais dos principais derivados de petróleo pelas distribuidoras (mil m³)

Derivados de Petróleo	2019	2020	2021	2022	Comparativo 2019 - 2020	Comparativo 2021 - 2022
Gasolina C	38.165,0	35.823,6	39.317	43.039,3	-6,13%	9,47
Gasolina de aviação	43,1	39,0	48	45,4	-9,61%	-5,03
GLP	13.208,9	13.606,8	13.459	13.350,9	3,01%	-0,80
Óleo combustível	1.890,6	2.019,2	3.390	1.868,7	6,80%	-44,87
Óleo diesel	57.298,4	57.472,1	62.112	63.226,9	0,30%	1,80
Querosene de Aviação (QAV)	6.980,4	3.546,1	4.385	5.959,8	-49,20%	35,91

Tabela 2 - Vendas nacionais dos principais derivados de petróleo pelas distribuidoras (mil m³) (cont.)

Derivados de Petróleo	2019	2020	2021	2022	Comparativo 2019 - 2020	Comparativo 2021 - 2022
Querosene Iluminante	4,4	4,3	4	6,9	-2,45%	58,10
Total:	117.591	112.511	122.715	127.498	-4,32%	3,9%

Já durante 2021 e 2022, com a gradual diminuição das restrições, observou-se uma recuperação no consumo de combustíveis (Tabela 2). O relaxamento das medidas de confinamento levou a uma maior mobilidade da população, resultando no crescimento da demanda por transporte público e privado. Ademais, setores industriais e comerciais que foram temporariamente paralisados puderam retornar à suas operações, impulsionando a necessidade pelos derivados.

A retomada econômica dos países após o amadurecimento do controle da pandemia de COVID-19 mostra um provável impulsionamento da utilização do gás natural, uma vez que este possui uma condição mais estável de transporte e distribuição devido à sua natureza gasosa e à infraestrutura dedicada, como gasodutos e terminais de regaseificação, garantindo uma menor oscilação frente a possíveis choques de mercado. O petróleo, a título de exemplo, cujo transporte muitas vezes depende de navios-tanque, está mais suscetível a interrupções devido a questões geopolíticas, desastres naturais e até mesmo pandemias.

No Brasil, a pandemia comprovou o *gap* de infraestrutura de escoamento, processamento e transporte de gás natural e incentivou novos investimentos para subsidiar o aumento de produção desse combustível, principalmente para seu emprego em termelétricas.

4.6.3 Instabilidade política mundial: Guerra Ucrânia x Rússia

Segundo Ozili (2022), no início de 2022 existia uma onda de grande otimismo frente à estimativa de crescimento econômico pós-COVID, uma vez que muitos países intensificaram as tentativas de controle da inflação crescente. Considerando o relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (2021), havia uma previsão de 4,5% de crescimento econômico global para 2022 e 3,2% para 2023, conforme exposto na Figura 8. Esse cenário positivo teve sua estrutura estremecida com o anúncio da guerra entre Rússia e Ucrânia, que em razão da sua magnitude tinha força suficiente para abalar a geopolítica internacional. A invasão do território ucraniano levou a tensões entre o Ocidente e a Rússia e diminuiu a previsão de crescimento global considerando as incertezas sobre os efeitos do conflito na cadeia de suprimentos (OZILI, 2022).

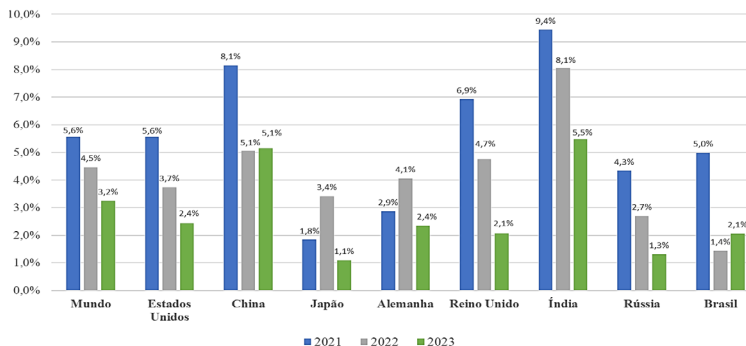


Figura 8 – Crescimento percentual do Produto Interno Bruto (PIB) em relação ao ano anterior

Devido a uma série de motivos geopolíticos, além da própria geografia e proximidade territorial, a riqueza da Rússia, em termos de reserva e produção do gás, fomentou uma situação de dependência da Europa em relação a esse país (RAFAEL, 2012). As amplas redes de gasodutos que conectam diretamente a Rússia aos mercados europeus, facilitando o comércio de gás, juntamente com a relação comercial estabelecida ao longo de décadas por meio de contratos de fornecimento de longo prazo, e, especialmente, a alta instabilidade do mercado de petróleo, que é diretamente influenciada por questões políticas globais, transformaram a dependência europeia em um ponto de vulnerabilidade prejudicando a redução da necessidade do gás russo.

Das respostas adotadas pelos países que se posicionaram contra a invasão, as mais duras vieram em forma de sanções financeiras sem precedentes. A diminuição das importações do petróleo Russo contribuiu para uma disparada no preço do barril (Figura 6) – que excedeu US\$100 – e para um aumento significativo no preço do gás natural (Figura 9), contribuindo para o crescimento descontrolado da inflação mundial (OZILI, 2022; TANK, 2022; OECD, 2022).

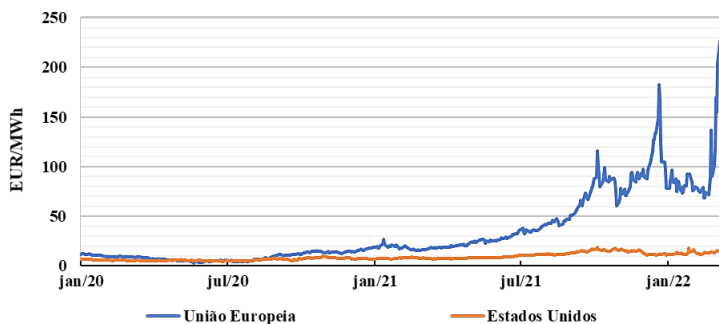


Figura 9 – Evolução do preço do gás natural

Em adição, a escalada dos preços ocasionou uma queda considerável da demanda em alguns setores da economia, como no caso das empresas fabricantes de fertilizantes, as quais, em razão da dependência do gás, tiveram que reduzir drasticamente sua produção (TANK, 2022). Estima-se também que as consequências desse choque vão acelerar uma disposição prévia de transição energética dos países europeus para uma produção mais limpa e neutra em carbono, o que poderá a longo prazo afetar o consumo dos combustíveis fósseis.

Os efeitos comerciais puderam ser sentidos na perspectiva brasileira. O Painel Dinâmico de Preços de Revenda e Distribuição de Combustíveis da ANP (2022c), expõem que as perturbações mercadológicas – frutos da guerra – incorreram em uma forte alta nos preços médios dos combustíveis advindos do petróleo. A Figura 9 exemplifica os impactos sentidos pelo mercado de gás natural a partir do aumento do preço do GLP.

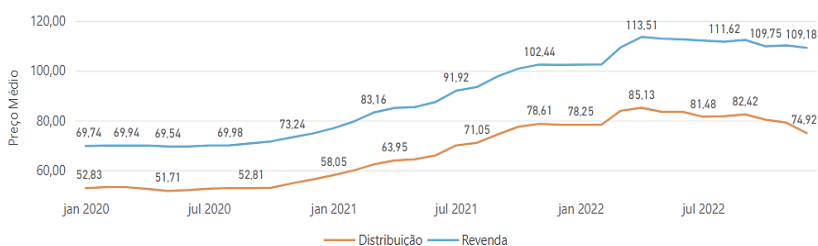


Figura 10 - Evolução dos preços médios de GLP (R\$/13 kg)

O preço de revenda teve uma crescente considerável, passando de 69,74 R\$/13kg, em janeiro de 2020, para 113,51 em Abril de 2022, retomando para um patamar de certa estabilidade apenas no último trimestre do ano. O Gás Natural Veicular (GNV) também sofreu impacto significativo, com um aumento de aproximadamente 47% no mesmo período em questão (ANP, 2022c). As consequências dessa disparada desenfreada dos preços podem influir negativamente, direta ou indiretamente, em fatores como distribuição de empregos, aumento da fome, gerando uma situação complexa no que tange a macroeconomia do país. Em contrapartida, a realidade brasileira encontra-se na contramão das necessidades tanto no âmbito nacional, quanto internacional, onde a demanda mundial por gás natural aumenta, visto que a Rússia deixa de ser uma opção de fornecimento, mas o Brasil, ainda que possua as reservas, não consegue aproveitar a abundância desse recurso por carência de infraestrutura.

Independente dos impactos sentidos no curto prazo, os reais desdobramentos do conflito na economia só poderão ser realmente medidos no futuro, dado que o protagonismo das duas nações envolvidas no suprimento de vários insumos indica um contexto difícil de ser controlado rapidamente, apontando para uma possível fonte de problemas inflacionários por um período muito maior do que a duração da própria guerra.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa aqui realizada foi dirigida, por meio da aplicação do Diamante de Porter, para compreender o contexto em que se estruturou o mercado brasileiro de gás natural e suas diferentes variáveis, além de investigar os novos horizontes oriundos das políticas de abertura do setor instituídas pelo Governo Federal nos últimos anos. A indústria foi, portanto, desmembrada em seis atributos que segundo Porter (1990) formam e influenciam a competitividade.

Em resumo, o mercado nacional de gás natural — sob a visão da ferramenta — apresenta condições de fatores favoráveis, com uma boa disponibilidade de recursos naturais, investimentos da ANP, Petrobras e governo em frentes como desenvolvimento de recursos humanos, tecnologia e inovação, porém possui também um entrave retratado pela falta de uma extensão de gasodutos capaz de suprir de forma efetiva o escoamento de gás, prejudicando a exploração de seu potencial real. A recorrência de crises hídricas tem sido um fator determinante para estimular o aumento do consumo do gás natural enquanto fonte para usinas termelétricas, a fim de aumentar a estabilidade do sistema elétrico. O conjunto estrutura, estratégia e rivalidade é marcado por uma presente participação da Petrobras desde a produção do GN até a distribuição final para o consumidor, em que a estatal ora exerce um poder monopolista ora monopsonista, trazendo cotornos interessantes ao cenário competitivo.

A observação das condições de demanda exprime um maior foco no atendimento da demanda interna com complementação via importação e baixos volumes de exportação de gás. A caracterização das indústrias correlatas e de apoio conta com uma cadeia de suprimentos estruturada e formada pelas parapetroleiras e estimulada pela política de conteúdo local. Quanto ao acaso, fortes influências são encontradas principalmente nos períodos mais recentes, com desdobramentos substanciais provenientes dos últimos acontecimentos incontroláveis, como contracheque de 2014, Pandemia de Covid-19 e Guerra Ucrânia x Rússia.

Sobre a esfera governamental, os achados corroboram com as críticas expostas por Moon et al. (1998) ao modelo de Porter, que define o Estado enquanto uma força exógena. No caso do mercado bra-

sileiro de O&G o governo é uma variável endógena, poderosa e que, de acordo com a ótica, pode influenciar negativa e/ou positivamente os padrões competitivos. Apesar da forte atuação ser, em alguns momentos prejudicial a abertura do mercado, como no caso do difícil acesso dos produtores privados à rede de dutos para transporte de gás natural, a indústria petrolífera no Brasil não teria se consolidado sem os financiamentos, investimentos diretos, subsídios e programas de desenvolvimento de mão de obra, fornecedores, centros de pesquisa, conforme bem colocado por Santos e Avellar (2016). Os autores também concluem que foi a atuação estatal a grande fomentadora do progresso do setor no decorrer do século XX e a responsável por moldar instituições que darão continuidade à evolução prevista no século XXI.

Este estudo estabelece possibilidades para trabalhos posteriores e complementares. Primeiramente, identifica-se uma abertura acerca da metodologia: adicionar novos atributos ao Diamante com o intuito de suprir críticas levantadas no meio acadêmico, gerando um *framework* mais completo e, principalmente, testar novas facetas da competitividade desse ramo, podendo levar a descobertas mais aprofundadas. Um segundo ponto seria a realização de novas análises conforme o amadurecimento do programa do Novo Mercado de Gás. A desverticalização é um processo de característica lenta, que terá repercussões no decorrer dos próximos anos. A maneira como a dinâmica competitiva se estruturará depois da conclusão desse processo é uma incógnita a ser acompanhada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. A. B.; POLETTE, M. Aspectos políticos, econômicos e institucionais da exploração e produção de petróleo e gás no Brasil. *América Latina en la Historia Económica*, v. 28, n. 2, p. 1–31, abr. 2021.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural. 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 29 jul. 2022.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/anuario-2021.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Painel Dinâmico de Produção de Petróleo e Gás Natural. 2022a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNzVmNzI1MzQtNTY1NC00ZGVhLTk5N2ItNzBkMDNhY2IxZTIxliwidCI6IjQ0OTImNGZmLTI0YTtytNGI0Mi1iN2VmLTeyNGFmY2FkYzcxMyJ9>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural – Circulação Externa. Rio de Janeiro: ANP, 31/03/2022b. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos/arquivos-reservas-nacionais-de-petroleo-e-gas-natural/boletim_reservas_2021.pdf. Acesso em: 05 dez. 2022.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Painel Dinâmico Preços de revenda e distribuição de combustíveis. 2022c. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiMGM-0NDhhMTUtMjQwZi00N2RILTk1M2UtYjcxZTIkNzM1YzE5liwidCI6IjQ0OTImNGZmLTI0YTtytNGI0Mi1iN2VmLTeyNGFmY2FkYzcxMyJ9>. Acesso em: 26 fev. 2024.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2023. Rio de Janeiro: ANP, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2023/anuario-2023.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2024.

ASHENFELTER, O. C.; FARBER, H.; RANSOM, M. R. Labor market monopsony. *Journal of Labor Economics*, v. 28, n. 2, p. 203-210, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1086/653654>.

AZEVEDO FILHO, E. T.; PERESTRELO, M.; MOLINA-PALMA, M. A. As descobertas do pré-sal e os desafios competitivos da indústria brasileira do setor de petróleo e gás: uma abordagem prospectiva. *Cidades, Comunidades e Territórios*, n. 31, 2015. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/cct/article/view/10017>. Acesso em: 05 dez. 2022.

AZEVEDO, L. C.; SILVA NETO, R. Instabilidade no cenário socioeconômico e político no Brasil a partir de 2014: contrachoque do petróleo, mudanças no marco regulatório e operação Lava Jato. *Cadernos do Desenvolvimento Fluminense*, n. 19, p. 11-42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12957/cdf.2020.59048>.

BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética. Resolução CNPE Nº 16, de 24 de junho de 2019. Estabelece diretrizes e aperfeiçoamentos de políticas energéticas voltadas à promoção da livre concorrência no mercado de gás natural, e dá outras providências. Brasília: CNPE, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/arquivos/2019/ResolucaoCNPE162019.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

CERQUEIRA, J.; SILVA, F. S. Impactos da crise do petróleo na economia brasileira. 2018. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/08/impactos-da-crise-do-petroleo-na-economia-brasileira.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

CHAGAS, D. L. et al. The integration of corporate and operations Strategies: an analysis of scientific publications using bibliometrics. Brazilian Journal of Operations & Production Management, v. 11, n. 1, p. 7-25, 2013. Disponível em: <https://bjopm.org.br/bjopm/article/view/V11N1A1>. Acesso em: 05 dez. 2022.

DELGADO, P. J. G. Las importaciones de gas natural licuado (GNL) a España y al conjunto de la Unión Europea desde Estados Unidos: del debate sobre el fracking y la geopolítica de los flujos de suministros energéticos. Finisterra, Lisboa, v. 55, n. 113, p. 135-155, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18055/Finis16614>.

DINIZ, J. A. O. et al. Crise hídrica no Brasil: o uso das águas subterrâneas como reforço no abastecimento público. CPRM, 2021.

DOS SANTOS, R. J.; DE AVELLAR, A. P. M. Da criação do Conselho Nacional do Petróleo à política de conteúdo local: a trajetória histórica das políticas para a indústria do petróleo e gás natural no Brasil. História Econômica & História de Empresas, v. 19, n. 1, 2016.

EIA, U.S. Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2021. Washington, DC, 2021.

EIA, U.S. Energy Information Administration. Natural gas explained: Natural gas imports and exports. Washington: EIA, 2022. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/imports-and-exports.php#:~:text=In%202021%2C%20total%20annual%20U.S.%20natural%20gas%20exports%20were%206.65,of%20natural%20gas%20since%202017.&text=About%2046%25%20of%20the%20total,and%2030%25%20went%20to%20Canada>. Acesso em: 05 dez. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. PIG Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte. Rio de Janeiro: EPE, outubro de 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-415/PIG%20-%20Plano%20Indicativo%20de%20Gasodutos%20de%20Transporte_EPE2019.pdf. Acesso em: 05 dez. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica - Demanda de Gás Natural nos Mercados Nacional e Internacional: Horizonte 2020-2030. Rio de Janeiro: EPE, dezembro de 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-531/EPE,%202020%20-%20Nota%20T%C3%A9cnica%20Demanda%20de%20G%C3%A1s%20Natural%20vFinal.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica - Impactos da pandemia de Covid-19 no mercado brasileiro de combustíveis. Rio de Janeiro: EPE, junho de 2020b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-485/NT-DPG-SDB-2020-02_Impactos_da_COVID-19_no_mercado_brasileiro_de_combustiveis.pdf. Acesso em: 05 dez. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Indicativo de Terminais de GNL: PITER 2021. Rio de Janeiro: EPE, julho de 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-620/PITER%202021.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: ano base 2021. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario-livro/>. Acesso em: 05 dez. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 Gás Natural. Rio de Janeiro: EPE, março de 2023 . Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Ga%CC%81s%20Natural%20-%20PDE%202032%20-%20rev1.pdf> Acesso em: 28 fev. 2024.

FIOREZE, M. et al. Gás natural: potencialidades de utilização no Brasil. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 10, n. 10, p. 2251-2265, 2013.

GOMES, I. Brazil: Country of the future or has its time come for natural gas?. OIES Paper: NG 88, 2014. DOI: <https://doi.org/10.26889/9781784670047>.

MCTIC. Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Petróleo e Gás Natural 2018 - 2022. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2018. Disponível em: <https://www.inova.rs.gov.br/upload/arquivos/202006/16181859-plano-de-ciencia-tecnologia-e-inovacao-para-petroleo-gas-natural.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

MENDES, A. P. A. et al. Mercado de gás natural no Brasil: desafios para novo ciclo de investimentos. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 42, p. 427-470, set. 2015. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9374>. Acesso em: 05 dez. 2022.

MOON, H. Chang et al. A generalized double diamond approach to the global competitiveness of Korea and Singapore. *International business review*, v. 7, n. 2, p. 135-150, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-5931\(98\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S0969-5931(98)00002-X).

MORAIS, J. M. A Nova Lei do Gás e a desconcentração no mercado de gás natural no Brasil. *Radar: Tecnologia, Produção e Comércio Exterior*. N. 68, p. 7-11, 2021. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11035/1/radar_68_nova_lei_do_g%C3%A1s.pdf. Acesso em: 05 dez. 2022.

MORAIS, J. M. Determinantes das tecnologias de produção de petróleo no mar. *Radar: tecnologia, produção e comércio exterior*, Brasília, n.17, p. 27-33, 2011.

NAEGELE, L. L. et al. Concorrência e nível de concentração na indústria do gás natural no Brasil: Uma perspectiva dos produtores privados. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 39, Santos, 2019. Anais [...]. São Paulo: ENGEP, 2019. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_000_1663_37879.pdf. Acesso em: 05 dez. 2022.

OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development. *Economic Outlook No 110*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1787/39740bed-en>.

OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development. *OECD Economic Outlook, Interim Report March 2022: Economic and Social Impacts and Policy Implications of the War in Ukraine*. OECD Publishing, Paris, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1787/4181d61b-en>.

OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development. *Economic Outlook No 114*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1787/39740bed-en>.

OZILI, P. K. Global economic consequence of Russian invasion of Ukraine. Available at SSRN's eLibrary, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4064770>.

PERLOTTI, E. A. et al. Concentração espacial da indústria de São Paulo: evidências sobre o papel da disponibilidade de gás natural. Estudos avançados, v. 30, p. 143-164, 2016. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/119120>. Acesso em: 05 dez. 2022.

PESSANHA, R. M. A relação transescalar e multidimensional petróleo-porto como produtora de novas territorialidades. 2017. Tese (Doutorado em Políticas Públicas e Formação Humana) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UERJ, 2017.

PIRES, A. Reforma do setor de gás natural no Brasil. Caderno Opinião FGV: O novo mercado de gás natural: opiniões de especialistas, perspectivas e desafios para o Brasil. Rio de Janeiro, RJ, p. 8-11, 2019. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_opinio_-_agosto_-_web_versao_final.pdf. Acesso em: 05 dez. 2022.

PIYA, S. et al. Analysis of supply chain resilience drivers in oil and gas industries during the COVID-19 pandemic using an integrated approach. Applied Soft Computing, v. 121, p. 108756, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108756>.

PORTER, M. E. A Vantagem Competitiva das Nações. 17ª tiragem. Rio de Janeiro: Campus, 1990.

QUEIROZ, M. M.; MENDES, A. B. Critical Success Factors of the Brazilian Offshore Support Vessel Industry: A Flexible Systems Approach. Global Journal of Flexible Systems Management, v. 21, n. 1, p. 33-48, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40171-020-00239-5>. Acesso em: 05 dez. 2022.

RAFAEL, J. M. C. Estratégia energética da Rússia: ocaso do gás natural nas relações com a Europa. 2012. Dissertação (Mestrado em Estratégia) - Universidade técnica de Lisboa, Instituto Superior de Ciências Sociais e Políticas. Lisboa, 2012. Disponível em: <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/4547/3/Estrat%C3%A9gia%20energ%C3%A9tica%20da%20R%C3%A9ssia.%20O%20caso%20do%20g%C3%A1s%20natural%20nas%20rela%C3%A7%C3%B5es%20com%20a%20Europa.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

RODRIGUES, A. H. Desverticalização da indústria de gás natural no Brasil: uma análise das propostas contidas na Nova Lei do Gás. Revista Debates em Administração Pública, v. 2, n. 7, p. 1-30, 2021. Disponível em: <https://www.portaldeperiodicos.idp.edu.br/redap/article/view/5924>. Acesso em: 05 dez. 2022.

RODRIGUES, M. V. G. et al. Prospective scenarios analysis Impact on demand for oil and its derivatives after the COVID-19 pandemic. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, v. 18, n. 2, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2021.039>.

ROMANO SCHUTTE, G. A economia política do conteúdo local no setor petrolífero de Lula a Temer. *Economia e Sociedade*, v. 30, p. 115-140, 2021. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/ecos/article/view/8665611>. Acesso em: 5 dez. 2022.

SANTOS, C. T. O. et al. Uso do gás natural em usinas termelétricas no Brasil. *Anais III CONEPETRO*. Campina Grande: Realize Editora, 2018. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/44140>. Acesso em: 05 dez. 2022.

SCHNEIDER, A. B. et al. Estratégia competitiva: Michael Porter 30 anos depois. *Revista de Administração da UFSM*, Santa Maria, v. 2, n. 2, p. 298-326, 2009. DOI: <https://doi.org/10.5902/198346591558>.

SMIT, A. J. The competitive advantage of nations: is Porter's Diamond Framework a new theory that explains the international competitiveness of countries?. *Southern African business review*, v. 14, n. 1, p. 105-130, 2010. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/sabr/article/view/76358>. Acesso em: 05 dez. 2022.

SOUZA, L. S.; SGARBI, G. N. C. O Pré-Sal Brasileiro e a Evolução do Modelo Regulatório de Exploração e Produção de Hidrocarbonetos no Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 3, p. 354-373, 2020. DOI: https://doi.org/10.11137/2020_3_354_373.

TANK, A. Economic Impact of Russia – Ukraine War. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, v. 11, n. 4, p. 3345-3347, abr. 2022. Disponível em: http://www.ijirset.com/upload/2022/april/25_Economic_NC.pdf. Acesso em: 05 dez. 2022.

XAVIER JUNIOR, C. E. R. Políticas de conteúdo local no setor petrolífero: O caso brasileiro a experiência internacional. *Texto para Discussão (IPEA)*, Brasília, n. 1775, 2021. Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/91296/1/728822512.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ZABANBARK, A.; LOBKOVSKY, L. I. Role of Brazil's Continental Slopes in Being Provided with Hydrocarbon Resources. *Oceanology*, v. 60, n. 2, p. 259-266, 2020. DOI: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2020Ocg...60..259Z/doi:10.1134/S0001437020020125.

ZAMITH, M. R. M. A. A indústria para-petroleira nacional e o seu papel na competitividade do "diamante petroleiro" brasileiro. 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ZAMITH, M. R. M. A.; SANTOS, E. M. Diamante petroleiro brasileiro em perspectiva. In :CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 3, São Paulo, 1998. Anais [...]. São Paulo, SEESP/SBPE/USP/UNICAMP/COPEE-UFRJ, 1998 p105-110. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/1998/trabalho/odiama~1.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO BIFACIAL EM USINAS FOTOVOLTAICAS NO NORDESTE DO BRASIL

Thais Prates¹
Conrado Augustus de Melo¹

¹*Universidade Federal do ABC*

DOI: 10.47168/rbe.v30i1.851

RESUMO

Módulos bifaciais e mecanismos de rastreamento solar vem sendo amplamente empregados em usinas fotovoltaicas para melhorar seu desempenho, no entanto, a falta de estudos relativos à sensibilidade destas tecnologias se configura como uma barreira para sua expansão no país. Neste estudo foi investigado o desempenho de uma usina fotovoltaica de 30 MW a ser instalada no estado da Bahia, Brasil. Foram analisados cenários com instalações monofaciais, bifaciais, de inclinação fixa e com rastreadores. Através de simulações computacionais empregando o software SAM, foram calculados os ganhos devido ao rastreador, irradiância solar traseira e bifacialidade. O ganho médio anual do rastreador foi de 9,5% para sistemas monofaciais e 8,7% para sistemas bifaciais. O ganho médio anual bifacial foi de 6,3% para sistemas de inclinação fixa e 5,5% para sistemas móveis. A análise de sensibilidade demonstrou que, para a região o efeito do albedo tem maior influência no desempenho do sistema do que a altura de instalação, apesar da elevação dos módulos também refletir uma melhora no rendimento. Para maximizar o desempenho bifacial das usinas é sugerida a modificação da refletividade do solo e a elevação dos módulos. O revestimento do solo da usina com concreto e a elevação da altura de instalação dos módulos para 2,5 metros maximiza os ganhos anuais bifaciais de 6,3% para 20% na planta de inclinação fixa e de 5,5% para 17,4% na planta móvel. Pintar o concreto na cor branco e elevar a altura de instalação para 2,75 metros, maximiza ainda mais o rendimento da usina, alcançando ganhos de 24% na planta de inclinação fixa e 21% na planta móvel.

Palavras-chave: Usinas fotovoltaica; Módulos bifaciais; Rastreamento solar; Albedo; Altura de instalação.

ABSTRACT

Bifacial modules and solar tracking mechanisms have been widely used in photovoltaic plants to improve their performance, but the lack of studies on the sensitivity of these technologies is a barrier to their expansion in the country. This study investigated the performance of a 30 MW photovoltaic plant to be installed in the state of BA, Brazil. Scenarios with monofacial, bifacial, fixed tilt and tracker installations were analyzed. Through computer simulations using SAM software, the gains due to the tracker, rear irradiance and bifaciality were calculated. The average annual gain due to the tracker was 9.5% for monofacial systems and 8.7% for bifacial systems. The average annual bifacial gain was 6.3% for fixed-tilt systems and 5.5% for mobile systems. The sensitivity analysis showed that, for the region, the effect of albedo has a greater influence on system performance than installation height, although raising the modules also reflects an improvement in performance. In order to maximize the bifacial performance of the plants, it is suggested that the reflectivity of the soil and the elevation of the modules be modified. Covering the floor of the plant with concrete and raising the installation height of the modules to 2.5 metres would maximize the annual bifacial gains from 6.3% to 20% in the fixed tilt plant and from 5.5% to 17.4% in the mobile plant. Painting the concrete white and raising the installation height to 2.75 meters would maximize the gains to 24% in the fixed tilt plant and 21% in the mobile plant.

Keywords: Photovoltaic plants; Bifacial modules; Solar tracking; Albedo; Installation height.

1. INTRODUÇÃO

A indústria fotovoltaica passou por uma mudança radical na última década, elevando consideravelmente sua capacidade instalada no mundo. A geração desta fonte de energia atingiu a marca de 1.300 TWh produzidos em 2022 e demonstrou o maior crescimento absoluto de geração dentre todas as tecnologias renováveis no mundo, superando a geração eólica pela primeira vez na história (IEA, 2023).

No Brasil, o incremento desta fonte foi por muito tempo algo distante da realidade nacional devido seu alto custo de investimento e baixa produtividade quando comparada a outras fontes renováveis de energia comumente empregadas no país como a hidroeletricidade. No entanto, graças à progressiva redução nos custos da tecnologia, aliada a criação de políticas públicas de incentivo, a energia solar fotovoltaica vem se tornando cada vez mais competitiva dentro do panorama energético brasileiro. Atualmente o país possui 24 GW instalados de energia fotovoltaica, que foram responsáveis por injetar na rede cerca de 14 TWh de energia elétrica em 2022 (ONS, 2023).

A conversão de energia nos sistemas fotovoltaicos é influenciada pelas condições climáticas e estruturais dos locais em que são instalados. Atualmente, a maior parte dos sistemas emprega módulos fotovoltaicos monofaciais montados em estruturas fixas inclinadas. No entanto, módulos bifaciais associados às estruturas de rastreamento solar (*trackers*) são a nova aposta do setor fotovoltaico (CHEN et al., 2021). A tecnologia bifacial é capaz de converter energia em sua face frontal e traseira captando a irradiância solar refletida pelo solo e o rastreamento solar é uma maneira eficaz de aumentar a quantidade de irradiância interceptada pelos módulos fotovoltaicos.

Módulos bifaciais aumentam o rendimento dos sistemas devido à potência adicional de energia de saída proveniente da captação da parcela de irradiância solar traseira. A fração adicional de energia produzida por estes sistemas é expresso como ganho bifacial (KOPECEK & LIBAL, 2018). Este ganho é sensível à fatores como o albedo da superfície e a altura de instalação dos módulos. Sun et al. (2018) verificaram que em condições de albedo de até 25%, o ganho bifacial em sistemas montados no solo é inferior a 10% em todo o mundo. No entanto, aumentar o valor do albedo e elevar a altura dos módulos tem o poder de maximizar o ganho bifacial. Ganesan et al. (2023) observaram que superfícies brancas e de alumínio, que possuem maior refletividade, geram um maior ganho bifacial e Wang et al. (2019) verificaram que elevar a altura instalação dos módulos bifaciais tem o poder de diminuir o auto-sombreamento e elevar a captação de irradiância solar traseira.

Os *trackers* são dispositivos responsáveis por manter a superfície dos módulos fotovoltaicos aproximadamente perpendicular à irradiância solar direta na maior parte do tempo, capturando assim uma quantidade mais significativa de irradiância. Sidek et al. (2017) analisaram os ganhos obtidos em um sistema fotovoltaico com rastreador de eixo duplo em comparação com um sistema fixo e observaram ganhos de geração de 26,9% e 12,8% em dias ensolarados e nublados, respectivamente. Hammoui et al. (2018) também verificaram o rendimento de um sistema com rastreamento em eixo duplo e registraram um ganho médio de geração 36,26%.

No Brasil, Melo et al. (2022) estimaram ganhos bifaciais, ganhos de rastreador e ganhos de rastreador bifacial para diversas localidades em condições padrão de albedo e altura e observaram que o ganho bifacial varia regionalmente de 3,78% a 8,16%, o ganho do rastreador varia de 13,40% a 18,20% e o ganho total com a aplicação de módulos bifaciais e rastreadores varia entre 19,39% e 27,39%. Dias & Rampinelli (2023) modelaram e simularam o desempenho de uma planta bifacial em diferentes tipos de solo e verificaram um ganho bifacial de 10,72% para brita branca, 9,60% para areia clara e 2,79% para brita preta.

Considerando que a associação dessas tecnologias pode aumentar a viabilidade técnica das usinas fotovoltaicas (RODRÍGUEZ-GALLEGOS, 2021), módulos bifaciais e estruturas de rastreamento solar se tornaram um padrão em grandes empreendimentos fotovoltaicos. No Brasil, segundo a empresa Greener (2021) todos os contratos mapeados em 2020 já utilizam ou irão utilizar esta tecnologia de módulos em suas usinas, assim como as estruturas de rastreamento solar em um eixo, que já estavam presentes em 95% dos empreendimentos brasileiros contratados no Leilão de Energia Nova de 2019 (MME/EPE, 2019).

Diversos fatores podem afetar o desempenho de um módulo bifacial, como sua inclinação, altura de instalação, albedo da superfície do solo, estrutura entre outros. A falta de estudos relativos à influência desses fatores na produtividade das usinas fotovoltaicas é uma barreira significativa para a expansão desta tecnologia. Diante disto, buscando promover ainda mais essa fonte de energia no país, a pesquisa desenvolvida ao longo deste trabalho tem como objetivo investigar, através de simulações computacionais o ganho do rastreador, o ganho de irradiância solar traseira e o ganho bifacial na região nordeste do Brasil, determinar a influência do albedo e da altura de instalação dos módulos no desempenho bifacial, e sugerir propostas para otimizar o rendimento do módulo bifacial.

2. METODOLOGIA

O procedimento metodológico empregado neste estudo está apresentado na Figura 1. O desempenho dos módulos foi investigado através de simulações computacionais. Para verificar o rendimento e determinar a sensibilidade do desempenho bifacial em condições específicas locais projetou-se uma Usina Fotovoltaica de 30 MW. Para maximizar o rendimento das plantas simuladas, a região indicada para as simulações foi o Nordeste, região brasileira com a maior irradiação solar global horizontal. O município escolhido foi à cidade de Bom Jesus da Lapa (13°14'2" S e 43°24'53" O), Bahia, estado líder em capacidade instalada de geração centralizada. Os dados meteorológicos foram obtidos em formato TMY extraídos do banco de dados online Climate One Building derivado do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

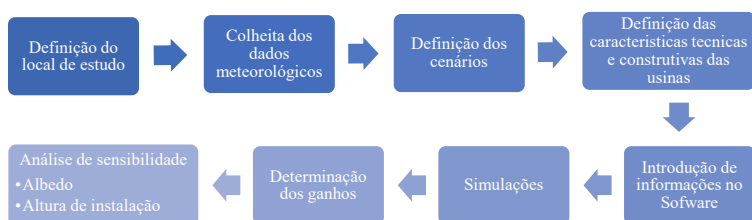


Figura 1 - Fluxograma das etapas metodológicas

As simulações consideraram quatro cenários específicos: instalação fotovoltaica monofacial com inclinação fixa (cenário 1), instalação monofacial com rastreador (cenário 2), instalação bifacial com inclinação fixa (cenário 3) e instalação bifacial com rastreador (cenário 4). O *software* empregado nas simulações foi o *System Advisor Model* (SAM) versão 2020.11.29, ferramenta gratuita desenvolvida pelo Laboratório de Energia Renovável dos Estados Unidos (NREL).

Para uma avaliação apropriada dos diferentes cenários, os módulos considerados nas simulações são de mesma potência e fabricante, se diferindo apenas na tecnologia de célula: monofacial e bifacial. Nos cenários 1 e 2, correspondentes às usinas monofaciais, empregaram-se módulos do modelo LONGi LR4-72HIH-445M com 445W de potência e eficiência nominal de 21,09%. Nos cenários 3 e 4, correspondentes às usinas bifaciais, empregaram-se o modelo LONGi LR4-72HBD-445M com 445W de potência e eficiência nominal de 20,50%.

Para os inversores utilizou-se o modelo SMA *América Sunny Central* SC-2200-US tipo string com potência de 2.079 kW. Em todos os cenários, a quantidade de módulos, inversores e demais especificações utilizadas foi a mesma, pois o objetivo foi analisar o ganho na geração de energia ao utilizar as diferentes tecnologias ou a combinação de ambas. As informações técnicas dos equipamentos utilizados nas simulações são provenientes do banco de dados do *software*.

As simulações consideraram um arranjo com 67.428 módulos, distribuídos em 36 fileiras com 1.873 módulos e 13 inversores. O ângulo de inclinação utilizado nos cenários fixos 1 e 3 foi igual ao da latitude local (13°), conforme o indicado pelo Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). Nos cenários móveis 2 e 4, foi adotado na opção de rastreamento em um eixo com ângulo de inclinação nulo, visto que sistemas com tecnologia de eixo móvel são configurados com um ângulo 0° de inclinação. No hemisfério Sul a orientação ideal é o Norte, assim, o ângulo de azimute utilizado para todos os cenários foi igual a 0° e para a taxa de cobertura de solo utili-

zou-se o valor de 3% em todas as simulações, conforme o recomendado pelo SAM.

Mediante o emprego de módulos bifaciais foi selecionado o modelo de auto sombreamento padrão. Devido às diferentes dimensões dos módulos, nos cenários monofaciais o espaçamento entre linhas recomendado pelo *software* para evitar o sombreamento na maior parte do dia foi de 7,23 metros. Já para os cenários bifaciais o espaçamento ideal foi de 7,03 metros. Sombreamentos externos foram desconsiderados em função de suas baixas probabilidades de ocorrência no local de instalação de plantas fotovoltaicas. Para o cálculo da irradiância solar frontal e traseira, os módulos foram configurados na geometria Retrato. Em relação às perdas utilizaram-se os valores recomendados pelo SAM.

Após introduzir no *software* todas as escolhas descritas acima foram realizadas as simulações. Primeiro realizou-se quatro simulações referentes a cada cenário. Nestas, o principal objetivo foi analisar a produtividade e o ganho na geração de energia ao utilizar a tecnologia bifacial e a tecnologia de rastreamento, desta forma foram considerados valores padrão de albedo (20%) e altura de instalação dos módulos (1 metro). Destas simulações extraíram-se os valores da geração anual de energia e calcularam-se os ganhos. Todos esses ganhos foram avaliados para determinar o desempenho da usina.

O ganho do rastreador (G_R) foi analisado para usinas monofaciais e bifaciais, conforme a Equação 1, onde $E_{cenário\ móvel}$ corresponde à energia total convertida nos cenários com rastreamento e $E_{cenário\ fixo}$ nos cenários fixos inclinados. Este ganho representa a fração adicional de energia que é convertida nas usinas com rastreamento quando comparadas a usinas fixas inclinadas (SHOUKRY et al., 2016).

$$G_R = \frac{E_{cenário\ móvel} - E_{cenário\ fixo}}{E_{cenário\ móvel}} \times 100\% \quad (1)$$

O ganho de irradiância solar traseira (G_{IT}) é simplesmente o ganho óptico do módulo e corresponde à razão entre a irradiância traseira ($G_{traseira}$) e frontal ($G_{frontal}$). A contribuição da irradiância solar captada pela face traseira dos módulos bifaciais é limitada pelo fator de bifacialidade do módulo (bf) que atenua este ganho conforme a Equação 2 (STEIN et al., 2021). De acordo com a ficha técnica do módulo selecionado, seu fator de bifacialidade é de 70%.

$$G_{IT} = \frac{G_{traseira} \cdot bf}{G_{frontal}} \times 100\% \quad (2)$$

Comparando os sistemas monofaciais e bifaciais obtém-se o ganho bifacial (G_B), calculado a partir da saída de energia total dos cenários monofaciais ($E_{\text{cenário mono}}$) e cenários bifaciais ($E_{\text{cenário bifacial}}$) conforme a Equação 3 (SHOUKRY et al., 2016).

$$G_B = \frac{E_{\text{cenário bifacial}} - E_{\text{cenário mono}}}{E_{\text{cenário bifacial}}} \times 100\% \quad (3)$$

Também foi calculado o ganho do rastreador bifacial (G_{RB}) que diz respeito à otimização do sistema quando módulos bifaciais e rastreadores são combinados. Esse ganho foi obtido através da comparação entre os cenários 1 e 4 e representa a fração adicional de energia que é convertida nas usinas bifaciais com seguimento em comparação a usinas monofaciais fixas inclinadas conforme apresentado na Equação 4 (SHOUKRY et al., 2016).

$$G_{RB} = \frac{E_{\text{cenário 4}} - E_{\text{cenário 1}}}{E_{\text{cenário 4}}} \times 100\% \quad (4)$$

Os módulos bifaciais interceptam uma parcela significativa de irradiância solar em sua face traseira proveniente da parcela de radiação refletida pelo solo e de radiação difusa. A radiação refletida pelo solo depende fortemente da refletividade ou albedo da superfície. O albedo varia significativamente entre dias ensolarados e nublados. Superfícies brancas possuem maior albedo pois refletem parcelas maiores de irradiância solar por outro superfícies escuras refletem parcelas significativamente menores. Em condições de alto albedo a parcela de irradiância refletida recebida pela parte traseira do módulo aumenta, assim o ganho de irradiância traseira e o ganho bifacial variam conforme este parâmetro.

Outro fator que pode impactar a irradiância solar refletida pelo solo é a altura de instalação dos módulos. Quanto menor a altura do módulo, menor será a reflexão da radiação sobre a superfície, e menor será a irradiância recebida pela parte traseira do módulo. Sistemas instalados alturas maiores recebem mais irradiância refletida e tendem a operar em temperaturas mais baixas devido a melhor circulação de ar entre os módulos (WANG et al., 2019). Assim, uma análise de sensibilidade foi realizada para investigar os efeitos do albedo e da altura de instalação no desempenho das usinas bifaciais. As superfícies e os valores de albedo considerados nessas simulações estão apresentados na Tabela 1 (SOLARWORLD, 2017; MARKVART & CASTANER, 2003). Alturas entre 1 e 1,5 m foram consideradas ótimas (SOLARWORLD,

2017), contudo, para analisar de forma gradativa a melhoria atingida pela elevação dos módulos, e verificar qual altura é indicada para as plantas, as alturas consideradas neste estudo estão compreendidas entre 0,75 e 5 metros.

Tabela 1 - Valores de albedo para algumas superfícies

Superfície	Albedo
Gramma Verde	23%
Concreto novo	55%
Concreto pintado de branco	70%
Cascalho branco	27%
Solo arenoso	30%

Para melhor compreensão e avaliação, os resultados foram analisados estatisticamente. As abordagens estatísticas utilizadas neste artigo foram os coeficientes de correlação de Pearson e o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, chamado de coeficiente de determinação. A correlação de Pearson indica a relação estatística entre duas variáveis. Quanto mais próximo de 1 (positivo), mais forte a relação proporcional, e quanto mais próximo de -1 (negativo), mais forte a relação inversa. Se estiver próximo de 0 não existe relação entre as variáveis. O coeficiente de determinação indica a proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra, variando entre 0 e 1 (PESTANA & VELOSA, 2010).

3. RESULTADOS

O rendimento energético dos cenários foi simulado ao longo de um ano e os resultados das simulações de desempenho estão aqui apresentadas. A Figura 2 corresponde a conversão mensal de energia para cada um dos cenários. Nesta, pode-se observar que, como o esperado, independentemente do mês, o sistema monofacial fixo inclinado (Cenário 1) tem menor geração de eletricidade, enquanto o sistema bifacial com rastreamento (Cenário 4) alcança a maior geração. Além disso, o sistema bifacial fixo inclinado (Cenário 3) supera o sistema monofacial fixo inclinado (Cenário 1) devido sua capacidade de captação de irradiância também em sua face traseira. Contudo, este sistema fixo bifacial converteu menos eletricidade que o sistema monofacial com sistema de rastreamento.

No geral, a planta fotovoltaica monofacial com rastreamento (Cenário 1) superou o rendimento da planta fotovoltaica bifacial de inclinação fixa (Cenário 3) em aproximadamente 3,4% e a associação da tecnologia bifacial com o rastreamento (Cenário 4) superou em 14,4%

o rendimento observado na planta fotovoltaica monofacial de inclinação fixa (Cenário 1). Os ganhos resultantes da associação entre módulos bifaciais e dispositivos de rastreamento, ganho do rastreador bifacial, variaram entre 7 e 22%, com uma média anual de 14%. A associação das tecnologias é de fato a configuração mais produtiva para essa fonte de energia, no entanto, de maneira individual e sob essas condições de albedo e altura, a produção de energia no sistema monofacial móvel supera a produção no sistema bifacial fixo na maior parte do ano, exceto entre abril e julho, período em que este ganho do rastreador é reduzido.

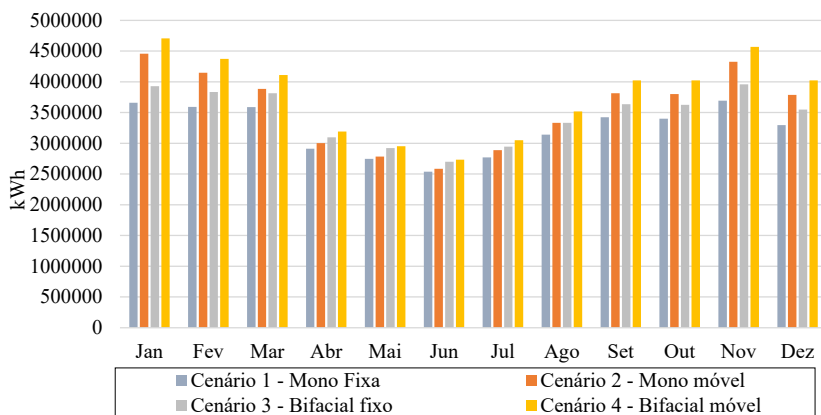


Figura 2 - Geração mensal nos cenários simulados

3.1 Análise dos ganhos

A Figura 3 apresenta os ganhos de rastreamento obtidos frente a comparação entre as plantas fixas e as plantas móveis e relaciona-os com irradiância direta mensal do local de estudo. Conforme o esperado, os sistemas com rastreamento monofacial e bifacial (Cenário 2 e 4) superaram seus equivalentes sem rastreadores (Cenário 1 e 3) durante todo o período simulado. Na planta monofacial com rastreamento foram observados ganhos mensais no rendimento da usina (G_{Rmono}) entre 1,00 e 18%, com um ganho médio anual de 9,5% em relação ao sistema monofacial fixo inclinado. Na planta bifacial com rastreamento os ganhos mensais ($G_{Rbifacial}$) variaram entre 1 e 17%, com uma média anual de 8,7% em relação ao sistema bifacial fixo.

Os ganhos do rastreador são diretamente proporcionais às taxas de irradiância direta por isso são maiores entre a primavera e o verão e menores entre o outono e inverno. No período compreendido de setembro a fevereiro (primavera/verão), os dias são mais longos e possuem mais horas de sol pleno, enquanto, no período compreendido

entre março e agosto (outono/inverno), os dias são mais curtos e apresentam incidência solar total reduzida. Isso acontece porque o estado da Bahia situa-se em uma região de relativamente baixa latitude, fator que diminui a variação da duração dos dias entre as estações.

Também pode-se verificar que o ganho do rastreamento é maior em sistemas monofaciais. Este ganho compara conversão entre um sistema fixo e outro móvel, para módulos monofaciais e bifaciais. O menor ganho de rastreamento observado em sistemas bifaciais se deve a maior produtividade do sistema bifacial fixo em relação ao monofacial de inclinação fixa que não emprega nenhuma tecnologia para otimizar sua produção. Assim, na comparação entre os sistemas monofaciais, a otimização atingida com o uso do rastreamento é maior que nos sistemas bifaciais, que já utilizam a tecnologia bifacial para otimização do sistema.

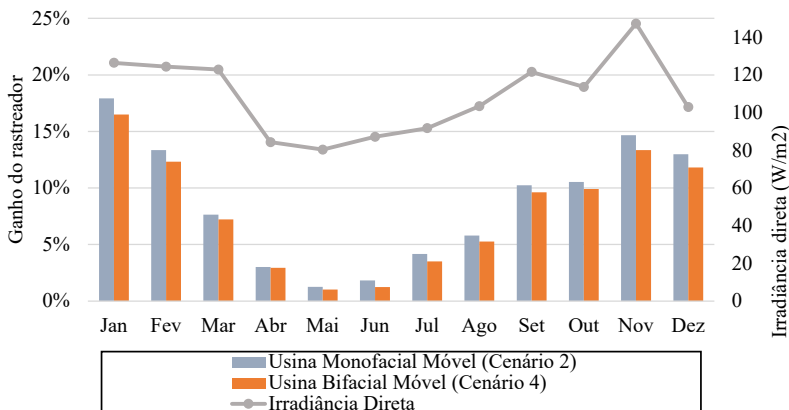


Figura 3 - Ganhos mensais do Rastreador e Irradiância Direta

A Figura 4 apresenta os ganhos bifaciais em condições padrões de albedo e altura de instalação, e os relaciona com os ganhos de irradiância traseira. O ganho bifacial da planta de inclinação fixa (G_{Bfixo}) variou mensalmente entre 5,7% e 7,1%, com um ganho médio anual de 6,3%. Já na planta com rastreamento os ganhos bifaciais mensais ($G_{Bmóvel}$) variaram entre 5,1% e 5,8%, com ganho médio anual de 5,5%. Os dados anuais ainda demonstraram que o sistema bifacial fixo inclinado interceptou mais irradiância que o sistema móvel obtendo um ganho anual de irradiância traseira de 6,7%, já o sistema bifacial com rastreamento apresentou um ganho anual de irradiância traseira de 5,7%.

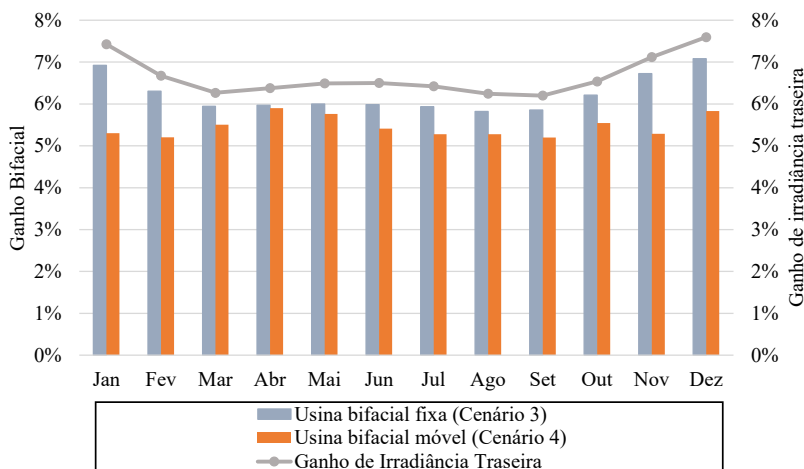


Figura 4 - Ganhos mensais bifaciais e de irradiância traseira

O ganho bifacial no sistema fixo (Cenário 3) superou o ganho do sistema com rastreamento (Cenário 4) em todos os meses. Isso ocorre porque nos sistemas móveis o rastreador permite que o módulo bifacial capture uma parcela maior de irradiância direta em sua face frontal, tornando a influência da superfície traseira menos significativa no processo de conversão de energia. Por outro lado, em sistemas fixos o ângulo de incidência da radiação solar varia ao longo do dia, pois o sistema não é capaz de acompanhar o movimento do Sol. Isso diminui a parcela de irradiância que atinge a face frontal dos módulos, principalmente no início da manhã e no final da tarde. Com uma menor captação de irradiância solar na face frontal, o incremento da irradiância solar captada pela face traseira se torna mais significativo no processo de conversão de energia.

A Tabela 2 traz um compilado acerca dos resultados obtidos na análise de ganhos de rastreamento e apresenta seus coeficientes de correlação de Pearson. A análise de estatística entre os ganhos do rastreador e a irradiância solar direta incidente no local, indicou uma correlação positiva forte entre os parâmetros, com resultados entre 0,8425 e 0,8457 para sistemas monofaciais e bifaciais, respectivamente. O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação, variou entre 0,7099 e 0,7153 para sistemas monofaciais e bifaciais, respectivamente. Esse coeficiente revela cerca de 71% da variabilidade do ganho do rastreador pode ser explicada pela variabilidade da irradiância solar direta.

Tabela 2 - Resultados da análise de ganhos de rastreamento

Cenário	Usina monofacial móvel (Cenário 2)	Usina bifacial móvel (Cenário 4)
Ganho do rastreador	9,5%	8,7%
Coefficiente de correlação (ρ)	0,8425	0,8457
Coefficiente de determinação (R2)	0,7099	0,7153

A análise estatística entre ganhos bifaciais e a irradiância solar traseira estão apresentados na Tabela 3. Os resultados indicaram uma correlação positiva muito forte entre os parâmetros com resultados de 0,9882 e 0,9339 para sistemas fixo e móveis, respectivamente. Isso significa que os ganhos bifaciais são diretamente proporcionais ao ganho de irradiância traseira. A respeito do coeficiente de determinação, para a usina bifacial de inclinação fixa o resultado foi 0,9766, o que indica que aproximadamente 98% do ganho bifacial obtido nestes sistemas é explicado pelo ganho de irradiância traseira. Para a usina bifacial móvel o coeficiente de determinação foi 0,8722, o que significa que 87% do ganho bifacial é explicado pelo ganho de irradiância traseira.

Tabela 3 - Resultados da análise de ganhos bifaciais

Cenário	Usina bifacial fixa (Cenário 3)	Usina bifacial móvel (Cenário 4)
Ganho bifacial	6,3%	5,5%
Ganho de irradiância traseira	6,7%	5,7%
Coefficiente de correlação (ρ)	0,9882	0,9339
Coefficiente de determinação (R2)	0,9766	0,8722

A menor correlação entre o ganho bifacial e o ganho de irradiância traseira nos sistemas com rastreamento é explicada pelo fato da parcela de irradiância solar que atinge o solo atrás dos módulos ser menor em sistemas rastreados do que em sistemas fixos, devido ao próprio movimento realizado pelos dispositivos de rastreamento. Segundo o SAM, o sistema bifacial fixo recebeu 9,5% (197 kWh/m²) de irradiância solar em sua face traseira, enquanto o sistema bifacial móvel recebeu 8,5% (168 kWh/m²). O rastreador permite que o módulo capture uma proporção maior de irradiância direta em seu lado frontal, no entanto, torna a influência da superfície traseira menos significativa.

3.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade investigou a influência do albedo de superfície e da altura de instalação dos módulos na energia de saída

das usinas bifaciais, uma vez que esses parâmetros não têm influência sobre a geração fotovoltaica em módulos monofaciais (HUTCHINS, 2020).

A Figura 5 apresenta a influência da refletividade do solo (albedo) na produção anual de energia e no ganho bifacial das usinas fixa e móvel. Nesta, considerou-se a altura de instalação padrão (1 metro) e variaram-se os valores de albedo. Em solos com baixa refletividade, como por exemplo 20%, a produção anual de energia das usinas atingiria 41,36 GWh e 44,33 GWh no sistema fixo e móvel, respectivamente, atingindo um ganho bifacial de 6,3% no sistema fixo e 5,5% no sistema móvel. Em superfícies com maior refletividade, como 55%, a produção anual das usinas aumentaria para 45,75 GWh e 48,01 GWh no sistema fixo e móvel, respectivamente. Esse aumento representa um ganho de bifacial de 15,3% para a usina de inclinação fixa e 11,7% para a usina móvel. Para albedo muito altos alcançados somente em superfícies brancas, como 70%, a produção anual de energia das usinas atingiria 47,59 GWh e 50,68 GWh no sistema fixo e móvel, atingindo um ganho bifacial de 18,6% e 16% respectivamente.

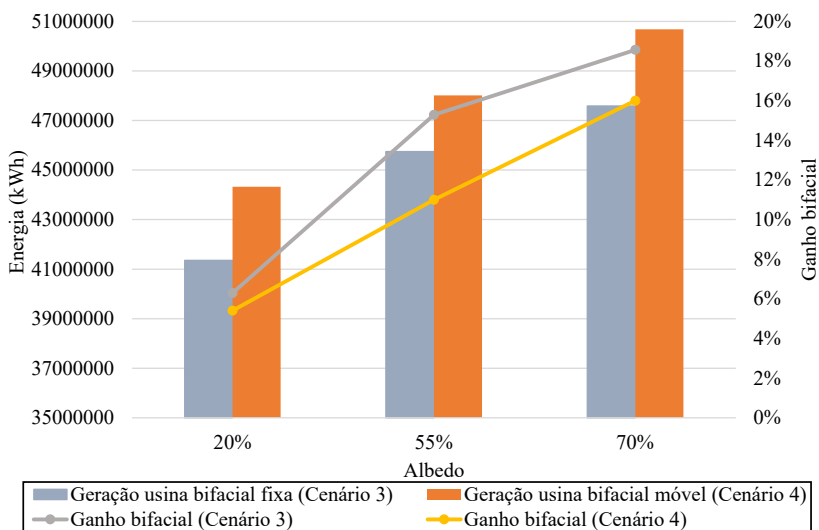


Figura 5 - influência do albedo na produção anual de energia e no ganho bifacial

O desempenho das usinas bifaciais depende da energia adicional produzida a partir da sua face traseira. O albedo é a propriedade da superfície de refletir de volta a irradiância solar e essa parcela de irradiância refletida pelo solo é a principal fonte de irradiância traseira do sistema. Como pode-se verificar na Figura 5, o

albedo tem efeito linearmente positivo sobre a produção de energia das usinas. Da mesma forma, o ganho bifacial também exhibe o crescimento linear. A análise estatística da influência do albedo na produção anual de energia está apresentada na Tabela 4. Os coeficientes de Pearson indicam uma correlação positiva muito forte entre os parâmetros para todas as condições de albedo. Assim como os coeficientes de determinação, que se aproximam de 1. Através desses resultados pode-se concluir que o albedo é o fator determinante para produção de energia bifacial, o que significa que, quanto maior a refletividade do solo melhor será o desempenho bifacial das usinas.

Tabela 4 - Resultados da análise estatística da influência do albedo na produção anual de energia

Cenário	Usina monofacial móvel (Cenário 2)	Usina bifacial móvel (Cenário 4)
Coefficiente de correlação (ρ)	0,9999	0,9999
Coefficiente de determinação (R^2)	0,9999	0,9998

Aumentar a altura de instalação dos módulos bifaciais também influencia o desempenho do sistema (WANG et al., 2019). Módulos instalados mais próximos ao solo sofrem uma redução na irradiância traseira devido ao efeito de auto sombreamento, quanto mais distante o módulo estiver do solo menor será esse efeito. A Figura 6 apresenta a influência da altura de instalação na produção anual de energia e no ganho bifacial das usinas fixa e móvel para diferentes albedos. Observa-se que o rendimento energético e o ganho bifacial são maximizados conforme o aumento da altura devido a maior parcela de irradiância refletida do solo, especialmente no caso de alto albedo. Em condições de baixo albedo o desempenho dos sistemas é menos sensível à altura de instalação dos módulos.

Na Figura 6 (a) é ilustrado a produção anual de energia e o ganho bifacial das usinas considerando uma condição de albedo baixa (20%) onde pode-se verificar que a produção anual de energia dos sistemas aumenta levemente com o aumento da altura de instalação, registrando ganhos bifaciais entre 5 e 9%. Na Figura 6 (b) é ilustrado o comportamento desses parâmetros sob condições de alto albedo (50%), onde é possível observar um aumento mais acentuado da produção de energia em relação à elevação dos módulos. Nestas condições de albedo os ganhos bifaciais dos sistemas variaram entre 11 e 19%. A Figura 6 (c) corresponde ao comportamento da produção de energia e do ganho bifacial em condições de albedo muito alto (70%), nesta pode-se observar um crescimento significativo da produção de energia e do ganho bifacial. Nestas condições o ganho bifacial dos

sistemas variou entre 10 e 24%.

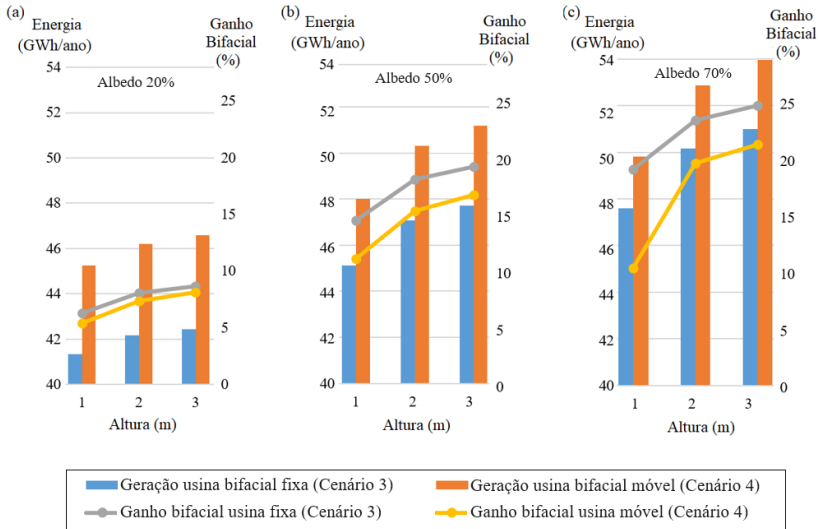


Figura 6 - Influência da altura sobre a produção anual de energia e o ganho bifacial em diferentes condições (a) albedo de 20%, (b) albedo 50% e (c) albedo 70%

Os resultados obtidos na análise estatística indicaram para superfícies de baixo albedo, 20%, coeficientes de Pearson resultantes em 0,9630 e 0,9696 para usinas fixas e móveis, respectivamente. Para superfícies de alto albedo, 50%, os coeficientes de Pearson resultaram em 0,9601 e 0,9665 para usinas fixas e móveis, respectivamente. E para superfícies com albedo muito alto, 70%, os coeficientes de Pearson resultaram em 0,9585 e 0,9641 para usinas fixas e móveis, respectivamente. Analisando esses resultados, apresentados na Tabela 5, pode-se verificar uma correlação positiva muito forte entre os parâmetros, o que indica que alturas maiores de instalação são mais favoráveis ao processo de produção de energia. No entanto, os coeficientes de determinação calculados para esse parâmetro são menores que os observados para o albedo, assim, pode-se concluir que o efeito do albedo tem maior influência no desempenho bifacial do que a altura de instalação, apesar da elevação dos módulos também refletir uma melhora no rendimento energético dos sistemas.

Tabela 5 - Resultados da análise estatística da influência da altura sobre a produção anual de energia para diferentes condições de albedo

Albedo	20%		50%		70%	
Cenário	3	4	3	4	3	4
Coefficiente de correlação (ρ)	0,9630	0,9696	0,9601	0,9665	0,9685	0,9641
Coefficiente de determinação (R^2)	0,9273	0,9401	0,9218	0,9341	0,9187	0,9296

A Figura 7 apresenta a influência da altura de instalação sobre a produtividade da usina bifacial fixa (Cenário 3) para diferentes superfícies. Os resultados obtidos através dessa análise demonstraram que, para uma determinada altura, o ganho energético na produtividade do sistema atinge seu ponto de saturação. Além desse ponto, o rendimento adicional de energia aumenta apenas ligeiramente, embora a altura da instalação continue a aumentar de forma constante. Em locais com baixo albedo a altura de instalação tem pouco efeito na produtividade do sistema, como é possível observar na linha azul da Figura 7, referente a solos de grama. Nesta superfície o ganho bifacial é mais baixo. No entanto, o ponto de saturação para melhoria do rendimento de energia com aumento da altura de instalação do módulo é menor do que um sistema com albedo mais alto, gerando economia com estruturas de instalação

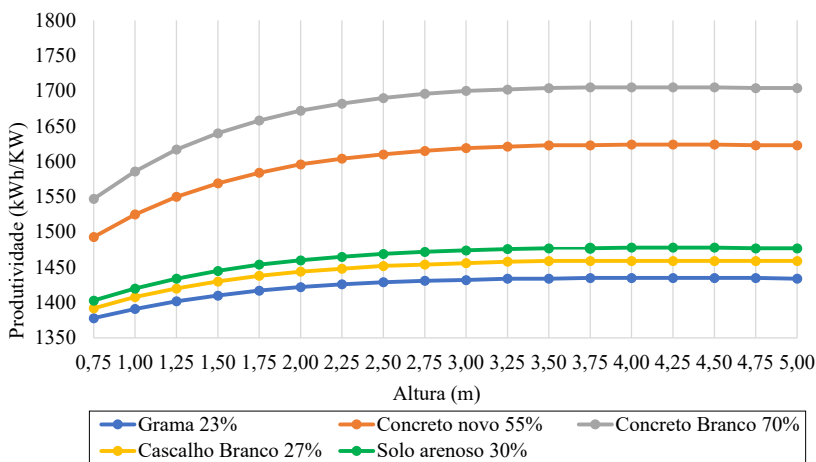


Figura 7- Influência da altura de instalação sobre a produtividade em diferentes superfícies (Cenário 3)

O corte de elevação onde a produção de módulos bifaciais começa a saturar é valioso para instaladores minimizarem custos de ins-

talação, preservando o rendimento suficiente de eletricidade. Analisando a Figura 7, é possível verificar que em superfícies com baixo albedo, entre 20% e 30%, como é o caso da grama, cascalho branco e solo arenoso, o efeito de saturação é observado entre 2,5 e 2,75 metros, sendo essa a faixa ótima de altura de instalação. Nestas superfícies, aumentar a altura de instalação dos módulos de 1 para 2,5 metros (altura ótima), maximizaria a produção anual de energia em 3%. Já para superfícies com alto albedo, superiores a 50%, como o concreto novo e concreto pintado de branco, o efeito de saturação é observado entre 2,75 e 3,00 metros, sendo essa a faixa ótima de altura de instalação. Nestas superfícies, elevar a altura dos módulos de 1 para 2,75 metros (altura ótima), aumentaria a geração anual de energia em 6%.

O albedo mais alto aumenta a contribuição da irradiância refletida, tornando os módulos bifaciais mais suscetíveis ao auto sombreamento, assim a altura de instalação precisa aumentar para compensar a perda adicional de auto sombreamento, por isso a faixa de altura ótima de instalação é maior para superfícies com maiores albedos. A análise estatística entre esses parâmetros está apresentada na Tabela 6, onde é possível verificar uma correlação positiva forte entre a altura de instalação e a produtividade da usina, para todas as superfícies estudadas. Os resultados indicaram que cerca de 70% da variabilidade da produtividade da usina é explicada pela elevação dos módulos também para todas as superfícies.

Tabela 6 - Resultados da análise estatística da influência da altura de instalação sobre a produtividade da usina para diferentes superfícies

Superfície/albedo	Grama (23%)	Cascalho branco (27%)	Solo arenoso (30%)	Concreto novo (55%)	Concreto branco (70%)
Coefficiente de correlação (ρ)	0,8459	0,8488	0,8514	0,8349	0,8488
Coefficiente de determinação (R^2)	0,7156	0,7204	0,7248	0,6970	0,7068

Para verificar a otimização atingida com a modificação do albedo do solo e a elevação dos módulos, extraiu-se do SAM os valores referentes a interceptação de irradiância traseira (IT) nos módulos e seus respectivos ganhos bifaciais (GB) para usinas fixas e móveis. Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Ganhos bifaciais (G_B) e os ganhos de irradiância traseira (G_{IT}) para usinas fixas e móveis em diferentes condições de albedo e altura de instalação

Condições/modificações		Usina bifacial fixa (Cenário 3)		Usina bifacial móvel (Cenário 4)	
Albedo	Altura (m)	G_B	G_{IT}	G_B	G_{IT}
20% (Grama)	1	6,3%	9,5%	5,5%	8,2%
20% (Grama)	2,5	8,4%	13,2%	7,9%	12,0%
55% (Concreto novo)	1	15,3%	25,6%	11,7%	18,5%
55% (Concreto novo)	2,5	20%	36,1%	17,4%	30,3%
70% (Concreto branco)	1	18,6%	32,5%	16%	23,1%
70% (Concreto branco)	2,75	24%	45%	21%	38%

Considerando a superfície padrão das simulações, com albedo de 20%, na hipótese de submeter à usina a reformas e elevar a altura de instalação dos módulos de 1 para 2,5 metros, altura ótima para este valor de albedo, o ganho bifacial médio anual seria aumentado de 6,3% para 8,4%, maximizando a interceptação de irradiância traseira de 9,5% para 13,2%. No sistema móvel essa modificação maximizaria o ganho médio anual bifacial de 5,5% para 7,9% e aumentaria de 8,2% para 12,0% a interceptação de irradiância traseira.

Por outro lado, desconsiderar a elevação dos módulos, mantendo-os a 1 metro do chão, e aumentar a refletividade do solo a níveis de 55%, como por exemplo, pelo seu revestimento com concreto novo, aumentaria o ganho bifacial anual da usina de inclinação fixa de 6,3% para 15,3%. Com o aumento do albedo a captação de irradiância traseira saltaria de 9,5% para 25,6%. Para a usina móvel, essa mesma modificação elevaria a o ganho bifacial de 5,5% para 11,7% e a captação da irradiância traseira aumentaria de 8,15% para 18,5%. Caso esse concreto fosse pintado de branco (albedo 70%) visando aumentar ainda mais sua refletividade, o ganho bifacial nas usinas fixas seria elevado de 6,3% para 18,6%, com 32,5% de captação de irradiância traseira. Nas usinas móveis o ganho bifacial aumentaria de 5,5% para 16% com 23,1% de captação de irradiância traseira.

Pode-se notar que a melhoria no rendimento do sistema mediante a elevação dos módulos é menor que a melhoria verificada mediante ao aumento da refletividade do solo. Isso comprova que o albedo é o parâmetro mais significativo no desempenho bifacial. No entanto, o aumento da altura de instalação também reflete, em menor escala, uma melhora no rendimento energético anual dos sistemas.

Assim, para maximizar ainda mais a produção de energia pode-se modificar ambos os parâmetros: albedo e altura de instalação. Caso fosse realizado o tratamento do solo com revestimento de concre-

to, modificando o albedo para 55% e se elevasse a altura de instalação dos módulos de 1 para 2,75 metros, altura ótima de instalação, no sistema fixo o ganho médio anual bifacial saltaria para 20% e a interceptação de irradiância traseira para 36,1%, já no sistema móvel essas modificações refletiram um aumento do ganho bifacial para 17,4% e o interceptação de irradiância traseira para 30,3%. Pintando esse concreto de branco e elevando ainda mais a altura de instalação, de 1 para 2,75 metros, os ganhos médios anuais bifaciais e a captação de irradiância traseira atingiriam 24% e 45%, respectivamente, no sistema de inclinação fixa. No sistema móvel seria alcançado um ganho bifacial de 21% e uma captação de irradiância traseira de 38%.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desempenho das usinas bifaciais é fortemente influenciado pela parcela de irradiância captada na face traseira do módulo, assim, o albedo, capacidade de refletividade do solo, tem efeito linearmente positivo sobre o ganho bifacial e a produção de energia nessas usinas. Quanto maior a refletividade do solo melhor será o desempenho bifacial. Em condições de baixo albedo os ganhos bifaciais anuais atingem 6,3% e 5,5% para sistemas fixos e móveis, respectivamente. Em condições de alto albedo os ganhos podem atingir 15,3% para a usina de inclinação fixa e 11,7% para a usina móvel. E para albedos muito altos os ganhos podem atingir 18,6% na usina de inclinação fixa e 16% na usina móvel.

A altura de instalação dos módulos também influencia o desempenho da usina bifacial. Módulos instalados mais próximos ao chão são mais suscetíveis ao efeito do auto sombreamento, responsável por reduzir a parcela de irradiância refletida pelo solo. Essa altura de instalação deve ser grande o suficiente para minimizar os efeitos do auto sombreamento e maximizar a captação da irradiância traseira. A produtividade das usinas e o ganho bifacial são maximizados conforme o aumento da altura de instalação. Em condições de baixo albedo o rendimento da usina é menos sensível à altura de instalação. Frente a um albedo de 20%, a elevação dos módulos pode produzir ganhos bifaciais entre 7,9% e 8,4%. Sob um albedo de 55%, essa mesma elevação pode produzir ganhos entre 17,4% e 20% e em condições de albedo de 70 % esses ganhos podem variar entre 21 e 24%.

Maiores elevações melhoram o rendimento do sistema, contudo, existe uma determinada altura em que o desempenho do sistema atinge seu ponto de saturação. Neste ponto, o desempenho do sistema para de aumentar mesmo com a elevação da altura. O conhecimento deste ponto de saturação é importante para que os instaladores sejam capazes de reduzir os custos de instalação, elevando os módulos ape-

nas até essa altura de saturação. Em condições de baixo albedo, como superfícies de grama, cascalho branco e solo arenoso, esse efeito de saturação é observado entre 2,5 e 2,75 metros. Para superfícies com alto albedo, como o concreto novo e concreto pintado de branco, o efeito de saturação é observado entre 2,75 e 3,00 metros. Sob baixo albedo, a elevação da altura até o nível de saturação maximiza 3% da produção anual de energia, já sob condições de alto albedo, a elevação da altura maximiza a produção anual de energia em 6%.

A análise de sensibilidade demonstrou que para a região o efeito do albedo tem maior influência no desempenho do sistema do que a altura de instalação, apesar de o aumento da altura de instalação também refletir uma melhora no rendimento energético dos sistemas. Para maximizar o desempenho bifacial das usinas é sugerido a modificação da refletividade do solo e a elevação dos módulos. Revestir o solo da usina com concreto e elevar a altura de instalação dos módulos para 2,5 metros maximizaria os ganhos anuais bifaciais de 6,3% para 20% na usina fixa. Na usina móvel a mesma modificação maximizaria os ganhos bifaciais anuais de 5,5% para 17,4%. Pintar esse concreto de branco e elevar a altura de instalação de 1 para 2,75 metros, maximizaria os ganhos para 24% no sistema fixo e 21% no sistema móvel.

Os resultados deste trabalho fornecem uma indicação sobre o resultado esperado da instalação de uma usina fotovoltaica bifacial fixa e móvel na região nordeste do Brasil, fornecendo aos investidores e formuladores de políticas, informações e subsídios técnicos que podem contribuir para acelerar o processo de diversificação da matriz elétrica nacional, além de capacitar os formuladores na construção de políticas deliberadas que ajudarão no desenvolvimento do setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEN, M. et al. Improvement of the electricity performance of bifacial PV module applied on the building envelope. *Energy Build*, Vol. 238, 2021.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, CRESESB, 2004.

DIAS, L. D.; RAMPINELLI, A. G. Modelagem, simulação e análise de desempenho de uma planta solar com módulos mono e bifaciais em distintos tipos de solo. *Revista Brasileira de Energia | Vol. 29, Nº 4, 4º Trimestre de 2023.*

GANESAN, K.; PRINCE WINSTON, D.; SUGUMAR, S.; JEGAN, S. Performance analysis of n-type PERT bifacial solar PV module under diverse albedo conditions. *Solar Energy*, Vol. 252, pág. 81-90, 2023.

GREENER. Estudo Estratégico Grandes Usinas Solares 2021 – Mercado Livre e Regulado, 2021. Disponível em: https://www.greener.com.br/wp-content/uploads/2022/04/Estudo-Estrategico-Grandes-Usinas-Solares-2022.pdf?utm_campaign=estudo_gc_2021_fluxo&utm_medium=email&utm_source=RD+Station. Acesso em 15 de out. de 2022.

HAMMOUMI, A. E.; MOTAHHIR, S.; GHIZAL, A. E.; CHALH, A.; DE-ROUICH, A. A simple and low-cost active dual-axis solar tracker. *Energy Science & Engineering*, Vol.6, Edição 5, pág. 607-620, 2018.

HUTCHINS, M. The long read: All about albedo. *PV Magazine*, 25 de janeiro de 2020. Disponível em: <https://www.pv-magazine-india.com/2020/01/25/the-long-read-all-about-albedo/>. Acesso em 22 de novembro de 2023.

IEA. Renewables: Solar PV. Paris, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>. Acesso em 11 de jul. de 2023.

KOPECEK, R.; LIBAL, J. Towards large-scale deployment of bifacial photovoltaics. *Nature Energy*, Vol.3, pág. 443–446, 2018.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). System Advisor Model. Disponível: <https://sam.nrel.gov/>. Acesso em 22 de outubro de 2023.

MELO, B. K.; SILVA, K. M.; SILVA, S. L. J.; COSTA, S. T.; VILLALVA, G. Study of energy improvement with the insertion of bifacial modules and solar trackers in photovoltaic installations in Brazil. *Renewable Energy Focus*, Vol. 41, pág. 179-187, 2022.

MME/EPE. Expansão da Geração - Projetos Fotovoltaicos nos Leilões de Energia: Análises dos leilões A-4 e A-6 de 2019. Brasília: MME/EPE.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico - Boletins da Operação, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/boletins-da-operacao>. Acesso em 16 de jul. de 2023.

PESTANA, D., VELOSA, S. Introdução à Probabilidade e à Estatística. Volume I, 4ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.

RODRÍGUEZ-GALLEGOS, C. D.; LIU, H.; GANDHI, O.; SINGH, J. P.; KRISHNAMURTHY, V.; KUMAR, A.; STEIN, J. S.; WANG, S.; LI, L.; REINDL, T.; PETERS, I. M. Global techno-economic performance of bifacial and tracking photovoltaic systems. *Joule*, Vol. 4, n. 7, p. 1514-1541, 2020.

SIDEK, M. H. M.; AZIS, N.; HASAN, W. Z. W.; AB KADIR, M. Z. A.; SHAFIE, S.; RADZI, M. A. M. Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. *Energy*, Vol. 124, pág. 160–170, 2017.

SHOUKRY, I.; LIBAL, J.; KOPECEK, R, et al. Modelling of Bifacial Gain for Stand-alone and in-field Installed Bifacial PV Modules. *Energy Procedia*, Vol. 92, pág. 600–608, 2016.

STEIN, J.; REISE, C.; CASTRO, J. B.; FRIESEN, G.; MAUGERI, G.; URREJOLA, E.; RANTA, S. Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications. Report IEA-PVPS T13-14:2021 (IEA PVPS Task 13, Ed.), 2021.

SUN, X.; KHAN, M. R.; DELINE, C. et al. Optimization and performance of bifacial solar modules: a global perspective. *Apply Energy*, Vol. 212, pág. 1601–1610, 2018.

WANG, L.; LIU, F.; YU, S.; QUAN, P.; ZHANG, Z. The Study on Mismatch Losses of the Bifacial PV Modules Due to the Irradiance Nonuniformity on Its Backside Surface. *IEEE J. Photovolt*, vol.10, pág. 135–143, 2019.

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.
- 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.

