

revista brasileira de  
**ENERGIA**



Sociedade Brasileira de  
Planejamento Energético

Volume 30, Nº 2, 2º Trimestre de 2024

**Diagramação**

Kelly Fernanda dos Reis

**Revisão**

Arnaldo Walter

**Revista Brasileira de Energia  
Vol. 30 - nº2**

Itajubá, 2024 - SBPE

Editor: Arnaldo Walter  
137 p.

1 - Energia - artigos

2 - Publicação científica

ISSN: 2317-6652

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

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

### **Editor Responsável**

Arnaldo Walter

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

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

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

### **Comitê Editorial**

Alexandre Salem Szklo

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Annemarlen Gehrke Castagna

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Edmilson Moutinho dos Santos

Universidade de São Paulo - USP

Helder Queiroz Pinto Junior

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Joaquim Eugênio Abel Seabra

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Kamyla Borges da Cunha

Instituto Clima e Sociedade - iCS

Luiz Augusto Horta Nogueira

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Mônica Cavalcanti Sá de Abreu

Universidade Federal do Ceará - UFC

Sergio Valdir Bajay

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Virgínia Parente

Universidade de São Paulo - USP

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

### **Diretoria da SBPE**

Presidente: Rubem César Rodrigues Souza

Vice-Presidente: Juliana Klas

Diretora de Eventos: Paula Meyer Soares

Diretor de Publicações: Arnaldo Walter

Diretor Administrativo: Edson da Costa Bortoni

### **Conselho Fiscal**

Eduardo Mirko Valenzuela Tundera

Ivo Leandro Dorileo

Jamil Haddad

### **Conselho Consultivo**

Afonso Henriques Moreira Santos

Célio Bermann

Edmilson Moutinho dos Santos

Ivan Marques de Toledo Camargo

Jamil Haddad

José Roberto Moreira

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](mailto:exec@sbpe.org.br)

Os artigos podem ser enviados por meio do site da SBPE

**[www.sbpe.org.br](http://www.sbpe.org.br)**

# ESTATÍSTICAS

## Tempo para tomada de decisões

Desde o primeiro número publicado em 2022, a Revista Brasileira de Energia (RBE) vem apresentando estatísticas relativas ao processamento das submissões. Com a implantação de novos procedimentos gerenciais, 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 – 200 dias –, sendo apenas ligeiramente menor – 198 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 131 dias, sendo de 153 dias para os artigos aceitos. Para os cinco artigos publicados no presente número, o tempo médio entre a submissão e a decisão editorial final foi de 134 dias.

O compromisso assumido é alcançar e manter o tempo de tomada de decisão abaixo de 150 dias e, com os resultados deste número, mantivemos os indicadores temporais dentro do objetivo, e isso já tem ocorrido há várias publicações: 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 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 aproximadamente seis anos e meio houve pouco mais de 223 mil *downloads* de artigos publicados; o levantamento aqui apresentado foi feito na última semana de outubro de 2024. Entre todos

os artigos já publicados, os cinco mais acessados são apresentados na Tabela 1; são os mesmos artigos indicados na publicação anterior, mas houve mudança no ordenamento 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 não houve mudanças no ordenamento.

Em adição, utilizando a plataforma Google Acadêmico, em Outubro 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      | 11.167              |
| 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     | 7.993               |
| 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     | 7.754               |
| <i>Investment analysis for wind energy projects</i>   | Wagner Sousa de Oliveira e Antônio Jorge Fernandes | 2013 | v. 19 n.02      | 7.173               |
| Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos   | Alessandra Magrini                                 | 2011 | v. 08 n. 01     | 4.469               |

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     | 2.053               |
| 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     | 1.394               |
| Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes  | Luiz Augusto Horta Nogueira, Rafael Capaz, Electo Silva Lora  | 2021 | v. 27, n. 3     | 1.222               |

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

| Título   | Autores   | Ano  | Volume e número | Número de citações |
|--|---|------|-----------------|--------------------|
| Validação de dados de vento da reanálise ERA5-LAND para estimativa de potencial eólico no Estado do Rio de Janeiro | Rose Angela Hilda Wanzeler Braga, Eliane Barbosa Santos, Matheus Ferreira de Barros | 2021 | v. 27 n. 04     | 1.204              |
| (In)Justiça energética: definição conceitual, parâmetros e aplicabilidade no caso do Brasil                        | Vinicius Eduardo Ribas, André Felipe Simões   | 2020 | v. 26 n. 04     | 1.099              |

Tabela 3 - Artigos com mais citações acadêmicas; levantamento feito com uso do Google Acadêmico na primeira semana de Outubro 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     | 108                |
| 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 Varela, Carla Kazue Nakao Cavaliero, Ennio Peres da Silva  | 2008 | v. 14 n. 01     | 38                 |
| Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de Tubarão – SC | Oswaldo L. S. Pereira, Felipe F. Gonçalves   | 2008 | v. 14 n. 01     | 38                 |
| Mudança institucional e inovação na indústria brasileira de petróleo  | André Tosi Furtado   | 2002 | v. 09 n. 01     | 32                 |
| Planejamento energético: Necessidade, objetivo e metodologia  | Sérgio Valdir Bajay  | 1989 | v. 01 n. 01     | 29                 |

Tabela 3 - Artigos com mais citações acadêmicas; levantamento feito com uso do Google Acadêmico na primeira semana de Outubro de 2024 (cont.)

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

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

**Arnaldo Walter**

Editor Responsável - Revista Brasileira de Energia

## EDITORIAL

Este é o segundo 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 Temidayo James Aransiola e Carlos Raul Etulain aborda a questão da transição energética, analisando as diferenças regionais, no Brasil, do número de sistemas de micro e minigeração distribuída.

Já o trabalho de Maria Ludmilla Campos de Moraes e coautores analisa a evolução recente da matriz de geração de eletricidade no Brasil, e discute sobre perspectivas de seu futuro tendo como base a opinião de especialistas que foram consultados.

Matheus Lehmkühl e Murilo Reolon Scuzziato apresentam resultados de um estudo de programação linear em que é analisada a operação, ainda que simplificada, do Sistema Interligado Nacional (SIN). O foco é a análise de alternativas de contratação de capacidade de geração.

O artigo assinado por Max May e Giuliano Arns Rampinelli analisa comparativamente sistemas solares fotovoltaicos com topologias distintas e diferentes fatores de dimensionamento.

Finalmente, o artigo assinado por Vitor Silva Alencar e João Paulo Madruga trata o tema pobreza energética e faz propostas para o seu enfrentamento no Brasil, sob ótica dos fundamentos jurídico-constitucionais.

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

**Arnaldo Walter**

Editor Responsável - Revista Brasileira de Energia

# SUMÁRIO

**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESENVOLVIMENTO NO BRASIL: ANÁLISE DA DESIGUALDADE REGIONAL NO USO DE SISTEMAS DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA (MMGD).....11**

Temidayo James Aransiola, Carlos Raul Etulain

**FUTURO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA .....30**

Maria Ludmilla Campos de Moraes, Érico Veras Marques, Jocildo Figueiredo Correia Neto

**ESTUDO DE CASO PARA APLICAÇÃO DE MECANISMOS DE CAPACIDADE EM UM SISTEMA DE ENERGIA SIMPLIFICADO.....62**

Matheus Lehmkuhl, Murilo Reolon Scuzziato

**ESTUDO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DE INVERSORES COM DUAS TOPOLOGIAS DIFERENTES E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM DISTINTOS FATORES DE DIMENSIONAMENTO.....83**

Max May, Giuliano Arns Rampinelli

**FUNDAMENTOS JURÍDICO-CONSTITUCIONAIS PARA O ENFRENTAMENTO DA POBREZA ENERGÉTICA NO BRASIL.....114**

Vitor Silva Alencar, João Paulo Madruga

## **TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESENVOLVIMENTO NO BRASIL: ANÁLISE DA DESIGUALDADE REGIONAL NO USO DE SISTEMAS DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA (MMGD)**

Temidayo James Aransiola<sup>1</sup>

Carlos Raul Etulain<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Estadual de Campinas*

DOI: 10.47168/rbe.v30i2.858

### **RESUMO**

A Lei 14.300 de janeiro de 2022 estabeleceu o marco legal para a produção de energia elétrica por meio da Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD) com o objetivo de promover a redução dos custos energéticos, tanto para domicílios e empresas, e acelerar a transição energética para fontes renováveis. Usando os dados municipais sobre MMGD fornecidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), de 2013 a 2022, este estudo mostra como essa medida legislativa gerou um crescimento notável na instalação e utilização de energia renovável no país, sobretudo proveniente de fonte solar fotovoltaica. Usando o índice de Gini, o estudo também mostrou que existe alta desigualdade regional de potência instalada e nível de investimento em MMGD. A partir dessas análises, este estudo discute os desafios de desenvolvimento decorrentes dessa Lei, considerando o contexto de aumento crescente das tarifas elétricas e as desigualdades estruturais existentes em nível residencial, setorial e regional.

Palavras-chave: Transição energética; Desigualdade; ODS-7; ODS-10.

### **ABSTRACT**

Law 14,300 of January 2022 established the legal framework for energy production through Microgeneration and Distributed Minigeneration (MMGD) with the aim of promoting the reduction of electricity costs for households and businesses, and accelerating the energy transition to renewable sources. Using municipal data on MMGD provided by the Energy Research Company (EPE), from 2013 to 2022, this study shows how this legislative measure has led to a remarkable growth in the installation and use of renewable energy in the country, especially from solar photovoltaics. Using the Gini index, the study also identified high regional inequality in installed capacity and level of investment in MMGD. Based on these analyses, this study discusses the challenges

arising from this Law, considering the context of the increasing energy tariffs and the country's structural inequalities existing at the residential, sectoral, and regional levels.

Keywords: Energy transition; Inequality; SDG-7; SDG-10

## 1. INTRODUÇÃO

A transição energética é um caminho crucial para construir um futuro sustentável em termos ambientais, sociais e econômicos. No entanto, evidências recentes alertam que políticas adotadas por diversos países do norte global provocaram desigualdade energética no curto prazo, principalmente porque as motivações ambientais foram focadas no avanço da eletricidade gerada por fontes sustentáveis, porém sem considerar que estruturas socioeconômicas pré-existentes podem reproduzir e aumentar a desigualdade energética dessas políticas – conflito evidente entre ODS-7 e ODS-10 (BOUZAROVSKI e TIRADO HERRERO, 2017); (CARLEY e KONISKY, 2020); (DUBOIS e MEIER, 2016); (FRANKOWSKI e HERRERO, 2021); (KASHOUR, 2023); (SCHLESEWSKY e WINTER, 2018); (SINHA et al., 2022). Destarte, para evitar essa direção nos países da América Latina, onde a desigualdade socioeconômica é mais acentuada, é fundamental considerar essas experiências ao implementar políticas de transição.

O Brasil é uma referência global na transição para fontes renováveis de energia, principalmente devido ao uso predominante de energia hidrelétrica e aos avanços alcançados na redução de emissão de gases de efeito estufa e nas políticas públicas adotadas para promover uma transição energética justa, acessível e inclusiva. Embora haja grandes discrepâncias na América Latina, a região possui uma das matrizes de eletricidade mais limpas do mundo, com cerca de 30% provenientes de fontes hidráulicas (RAINERI et al., 2013).

A matriz elétrica do Brasil é predominantemente constituída de energia hidráulica, representando 60,7% e 53,4% em 2020 e 2021, respectivamente (BEN, 2022). A crescente produção e consumo de energia limpa no Brasil é notável. Quanto ao uso de energia (proxy para demanda), o setor de transporte e a indústria são os principais usuários, consumindo cerca de 35% cada em 2021, seguidos por residências, que representam 10%. Em 2021, 23%, 58% e 66% da energia usada pelos setores de transporte, industrial e residencial, respectivamente, eram de fontes renováveis (BEN, 2022). O uso expressivo de energia renovável em domicílios brasileiros é devido à abundância da fonte hidráulica e também, em parte, devido ao programa Luz para Todos, criado em 2003 para levar acesso à eletricidade nas áreas rurais remotas (FERREIRA e SILVA, 2021); (RAINERI et al., 2013). Para rea-

lizar uma transição energética justa no Brasil é necessário promover acesso universal a fontes renováveis de energia e incluir perspectivas de desenvolvimento que levem em conta o bem-estar, o meio ambiente e a acessibilidade a fontes modernas capazes de reduzir o custo de energia para todos. Programas como Luz para Todos e Mais Luz para o Amazonas são exemplos de iniciativas sociais adotadas pelo Brasil para promover o acesso à eletricidade, de modo que áreas remotas do país também possam usufruir dos benefícios da transição energética (FERREIRA e SILVA, 2021). No entanto, a desigualdade, um problema estrutural tanto no Brasil como na América Latina, como um todo, continua sendo um fator crítico que pode ameaçar o sucesso desse processo. Neste estudo será abordado o caso específico da Lei de Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) para ilustrar como políticas voltadas para promover a transição energética podem ser afetadas pela desigualdade existente.

Em 2012 foi implementada no Brasil a regulação ANEEL nº 482, que criou o sistema de compensação de energia por meio de Micro e Minigeração Distribuída (MMGD). Essa regulação autoriza consumidores a produzirem energia elétrica para consumo próprio, com o objetivo de reduzir significativamente o custo e incentivar a transição energética no setor privado do país, tanto em residências como em empresas. Recentemente, em janeiro de 2022, foi sancionada a Lei 14.300, que institui o marco legal da MMGD (BRASIL, 2022).

De 2012 a 2022, o uso da MMGD cresceu exponencialmente, principalmente devido ao uso de energia solar fotovoltaica em residências privadas e estabelecimentos comerciais (BEN, 2022). De 2020 a 2021, apenas, este aumento foi de 84%, sendo que 88,3% desse total foi geração solar, principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso. É importante ressaltar que as projeções indicam que, de 2020 a 2050, a produção e o consumo de energia solar e eólica terão o maior crescimento em comparação com outras fontes renováveis (BELLO et al., 2023). Portanto, estudar o acesso justo a essas fontes energéticas é crucial para o desenvolvimento do país.

Embora grande parte da matriz elétrica do Brasil seja renovável, com destaque para a fonte hidráulica, e que quase todo o território do país já tenha acesso à eletricidade, a alta taxa de pobreza e desigualdade impede o acesso às fontes energéticas que podem reduzir o custo de energia, como a solar e eólica, contradizendo a ODS-7 (ONU, 2020). Além de acessibilidade, é importante acrescentar que o setor privado, que é o principal fornecedor de energia solar e eólica, é movido por forças de mercado (por exemplo, lucratividade, preços, participação de mercado, etc.) que, em geral, são desalinhadas com o objetivo desenvolvimentistas (RINALDI et al., 2021).

É importante adicionar que Artigo 36 da Lei 14.300 também instituiu o Programa de Energia Renovável Social (PERS), que visa financiar a instalação de sistemas fotovoltaicos e outras fontes renováveis para consumidores de baixa renda através de recursos advindos do Programa de Eficiência Energética (PEE). No entanto, há pouco avanço e desenvolvimento efetivo em relação a este programa.

A combinação da alta desigualdade socioeconômica, custos elevados de instalação e a predominância do setor privado na geração elétrica com energia solar e eólica gera um cenário propício para acentuar e perpetuar as desigualdades, ameaçando gerar o retrocesso no desenvolvimento, uma vez que grande parte da população não tem acesso a essas fontes de energia e, conseqüentemente, fica excluída dos benefícios proporcionados pela Lei 14.300, de MMGD. É importante ressaltar que essa perspectiva muitas vezes é negligenciada na análise macroeconômica que enfatiza, principalmente, o incentivo à transição energética no setor privado e à sustentabilidade ambiental.

O objetivo geral deste estudo é analisar a evolução do uso de Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD) para complementar o serviço elétrico público com intuito de baratear o custo de energia, enfatizando o papel da Lei 14.300, de MMGD. Para isso, primeiro, apresentam-se as principais características da lei, ressaltando seus objetivos e benefícios para o plano de transição energética. Em seguida, realiza-se uma análise descritiva dos dados sobre uso de MMGD, ressaltando a evolução temporal, os principais consumidores e a distribuição geográfica. Ademais, usando o índice de Gini, calcula-se o nível de desigualdade entre municípios e estados em termos da potência instalada e nível de investimento financeiro em MMGD, com o intuito de enfatizar o papel de desigualdades já existentes na adoção de MMGD, e como a Lei 14.300 pode agravar a situação atual, mesmo acelerando a transição energética para fontes renováveis, ou seja, causando possível contradição entre a ODS-7 e ODS-10. Por fim, discute-se a experiência de países do norte global para identificar boas práticas que possam servir para a implementação de políticas de transição energética no Brasil e na América Latina.

Este estudo é estruturado em seis seções, incluindo esta seção introdutória. A Seção 2 apresenta as principais características da Lei 14.300; Seção 3 mostra a análise geográfica e temporal de dados sobre o uso de MMGD; Seção 4 apresenta o nível de desigualdade da potência instalada e investimento em MMGD entre municípios e regiões do país; na Seção 5 desenvolve-se uma breve discussão sobre a desigualdade e a transição energética, baseada na experiência de países do norte global, ressaltando a importância da perspectiva desenvolvimentista. Finalmente, na Seção 6 conclui-se o estudo com considerações finais.

## **2. A LEI DA MMGD COMO MEDIDA DE INCENTIVO PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

A Lei 14.300, de Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), foi sancionada em 2022 com o propósito de fomentar a ampliação do uso de fontes de energia renováveis no setor privado e em residências no Brasil, com o intuito de impulsionar a transição energética. Essa legislação é considerada um marco regulatório para a geração de energia elétrica por meio da MMGD, destinada ao consumo próprio, a fim de complementar a eletricidade fornecida pelo serviço público, representada pelo Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Essa lei permite que os consumidores invistam em fontes renováveis visando a redução dos custos com energia elétrica.

Na prática, tanto residências quanto empresas têm a possibilidade de instalar e utilizar eletricidade proveniente da Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), seja de maneira local ou remota. Além disso, em consonância com o plano de transição energética, até 2030, a Lei estabelece um limite percentual da eletricidade associada ao serviço público que pode ser complementada por meio da MMGD, iniciando em 15% a partir de 2023 e aumentando anualmente em 15% até 2029, atingindo um máximo de 90%. O excedente gerado, ou seja, a diferença entre a quantidade de energia ativa consumida e a quantidade de energia ativa produzida e injetada na rede pela unidade consumidora que tem MMGD, poderá ser utilizado como crédito energético em ciclos de faturamento subsequentes ou por outros consumidores vinculados ao consumidor gerador. Em outras palavras, o benefício da MMGD é progressivo, cumulativo e compartilhável, o que resulta em uma redução significativa dos custos relacionados à energia elétrica.

O Artigo 36 da Lei 14.300 instituiu a criação do Programa de Energia Renovável Social (PERS), que é um financiamento concedido a consumidores de baixa renda que desejam instalar MMGD nas suas residências. No entanto, não houve qualquer desenvolvimento ou avanço sobre a implementação efetiva do programa após a publicação da Lei.

## **3. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E TEMPORAL DE MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA (MMGD)**

No período entre 2013 e 2023, o total de sistemas e potência instalada de Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD) cresceram exponencialmente, aumentando de apenas 75 para 760.823 sistemas de geração de MMGD (Figura 1 – elaborada usando dados da EPE). Dentre os geradores, cerca de 99,9% correspondem a sistemas de energia solar fotovoltaica utilizados para autoconsumo em áreas remotas e para atender às necessidades da própria unidade consumi-

dora (conforme demonstrado na Figura 2 – elaborada usando dados da EPE). Nesse mesmo intervalo de tempo, o emprego da MMGD em residências registrou o maior crescimento em comparação com o seu uso em estabelecimentos comerciais, indústrias, produção rural, entre outros setores (Figura 3 – elaborada usando dados da EPE). Essa tendência ascendente no uso da MMGD se deve principalmente à regulamentação nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e, posteriormente, à promulgação da Lei 14.300, as quais contribuíram para a desburocratização de todo o processo relacionado à MMGD.

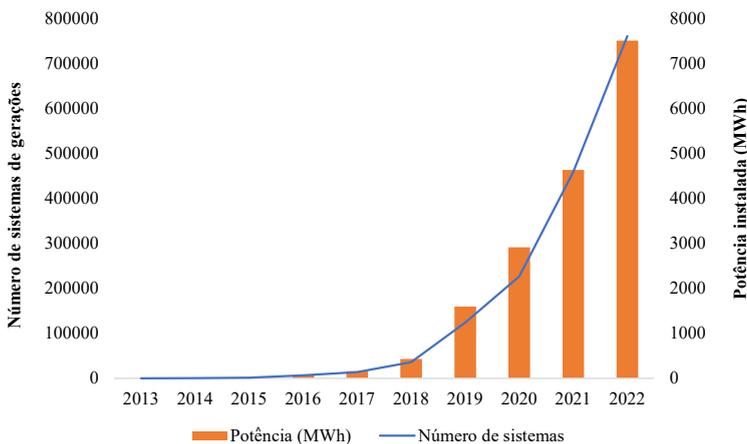


Figura 1 - Número e capacidade instalada de sistemas de Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), 2013 a 2022, Brasil



Figura 2 – Participação em capacidade instalada por tipo de sistema Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), 2013 a 2022, Brasil

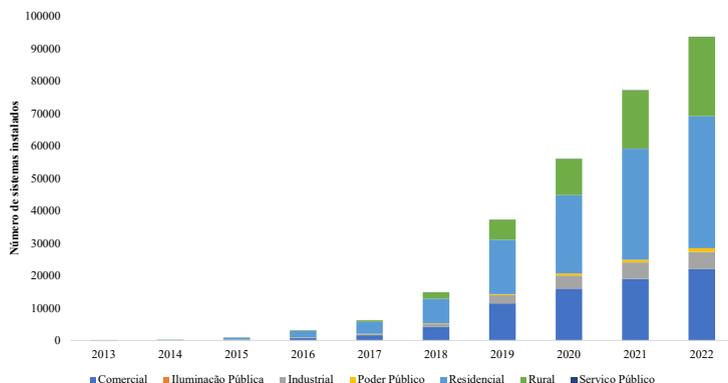


Figura 3 – Número de sistemas de Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD) instalados por tipo de consumidor, 2013 a 2022, Brasil

Apesar do crescimento notável na instalação e utilização da Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), em conformidade com os planos e projeções de transição energética (BELLO et al., 2023), é evidente a presença de uma heterogeneidade regional nesse crescimento. A Figura 4 (elaborada usando dados da EPE) revela que apenas quatro estados (Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul e Paraná) detêm aproximadamente 51,2% da capacidade instalada de MMGD no Brasil. Ademais, essa heterogeneidade também se manifesta em nível municipal, sendo que as cidades de Florianópolis e Brasília, mesmo não estando entre os estados com maior capacidade, apresentam a maior capacidade instalada. Em outras palavras, existe uma considerável desigualdade entre os estados e municípios em termos de capacidade instalada e utilização da MMGD. Coincidentemente, estes estão entre os estados com os maiores níveis de renda per capita do país de 2012 a 2020 (IBGE, 2021).

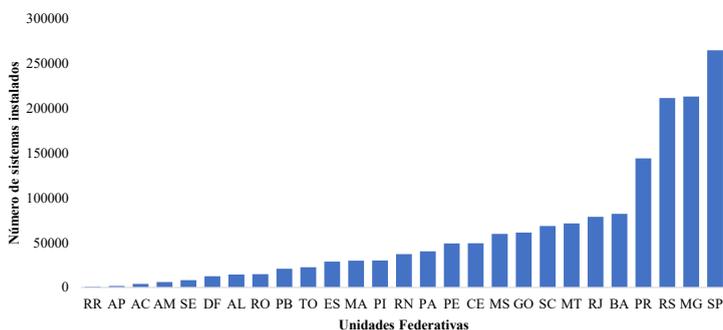


Figura 4 – Distribuição geográfica do número de sistemas instalados de Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), 2013 a 2022, Unidades Federativas (UFs)

A Figura 5 (elaborada usando estimativas calculadas pela EPE) evidencia não apenas o significativo crescimento da geração de energia elétrica, principalmente a partir de sistemas fotovoltaicos, mas também o excedente de eletricidade injetado na rede das concessionárias ou permissionárias de energia, a qual supera a quantidade total consumida ao longo de todo o período. Essa estimativa, fornecida pela EPE, indica a acumulação de créditos energéticos para redução dos custos em ciclos futuros. Além disso, a Figura 6 (elaborada usando estimativas calculadas pela EPE) corrobora essa observação, ao demonstrar que, entre 2013 e 2022, a estimativa da Taxa Interna de Retorno (TIR) dos investimentos em projetos fotovoltaicos, calculada pela EPE, tem aumentado significativamente, sobretudo nas instalações destinadas a residências remotas e estabelecimentos comerciais que operam em baixa tensão. Esses resultados indicam um maior retorno sobre o investimento ao longo do tempo. Note que, na Figura 6, AT e BT denotam Alta Tensão e Baixa Tensão, respectivamente.

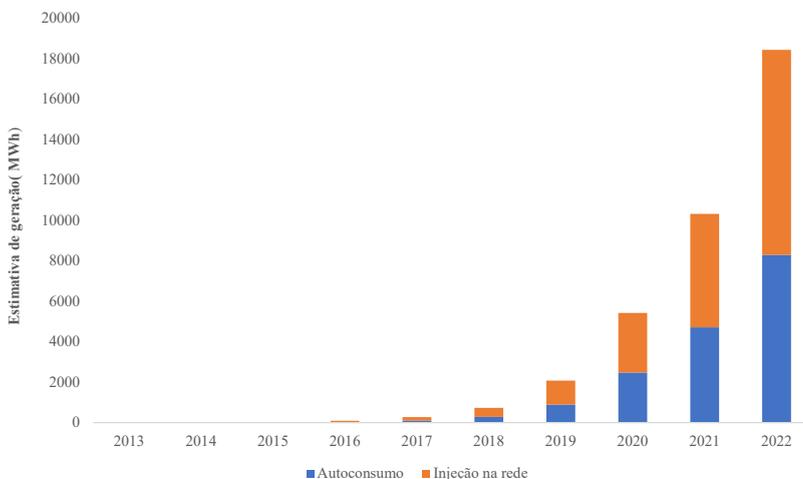


Figura 5 – Parcela de energia gerada alocada para autoconsumo e injetada na rede distribuidora, 2013 a 2022

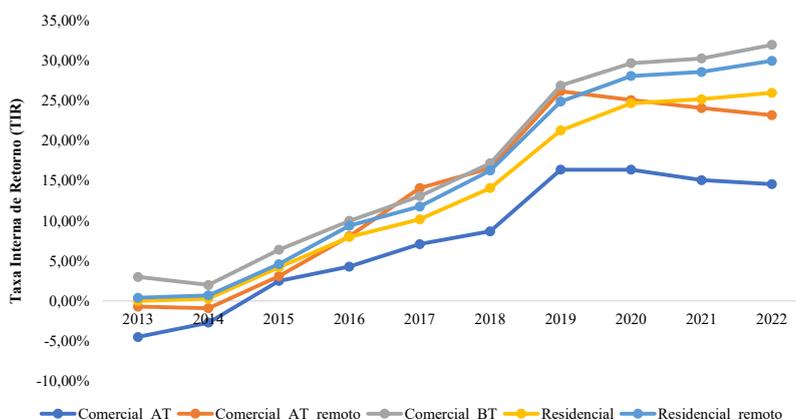


Figura 6 – Taxa Interna de Retorno de investimentos (TIR) em Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), 2013 a 2022, Brasil

Em resumo, o uso da Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD) está apresentando um crescimento significativo no Brasil, e tanto residências como estabelecimentos comerciais estão se beneficiando das regulamentações da ANEEL nº 482 e da Lei 14.300 para ter acesso a uma fonte de geração energia elétrica moderna e capaz de reduzir os custos energéticos. No entanto, é importante considerar que as medidas regulatórias, implementadas para acelerar a transição energética em direção a fontes renováveis, podem estar deixando para trás segmentos da população que não possuem recursos financeiros para investir em tecnologias, como energia solar fotovoltaica ou outras formas de MMGD, com o intuito de mitigar o aumento significativo dos custos energéticos nos últimos anos, conforme ilustrado na Figura 7, que foi elaborada usando dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Na figura, os valores nominais foram deflacionados usando o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) calculado pelo IBGE.

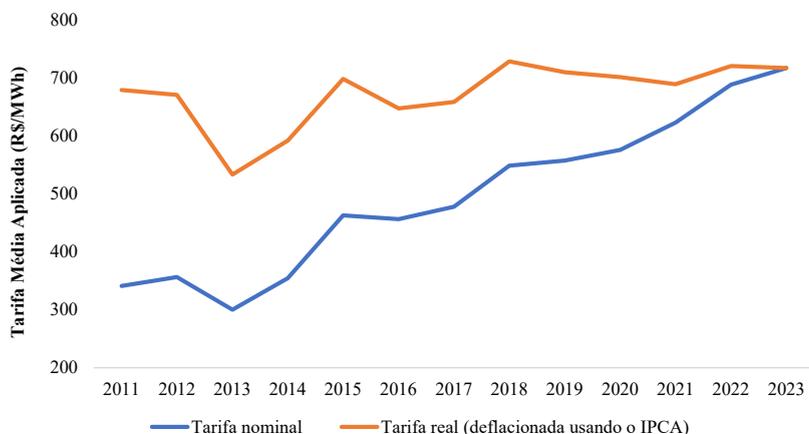


Figura 7 - Tarifa residencial média (valores nominais e reais, usando 2023 como ano base), 2011 a 2023, Brasil

#### 4. DESIGUALDADE REGIONAL DE POTÊNCIA E INVESTIMENTOS EM MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA (MMGD)

O índice de Gini é geralmente empregado para indicar a desigualdade de renda, mas estudos recentes da área têm usado esse indicador para medir a desigualdade energética (SCHLESEWSKY e WINTER, 2018); (ZHAO et al., 2022). Originalmente, o índice de Gini é uma medida que avalia a desigualdade na distribuição de renda em uma determinada população, numericamente variando de 0 a 1, sendo que 0 representa igualdade total e 1 desigualdade total. Para calculá-lo é necessário traçar a Curva de Lorenz, que compara a distribuição real de renda com uma distribuição perfeitamente igualitária. Essa curva mostra a porcentagem acumulada da renda total (eixo vertical) em relação à porcentagem acumulada da população (eixo horizontal). A linha diagonal representa igualdade absoluta, enquanto a curva de Lorenz mostra a desigualdade real. Matematicamente, o índice de Gini é calculado pela razão entre a área entre a linha de igualdade e a curva de Lorenz e a área total abaixo da linha de igualdade. Neste estudo, calcula-se o índice de Gini para medir o nível de disparidade que existe entre municípios e regiões do país em termos de potência instalada e investimento financeiro em MMGD (GASTWIRTH, 1972).

A Figura 8 mostra a evolução de desigualdade de potência instalada e investimento em MMGD no Brasil, de 2013 a 2022. Os valores similares observados do índice de Gini para a potência instalada e o investimento ao longo de todo período ocorrem porque as duas medi-

das são altamente correlacionadas. O aumento expressivo da desigualdade de 2013 a 2015 é devido ao baixo número de sistemas de MMGD instalados em todo país. Não obstante, o aumento da desigualdade de investimento e capacidade instalada é perceptível ao longo de todo período tanto em nível estadual, regional quanto no país como todo (Figuras 8-10).

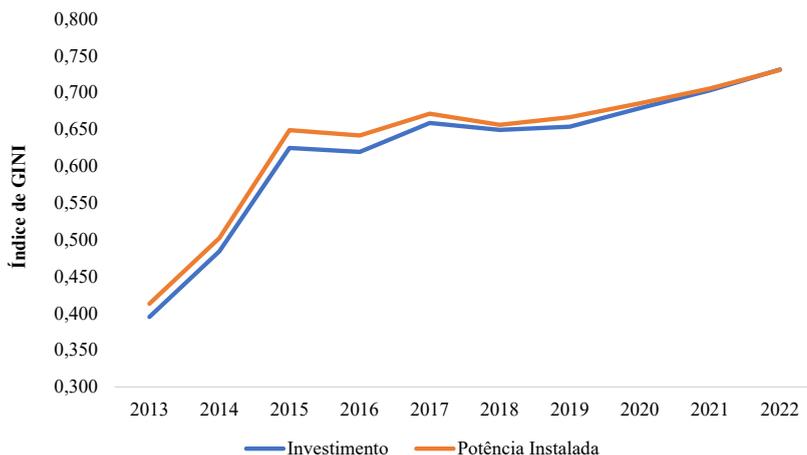


Figura 8 – Evolução do nível de desigualdade de potência instalada e investimento em Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), 2013 a 2022, Brasil

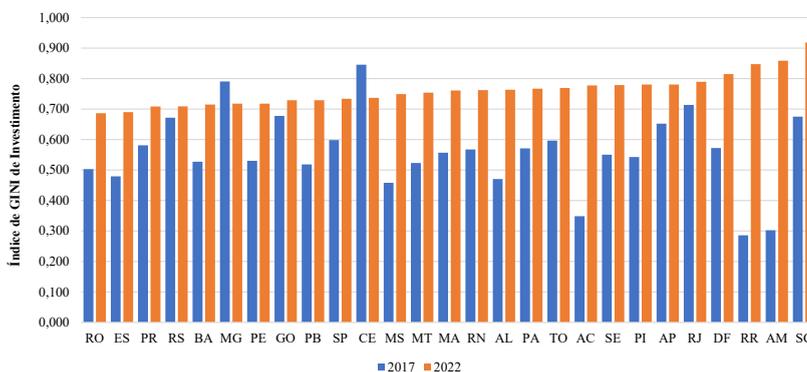


Figura 9 – Evolução do nível de desigualdade de investimento em Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD) por Unidade Federativa (UF), 2017 e 2022

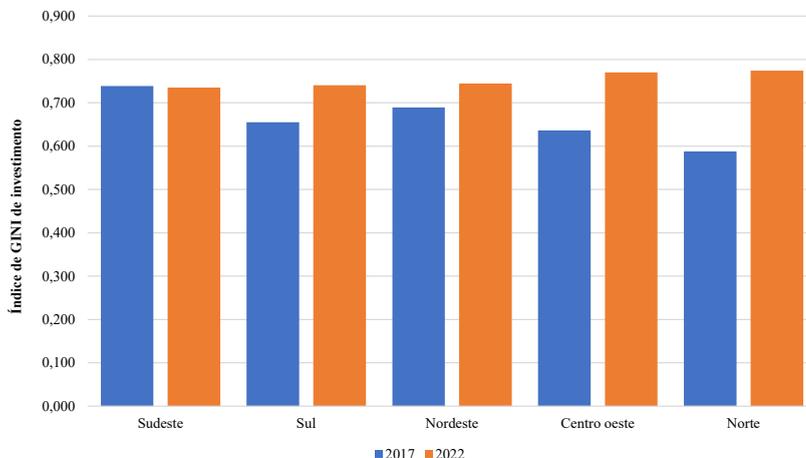


Figura 10 – Evolução do nível de desigualdade de investimento em Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD) por região, 2017 e 2022

## 5. DISCUSSÃO SOBRE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESIGUALDADE ENERGÉTICA

A pobreza energética se refere à falta de acesso à energia barata e confiável, enquanto a desigualdade energética se refere à distribuição desigual do acesso a recursos energéticos, infraestrutura e serviços entre regiões, setores e grupos da população (VOLODZKIENE e STREIMIKIENE, 2023). A literatura sobre a importância de levar em conta as desigualdades socioeconômicas no planejamento da transição energética é crescente, porém ainda focada na experiência de países do norte global (AWAWORYI et al., 2021); (CARLEY e KONISKY, 2020); (KASHOUR, 2023); (OSWALD et al., 2020); (SINHA et al., 2022); (TORRES CONTRERAS, 2020). Existe também evidência a nível global de que a redução de pobreza energética é eficaz para reduzir a desigualdade de renda (ACHEAMPONG et al. 2021). No entanto, o aumento do uso de fontes modernas e limpas de energia devido ao movimento crescente de transição energética tem gerado aumento da desigualdade de renda ao redor do mundo, principalmente devido à desarticulação de políticas de transição energéticas das desigualdades socioeconômicas e regionais pré-existentes (ACHEAMPONG et al. 2021). Este aumento da desigualdade energética em vários países do mundo pode aumentar o risco desses países entrarem em um ciclo vicioso de pobreza energética (SINHA et al., 2022).

Estudos apontam que o modelo de transição energética adotado na União Europeia negligencia a desigualdade regional de consumo

energético de domicílios (DUDOIS e MEIER, 2016); (BOUZAROVSKI e TIRADO-HERRERO, 2017); (KASHOUR, 2023). Consequentemente, esse modelo arrisca perpetuar as desigualdades estruturais pré-existent (CARLEY e KONISKY, 2020). Analisando o caso da Polônia, os subsídios governamentais implementados para promover o uso de fontes termais limpas obtiveram sucesso para melhorar a qualidade do ar em domicílios. No entanto, estudos alertam sobre potencial retrocesso no nível de desigualdade já que a definição dos subsídios não levou em conta a renda e necessidades dos domicílios (FRANKOWSKI e HERRERO, 2021). Similarmente, há evidência que desigualdade regional e a produção independente de energia, predominantemente por domicílios com renda elevada, são determinantes-chave da desigualdade energética na Alemanha (SCHLESEWSKY e WINTER, 2018).

Quanto à evidências na Ásia, a transição energética ocorre de forma desigual no Vietnã, sendo que domicílios pobres e de minorias dependem expressivamente de fontes tradicionais de energia, como carvão e biomassa (NGUYEN et al., 2019). Ademais, a pobreza energética reduziu, mas o custo energético aumentou, acentuando a vulnerabilidade de domicílios pobres (NGUYEN et al., 2019). Na Indonésia, as ações governamentais implementadas para promover a transição energética focaram excessivamente em iniciativas e projetos privados de grande escala, negligenciando as iniciativas modestas de pequenas comunidades (SETYOWATI, 2021). Tal viés aprofundou e regionalizou a desigualdade energética, além de enfraquecer comunidades vulneráveis (SETYOWATI, 2021). De modo similar, usando o indicador de Gini, estudos encontraram que a alta desigualdade no uso de sistemas fotovoltaicos e eólicos entre regiões da China se deve às disparidades regionais em termos do conhecimento técnico e gastos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) (ZHAO et al., 2022).

Considerando todas as fontes de energia, estudos reportaram que a desigualdade no consumo de energia apresenta uma tendência de redução no mundo como todo. No entanto, no tocante do consumo de eletricidade gerada por fontes renováveis, a Europa, Ásia Central, Ásia Oriental e Pacífico têm maior nível de desigualdade comparado com América do Norte e América Latina. Ademais, a desigualdade energética deteriora o meio ambiente e os países democráticos obtiveram maior sucesso em melhorar a qualidade do meio ambiente entre 1995 e 2018. Por exemplo, em La Venta, no México, o fomento e expansão da geração com energia eólica acentuou a desigualdade entre residente detentores de terra e aqueles sem-terra, causando mudanças nas dinâmicas sociais e econômicas locais (YAO et al., 2020).

Na América Latina e, especificamente no Brasil, existem poucos estudos empíricos que investigam o efeito da transição energética sobre a desigualdade energética. Não obstante, diversos estudos discursivos já ressaltaram a importância de considerar peculiaridades

e assimetrias regionais que são determinadas por fatores técnicos, sociais, econômicos, políticos e ambientais ao planejar a transição energética, sobretudo em países em desenvolvimento. No entanto, a evolução tecnológica é insuficiente para garantir o sucesso desses países na segurança energética, no Brasil e em vários países em desenvolvimento (GIMENES et al., 2021). Isso ocorre porque, mesmo com o acesso universal à energia no Brasil, muitos domicílios em situação de vulnerabilidade econômica não conseguem arcar com os custos crescentes da eletricidade e, conseqüentemente, enfrentam interrupção energética (CASTRO, 2017); (MATOS, 2008).

Existem diversas ações governamentais para promover o acesso a fontes modernas e sustentáveis de energia em domicílios em situação de vulnerabilidade econômica, ou em áreas rurais remotas. Entre essas, o Programa Luz Para Todos (LPT), o Programa Mais Luz Amazonas (MLA) e a instalação de microgeradores em casas do Programa Minha Casa Minha Vida. Estudos mostram que tanto o LPT como o MLA avançaram a universalização do acesso à energia elétrica no Brasil, sobretudo de fonte limpa e renovável para as áreas remotas (FERREIRA e SILVA, 2021). No entanto, existem lacunas que limitam a sustentabilidade desse acesso como, por exemplo, o atendimento da demanda produtiva local além da demanda residencial, maior envolvimento de comunidades locais na concepção e implementação do programa, o aperfeiçoamento do planejamento espacial e logístico do programa, e maior articulação do programa MLA com outros programas sociais (FERREIRA e SILVA, 2021). Em contraste, há também evidência que a articulação do LPT com outros programas sociais em Ribeirão, no Amazonas, garantiu tanto acesso à energia como a melhoria de diversos aspectos socioeconômicos da comunidade (GUIMARÃES, 2021). Não obstante, estes estudos estão de acordo que o programa LPT precisa ser melhor articulado com os interesses locais e não com interesses hegemônicos do mercado e do capital (FERREIRA e SILVA, 2021); (GUIMARÃES, 2021). Vale ressaltar também que existem estudos que demonstram preocupações sobre as mudanças estruturais causadas nas relações interpessoais nas comunidades tradicionais do Amazonas pela expansão de acesso de energia (ALMEIDA; ALVES, 2016).

No tocante à sinergia entre programas sociais com o plano de transição energética, o governo implementou o projeto de instalar sistema de energia e aquecimento solar nas unidades habitacionais criadas pelo Programa Minha Casa Minha Vida. Cerca de 80% dos beneficiários deste programa, entrevistados em cinco estados, reportaram estar satisfeitos com o sistema de aquecimento solar, principalmente pela redução de custos energéticos (ARREGUY et al., 2014). De maneira similar, outros estudos reportaram que os Micro e Minigeradores Distribuídos (MMGD), especialmente baseados em energia fotovoltaica

ca, instalados nas unidades habitacionais do mesmo programa, demonstraram ser benéfico não somente para reduzir os custos, mas também para promover o exercício de cidadania e cooperativismo entre membros da comunidade local (MELO et al., 2018); (SOUZA e FERREIRA, 2019).

Todos os estudos revisados nesta seção estão em consenso sobre um ponto: para realizar uma transição justa e sustentável é necessário implementar políticas desenhadas conforme as peculiaridades e estruturas socioeconômica e regional de tal forma que as desigualdades já existentes possam ser mitigadas, e não acentuadas. Há avanço no Brasil neste sentido, pela implementação de programas como Luz para Todos e Mais Luz para Amazonas; instalação de aquecedores e energia solar em unidades habitacionais do programa Minha Casa Minha Vida e, mais recentemente; a instituição legal do Programa de Energia Renovável Social (PERS).

## 6. CONCLUSÃO

A combinação da alta desigualdade socioeconômica, custos elevados de instalação e a predominância do setor privado nos investimentos em energia solar e eólica geram um cenário propício para acentuar e perpetuar as desigualdades, ameaçando um retrocesso no desenvolvimento, uma vez que grande parte da população fica excluída dos benefícios proporcionados pela Lei 14.300 de MMGD. É importante ressaltar que essa perspectiva de análise muitas vezes é negligenciada na visão macroeconômica que enfatiza, principalmente, o incentivo à transição energética no setor privado e à sustentabilidade ambiental.

Este estudo mostra que a Lei 14.300 gerou um crescimento notável na instalação e utilização de sistemas de energia renovável no setor privado do país, sobretudo solares fotovoltaicos. Isso significa que tanto residências como estabelecimentos comerciais conseguiram reduzir expressivamente o custo de energia ao longo do período, além de garantir descontos cumulativos em gastos futuros através dos créditos de energia.

Usando o índice de Gini, o estudo também mostrou que existe um alto nível de desigualdade de potência instalada e nível de investimento em MMGD entre estados e regiões do país. A partir dessas análises, esse estudo destaca os desafios de desenvolvimento decorrentes dessa Lei, considerando o contexto de aumento crescente das tarifas energéticas para residências e as desigualdades estruturais existentes em nível residencial, setorial e regional.

Para estudos futuros, recomenda-se a investigação empírica dos determinantes da desigualdade energética regional do uso de sistemas MMGD, considerando variáveis econômicas, sociais e regionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHEAMPONG, A. O.; DZATOR, J.; SHAHBAZ, M. Empowering the powerless: does access to energy improve income inequality? *Energy Economics*, vol. 99, p. 105288, 2021. .

ALMEIDA, M. G.; ALVES, A. Potenciais de Transformações entre Populações Tradicionais: Um estudo sobre o Programa Luz para todos no Meio Rural na Amazônia. *Revista Diálogos*, vol. 16, no. 1, p. 209–243, 2016. .

ARREGUY, E. G.; PEREIRA, E. M. D.; MOTTA, M. L. A. O Aquecimento Solar no Programa Minha Casa Minha Vida Pesquisa de Benefícios. 2014. Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS [...]. [S. l.: s. n.], 2014.

AWAWORYI CHURCHILL, S.; IVANOVSKI, K.; MUNYANYI, M. E. Income inequality and renewable energy consumption: Time-varying non-parametric evidence. *Journal of Cleaner Production*, vol. 296, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126306>.

BELLO, A.; LYRO, B.; PAIVA, G. GONZALEZ, G.; ARAÚJO, G.; LIMA, H.; SAMPAIO, L.; GUIMARÃES, P.; GUEDES, R.; MORAES, T.; TELLES, Y. Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil. [S. l.: s. n.], 2023.

BEN-EPE, {Empresa de Pesquisa Energética}. Balanço Energético Nacional. [S. l.: s. n.], 2022.

BOUZAROVSKI, S.; TIRADO HERRERO, S. The energy divide: Integrating energy transitions, regional inequalities and poverty trends in the European Union. *European Urban and Regional Studies*, vol. 24, no. 1, 2017. <https://doi.org/10.1177/0969776415596449>.

BRASIL. Lei No 14.300, de 6 de janeiro de 2022. (Promulgação partes vetadas) Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). 2022.

CARLEY, S.; KONISKY, D. M. The justice and equity implications of the clean energy transition. *Nature Energy*, vol. 5, no. 8, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0641-6>.

CASTRO, N. de. As Tarifas de Energia Elétrica no Brasil e em Outros Países: O Porquê das Diferenças. Rio de Janeiro (RJ): Fábrica de Livros, 2017.

DE MELO, L. S.; MEDEIROS, M. V. B.; BRITO, N. S. D.; SIMÕES, M. C. S. DE SOUZA, L. L.; DINIZ, D. S. Impactos sociais da geração distribuída fotovoltaica no programa minha casa minha vida em Juazeiro/BA. 2018. Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS [...]. [S. l.: s. n.], 2018.

DUBOIS, U.; MEIER, H. Energy affordability and energy inequality in Europe: Implications for policymaking. *Energy Research and Social Science*, vol. 18, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.04.015>.

FERREIRA, A. L.; SILVA, F. B. Universalização do acesso ao serviço público de energia elétrica no Brasil: evolução recente e desafios para a Amazônia Legal. *Revista Brasileira de Energia*, vol. 27, no. 3, 2021. <https://doi.org/10.47168/rbe.v27i3.645>.

FRANKOWSKI, J.; HERRERO, S. T. “What is in it for me?” A people-centered account of household energy transition co-benefits in Poland. *Energy Research & Social Science*, vol. 71, p. 101787, 2021.

GASTWIRTH, J. L. The estimation of the Lorenz curve and Gini index. *The review of economics and statistics*, , p. 306–316, 1972.

GIMENES, C. M.; BENAGES, G. N. de C. B. Desafios e caminhos à sustentabilidade energética: o paradigma energético atual e os desafios do acesso universal e sustentável. In: RINALDI, Patrícia Nogueira (ed.). *Right to Development: Rise for All – FACAMP Model United Nations Study Guide 2021*. 1st ed. Campinas, São Paulo: Editora Facamp, 2021. p. 21–27.

GUIMARÃES, G. C. F.; OTHERS. Programa Luz para Todos e modo de vida ribeirinho na Amazônia. 2021. .

IBGE. Rendimento de todas as fontes 2020 - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNADC). Rio de Janeiro (rj): [s. n.], 2021. Available at: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101880\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101880_informativo.pdf).

KASHOUR, M. A step towards a just transition in the EU: Conclusions of a regression-based energy inequality decomposition. *Energy Policy*, vol. 183, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113816>.

MATOS, D. Custo da energia compromete crescimento. *Revista Conjuntura Econômica*, vol. 62, no. 10, p. 20–30, 2008.

NGUYEN, T. T.; NGUYEN, T. T.; HOANG, V. N.; WILSON, C.; MANAGI, S. Energy transition, poverty and inequality in Vietnam. *Energy Policy*, vol. 132, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.001>.

ONU. Ensuring access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all (session A/75/265). [S. l.: s. n.], 2020.

OSWALD, Y.; OWEN, A.; STEINBERGER, J. K. Large inequality in international and intranational energy footprints between income groups and across consumption categories. *Nature Energy*, vol. 5, no. 3, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0579-8>.

RAINERI, R.; DYNER, I.; GOÑI, J.; CASTRO, N.; OLAYA, Y.; FRANCO, C. Latin America Energy Integration: An Outstanding Dilemma. *Evolution of Global Electricity Markets: New Paradigms, New Challenges, New Approaches*. [S. l.: s. n.], 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397891-2.00014-6>.

RINALDI, P. N.; MACHADO, R. S.; PONTES, R. M. Right to development rise for all: study guide FACAMP model United Nations. Campinas, São Paulo: Facamp Editora, 2021.

SCHLESEWSKY, L.; WINTER, S. Inequalities in energy transition: The case of network charges in Germany. *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 8, no. 6, 2018. <https://doi.org/10.32479/ije-ep.6917>.

SETYOWATI, A. B. Mitigating inequality with emissions? Exploring energy justice and financing transitions to low carbon energy in Indonesia. *Energy Research and Social Science*, vol. 71, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101817>.

SINHA, A.; BALSALOBRE-LORENTE, D.; ZAFAR, M. W.; SALEEM, M. M. Analyzing global inequality in access to energy: Developing policy framework by inequality decomposition. *Journal of Environmental Management*, vol. 304, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114299>.

SOUZA, T. M.; FERREIRA, M. E. M. Desafios da energia fotovoltaica e ações de sustentabilidade para o programa habitacional "Minha Casa, Minha Vida." *BIOFIX Scientific Journal*, vol. 4, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.5380/biofix.v4i1.62878>.

TORRES CONTRERAS, G. A. Two decades under windmills: Energy transition and entrenched inequalities in La Venta, Mexico. [S. l.]: UNRISD Occasional Paper-Overcoming Inequalities in a Fractured World~..., 2020.

VOLODZKIENE, L.; STREIMIKIENE, D. Energy Inequality Indicators: A Comprehensive Review for Exploring Ways to Reduce Inequality. *Energies*, vol. 16, no. 16, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16166075>.

YAO, X.; YASMEEN, R.; HAQ PADDA, I. U.; HASSAN SHAH, W. U.; KAMAL, M. A. Inequalities by energy sources: An assessment of environmental quality. PLoS ONE, vol. 15, no. 3, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230503>.

ZHAO, G.; ZHOU, P.; WEN, W. What cause regional inequality of technology innovation in renewable energy? Evidence from China. Applied Energy, vol. 310, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118464>.

## FUTURO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

Maria Ludmilla Campos de Moraes<sup>1</sup>  
Érico Veras Marques<sup>1</sup>  
Jocildo Figueiredo Correia Neto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará

DOI: 10.47168/rbe.v30i2.866

### RESUMO

A análise da Matriz Elétrica Brasileira (MEB) despertou o interesse acadêmico após a crise hídrica de 2001, quando o governo federal, a iniciativa privada e a sociedade foram obrigadas a buscar alternativas para solucionar o problema. Essa crise hídrica no fornecimento de energia elétrica no Brasil resultou da composição eminentemente hidráulica da MEB, sujeita às condições climáticas. Apesar de ser fortemente renovável, a MEB apresenta característica não sustentável, por não garantir o atendimento da demanda do país nos períodos de estiagem. Diante desse contexto, a presente pesquisa investigou como se configura o futuro da MEB na perspectiva de profissionais ligados a esse setor. Para tanto, utilizou-se o método misto, envolvendo tanto o uso de dados quantitativos quanto qualitativos. A coleta dos dados deu-se em duas etapas: inicialmente, um *survey*, utilizando um questionário estruturado, com profissionais que atuam no setor de energia, e, posteriormente, entrevistas semiestruturadas com questões abertas formuladas a especialistas do setor, considerados de “notório saber”. O tratamento dos dados foi realizado por meio de estatística descritiva e de análise de conteúdo. Concluiu-se que o Brasil, assim como o restante do mundo, tem o olhar voltado para a transição energética por se tratar de um momento desafiador para a humanidade. Também ficou claro que o mesmo contexto está direcionando a MEB para a implantação de parques eólicos *offshore*, a disseminação da fonte solar por geração distribuída e a produção de hidrogênio verde em larga escala. O estudo contribui com o setor elétrico brasileiro por apresentar uma análise da composição da MEB, bem como descrever os fatores que favorecem e dificultam a sua transformação em uma matriz elétrica sustentável do ponto de vista do fornecimento de energia.

Palavras-chave: Matriz elétrica; Matriz energética; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The analysis of the Brazilian Electrical Matrix (BEM) aroused academic interest after the 2001 water crisis, when the federal government, the private sector and society were forced to look for alternatives to solve the problem. This water crisis in the supply of electricity in Brazil resulted from the eminently hydraulic composition of the BEM, subjected to climatic conditions. Despite being strongly renewable, BEM presents an unsustainable characteristic, as it does not guarantee the fulfillment of the country's demand during dry periods. Given this context, this research investigated how the future of BEM is shaped from the perspective of professionals who have knowledge about this industry. To this end, the mixed method was used, involving both the use of quantitative and qualitative data. Data collection took place in two stages: initially, a survey, using a structured questionnaire, with professionals who work in the energy industry, and, subsequently, semi-structured interviews with open questions to experts considered to have "recognized knowledge". Data processing was carried out using descriptive statistics and content analysis. It was concluded that Brazil, like the rest of the world, is focusing on the energy transition as it is a challenging time for humanity. It also became clear that the same context is directing BEM towards the implementation of offshore wind farms, the dissemination of solar sources through distributed generation and the production of green hydrogen on a large scale. The study contributes to the Brazilian electricity industry by presenting an analysis of the composition of the BEM, as well as describing the factors that favor and hinder its transformation into a sustainable electrical matrix from the point of view of energy supply.

Keywords: Electrical matrix; Energy matrix; Sustainability.

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores do crescimento econômico de um país é o fornecimento de energia elétrica. Segundo Pereira e Silva Neto (2020), não se gera desenvolvimento econômico e há aumento da qualidade de vida da sociedade sem o fornecimento energético compatível com os níveis de crescimento. Os países desenvolvidos e aqueles em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, vêm estudando como planejar e implementar matrizes elétricas, que, simultaneamente, sejam sustentáveis do ponto de vista do fornecimento de energia elétrica e que não sejam poluentes.

Estudos desenvolvidos por Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007), Bronzatti e Iarozinski Neto (2008), Carvalho (2009), Oliveira (2017), Costa (2017), Raimundo et al. (2018), Brito et al. (2019), Krell

e Souza (2020), Pereira e Silva Neto (2020, 2021) e Reichert e Souza (2021) constataram que a Matriz Elétrica Brasileira (MEB) é eminentemente hídrica. Tal fonte não é sustentável, pois, em períodos de estiagem, sua geração é comprometida, tornando-se necessário buscar alternativas de geração complementar, como, por exemplo, o uso de termelétricas. Ademais, a fonte hídrica, apesar de ser renovável, não se constitui propriamente uma fonte limpa, devido à extensão de degradação que provoca na fauna e na flora.

Pascon (2021) afirma que o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDEE) não está alinhado à necessidade de prover segurança e confiabilidade ao fornecimento de energia elétrica a custo baixo. O autor ainda acredita que o quadro hidrológico brasileiro sinaliza fadiga por apresentar reduzido volume de chuva, impactando o subsistema Sudeste/Centro-Oeste, responsável por 70% da capacidade de armazenamento do mercado energético nacional.

Diante disso, é importante identificar as políticas públicas que vêm orientando a configuração da MEB na visão de especialistas do setor de energia pela ótica da sustentabilidade, tanto no aspecto ambiental, quanto na garantia de fornecimento, e pela ótica renovável, ou seja, na capacidade do recurso de se renovar. Portanto, a questão para desenvolvimento desta pesquisa é: como se configura o futuro da MEB sob as óticas renovável e sustentável?

Para que a questão de pesquisa seja respondida, tem-se como objetivo geral analisar a percepção dos especialistas do setor sobre o futuro da MEB, nas dimensões renovável e sustentável. Com vistas a atender ao objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: (1) analisar os marcos regulatórios para o setor; (2) analisar as políticas de diversificação da matriz; (3) mapear as estratégias para uma matriz renovável; (4) mapear as estratégias para uma matriz sustentável; e (5) identificar as características da matriz elétrica para o futuro.

Quanto aos fins, a pesquisa tem caráter descritivo. Quanto à natureza, a pesquisa caracteriza-se como método misto, pois utiliza abordagens qualitativa e quantitativa (CRESWELL e CRESWELL, 2020). A coleta foi feita por meio de dados primários em duas etapas: aplicação de questionário estruturado e realização de entrevistas. O questionário, baseado em indicadores que caracterizam uma matriz elétrica renovável e sustentável, foi encaminhado para profissionais que atuam no setor de energia. As entrevistas, cujos roteiros foram baseados nos mesmos indicadores, foram realizadas com especialistas qualificados e reconhecidamente de “notório saber” sobre o setor elétrico. Os dados foram tratados por meio de análise de conteúdo e de estatística descritiva.

Este estudo está estruturado em cinco seções. A primeira é esta introdução, contendo o contexto, o problema de pesquisa e os

objetivos do estudo. A segunda seção apresenta o referencial teórico que embasa o assunto sustentabilidade, trazendo um breve histórico da evolução do setor elétrico brasileiro (SEB), ressaltando as fontes da Matriz Elétrica Brasileira, apresentando os principais marcos regulatórios do setor e finalizando com estudos empíricos anteriores. A terceira seção aborda os aspectos metodológicos, com destaque para a tipologia da pesquisa, o campo da pesquisa, os procedimentos e instrumentos de coleta de dados e as questões relativas à análise dos dados. A quarta seção apresenta a análise dos resultados e, finalmente, apresenta-se a última seção, que contém as considerações finais.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são apresentados os conceitos que fundamentaram a realização do presente estudo, iniciando-se com a discussão sobre sustentabilidade, e especificando-se o desenvolvimento e a relação da sustentabilidade com a energia. Em seguida, é discutida a evolução histórica da Matriz Elétrica Brasileira (MEB), distinguindo-se as principais fontes energéticas no país, e elucidando-se os marcos regulatórios do setor. Ao fim, são destacados os estudos acadêmicos anteriores publicados sobre a MEB.

### 2.1 Sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade surgiu na Alemanha, e foi definido com o termo *nachhaltigkeit*, em 1713, originado da preocupação de se preservar os recursos naturais das florestas com foco na manutenção da fertilidade do solo, e, posteriormente, garantir o extrativismo florestal sem comprometer as gerações futuras (WIERSUM, 1995). Para se considerar algo sustentável, deve-se analisar a necessidade de consumo atual, projetar a necessidade futura de consumo e relacionar a forma como os recursos eram usados no passado, como estão sendo usados no presente e como serão usados futuramente (MARIANO et al., 2016). Como o conceito é definido de forma ampla, fica propenso a interpretações diversas, o que cria potencial para mal-entendidos (WIERSUM, 1995).

Para Gibson (2001, p. 9), “a sustentabilidade surgiu como três coisas: uma crítica, um conjunto de princípios que implicam objetivos positivos e um foco para estratégias de mudança”. O autor alega que a degradação ambiental contínua levaria não apenas ao esgotamento de recursos locais e a danos às funções ecológicas essenciais, mas também a efeitos globais cumulativos. Ele concluiu que o crescimento da população mundial apontava para um futuro preocupante, em um mundo que poderia não suprir as necessidades de toda a população.

O *Brundtland Report Our Common Future* (BRUNDTLAND,

1987) aborda duas preocupações que devem convergir: desenvolvimento (curto prazo) e meio ambiente (longo prazo). Especificamente, a sustentabilidade costuma ser considerada em três dimensões: social, econômica e ambiental. A ideia de sustentabilidade em três dimensões derivou do conceito *Triple Bottom Line* (ELKINGTON, 1997; KUHLMAN e FARRINGTON, 2010). Sob esse enfoque, o desenvolvimento sustentável deve respeitar a economia, o meio ambiente e a sociedade, estabelecendo metas de desenvolvimento para cada uma dessas três dimensões, de forma integrada e simultânea.

### 2.1.1 Desenvolvimento sustentável

No início da década de 1950, o conceito de desenvolvimento limitava-se à ideia de crescimento econômico, entendendo-se então que o desenvolvimento só ocorreria se houvesse crescimento econômico. Na década de 1970, constatou-se que a alta taxa de crescimento alcançada pelos países ocidentais não necessariamente se refletia em desenvolvimento, e ainda causava efeitos negativos para a humanidade e para o meio ambiente. Isso levou ao surgimento do conceito de desenvolvimento sustentável (UDEMBA e TOSUN, 2022).

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu no início da década de 1970, com o nome “ecodesenvolvimento”, derivado da relação entre crescimento econômico e meio ambiente, após a publicação do Relatório do Clube de Roma, que pregava crescimento zero para evitar uma catástrofe ambiental (MAY et al., 2003). Segundo May, Lustosa e Vinha (2003), na tentativa de decodificar o *Brundtland Report*, identificam-se duas correntes sobre as interpretações para os preceitos ali explicitados. A primeira é a sustentabilidade fraca, em que não são reconhecidas as características de certos recursos naturais, e, pelo fato destes não serem produzidos, não poderem ser substituídos pelo homem. A segunda é a sustentabilidade forte, em que o progresso tecnológico é essencial para aumentar a eficiência na utilização dos recursos, sejam eles renováveis ou não. Entende-se, portanto, que as correntes divergem na forma como os recursos são utilizados.

O movimento, que acontece elegendo o desenvolvimento sustentável como base para orientar a relação do ser humano com o meio ambiente, vem impactando todos os países na construção dos postulados referentes ao assunto. Ademais, determina a elaboração da legislação ambiental dentro e fora do Brasil (PAPP, 2019).

Em 2015, chefes de estado e de governo se reuniram na sede das Nações Unidas para deliberar sobre os novos objetivos globais de desenvolvimento sustentável com agenda até 2030. O fórum em questão elaborou o documento “Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”, o qual reúne 17 objetivos

e 169 metas, contemplando as três dimensões do desenvolvimento sustentável (econômica, social e ambiental). Os objetivos e metas entraram em vigor em 1º de janeiro de 2016 e orientam as decisões até o ano 2030.

### 2.1.2 Desenvolvimento de energia sustentável

Tomando-se por base a relação entre desenvolvimento e a oferta de energia (KRISTJANPOLLER et al., 2018; KRELL e SOUZA, 2020), surge a necessidade de se discorrer conceitualmente sobre desenvolvimento de energia sustentável.

A Agência Internacional de Energia define energias renováveis como aquelas derivadas de processos naturais que, diferentemente dos combustíveis fósseis, detêm a capacidade de se renovar permanentemente (BIZAWU e AGUIAR, 2016). Sob esse enfoque, para que haja desenvolvimento sustentável, deve-se considerar a penetração de fontes renováveis de energia como uma opção aos combustíveis fósseis (NEMET et al., 2016). Portanto, o desenvolvimento de energia sustentável considera aquelas fontes que apresentam a característica primária de se renovar.

Na década de 1970, com a ameaça de escassez de petróleo, a preocupação com energia estava ligada unicamente ao fornecimento desse insumo para os meios produtivos. A partir dos anos 1980, as grandes nações compreenderam que, na verdade, o principal problema da oferta e consumo de energia estava ligado à preservação do meio ambiente (MAY et al., 2003). Os recursos de energia renovável são utilizados há milhões de anos, mas a noção da utilização e da gestão sustentáveis desses recursos é relativamente nova (GUNNARSDOTTIR et al., 2020).

As questões ligadas ao desenvolvimento de energia sustentável evoluíram e mudaram ao longo do tempo, espelhando o que ocorreu em relação ao desenvolvimento sustentável. Em princípio, focava-se na redução das emissões de gases de efeito estufa e da melhoria da qualidade do ar. Atualmente, o desenvolvimento de energia sustentável foca, também, os três pilares do desenvolvimento sustentável: economia, sociedade e meio ambiente. Portanto, o papel que a energia desempenha na promoção do crescimento econômico e do desenvolvimento social considera o aumento da demanda de energia e o esgotamento de fontes de combustíveis fósseis, a eficiência energética e uma transição para fontes renováveis (GUNNARSDOTTIR et al., 2021).

Os três pilares de sustentabilidade estabelecem inúmeros desafios ao processo decisório, porque devem ser representados no planejamento energético e abordar realidades como mudança climática e escassez de recursos. Os desafios são potencializados, já que a socie-

dade moderna tende a estimular o crescimento econômico, em detrimento do meio ambiente (GUDLAUGSSON et al., 2020).

No caso do Brasil, dada a maior participação de fontes renováveis não despacháveis na matriz elétrica, o Operador Nacional do Sistema (ONS) precisará de um planejamento mais complexo para transição da MEB. Entretanto, tal dificuldade pode estimular a busca por soluções de armazenamento de energia como opção para garantir a segurança do sistema (REICHERT e SOUZA, 2021). O principal benefício da diversificação da matriz elétrica será reduzir a geração de energia elétrica por fontes hídricas e térmicas, as quais, em 2020, representavam respectivamente 62,5% e 24,6% da capacidade instalada no país.

Importante ressaltar que fontes despacháveis são aquelas em que é possível controlar a geração de energia elétrica e existe a possibilidade de armazenamento, provendo eletricidade conforme a demanda. São exemplos de fontes despacháveis: hidrelétrica, biomassa, biogás e combustíveis fósseis.

É importante que aqueles que definem os diferentes programas de energia, políticas, estratégias e planos alternativos com vistas ao desenvolvimento do país trabalhem para tornar o desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, foram criados indicadores com o objetivo de comunicar dados relativos a questões de energia e desenvolvimento sustentável aos que formulam as políticas e ao público, além de promover o diálogo institucional. Os indicadores também podem ser usados para monitorar o avanço das políticas anteriores e verificar as estratégias reais de futuro desenvolvimento sustentável (VERA et al., 2005).

### 2.1.3 Indicadores de energia para o desenvolvimento sustentável

Segundo Gunnarsdottir et al. (2020), indicadores de sustentabilidade cuidadosamente selecionados podem fornecer informações valiosas para monitorar o progresso e informar políticos. Os autores classificam os indicadores por três óticas: (1) estrutura de cadeia causal, significando que é possível estruturar um problema em relações de causalidade, e, portanto, identificar causas e efeitos; (2) estrutura temática, significando tipos de estruturas comumente usadas e frequentemente associadas a metas políticas, utilizados no desenvolvimento de conjuntos de indicadores nacionais; e (3) estrutura da dinâmica do sistema, significando que por meio de uma abordagem sistêmica é possível investigar a dinâmica complexa do desenvolvimento de energia sustentável, bem como observar como afetam a entrega de resultados.

Gunnarsdottir et al. (2020) identificaram as características dos conjuntos de indicadores para o desenvolvimento de energia sustentá-

vel. De acordo com essa análise, a adequação dos conjuntos de indicadores existentes varia consideravelmente. No entanto, um conjunto de indicadores, denominado Indicadores de Energia para o Desenvolvimento Sustentável (IEDS), atendeu a todos os critérios de avaliação estabelecidos, podendo ser considerado abrangente e robusto, além de garantir que as três dimensões do desenvolvimento sustentável sejam consideradas. Os autores afirmam que o IEDS visa possibilitar que os países avaliem seu progresso em direção ao desenvolvimento de energia sustentável, sem necessidade de comparar seus avanços com os de outros países.

O IEDS está, portanto, classificado nas três dimensões (social, econômica e ambiental), e, na versão final, reúne 30 indicadores. Estes são ainda distribuídos em sete temas, que por sua vez são subdivididos em 19 subtemas.

O IEDS na dimensão social mede o impacto que os serviços de fornecimento de energia causam ao bem-estar social. Quando o fornecimento de energia não está disponível e acessível a todos, acarreta pobreza, desemprego, impacta a educação, o desenvolvimento comunitário e a cultura, a transição demográfica, poluição e impactos à saúde.

O IEDS econômico mede como os padrões de consumo e oferta de energia, bem como a qualidade dos serviços no fornecimento de energia, afetam o avanço do desenvolvimento econômico, e como a situação do setor de energia no país pode melhorar as chances de desenvolvimento econômico sustentável a longo prazo.

O IEDS ambiental mede o impacto dos sistemas de geração de energia no meio ambiente, com o objetivo de determinar as tendências, sejam positivas ou negativas, na qualidade da terra, da água (rios e oceanos) e do ar.

É importante destacar que há outros indicadores utilizados, tais como o *energy trilema index* e o *energy architecture performance index*. Porém, estes não avaliam precisamente a situação do país quanto ao desenvolvimento de energia sustentável, pois comparam os países desconsiderando diferentes fontes de energia, disponibilidade das fontes e nível de industrialização. Como o IEDS considera as três dimensões que abrangem a sustentabilidade e leva em conta as condições de energia existentes no país avaliado, espera-se que o resultado seja mais robusto e permita melhor tomada de decisão para as políticas de desenvolvimento de energia sustentável.

## 2.2 Breve histórico da MEB

Para identificar e analisar a composição da Matriz Elétrica Brasileira (MEB), faz-se necessário percorrer a história da eletricidade no país, com o objetivo de entender a evolução e o planejamento.

No Brasil a história da energia elétrica teve início em 1879, por meio da concessão que D. Pedro II fez a Thomas Alva Edson para implantar o serviço de iluminação pública no Rio de Janeiro, quando foi inaugurada a Estação Central da Estrada de Ferro D. Pedro II, atual Central do Brasil (JANNUZZI, 2007). A geração de energia elétrica começou com investimentos oriundos de proprietários de indústrias que precisavam garantir o fornecimento de eletricidade para suas produções. Com esse objetivo, em 1883 foi instalada em Campos-RJ a primeira unidade de geração de energia elétrica, uma usina termelétrica. Em 1889, entrou em operação a Usina Marmelos Zero, a primeira hidrelétrica de grande porte no país. Em 1899, o grupo *Light* instalou-se no Brasil, inicialmente em São Paulo, e posteriormente no Rio de Janeiro, resultado da disponibilidade de recursos estrangeiros para investimentos. Em 1907, com a Usina São de Fontes, a maior do mundo na época, consolida-se o capital estrangeiro no setor (GOMES e VIEIRA, 2009; SILVEIRA, 2018).

Em 1934, Getúlio Vargas promulgou o Código de Águas, primeiro marco regulatório do setor elétrico no Brasil. Em 1939, com o início da II Guerra Mundial e a delicada situação econômica do país devido à evasão de capital estrangeiro, o governo federal criou o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE), responsável por todos os assuntos referentes ao setor elétrico. Iniciava-se, assim, o processo de instalação das grandes estatais para o fornecimento de energia elétrica (GOMES e VIEIRA, 2009). O setor elétrico brasileiro passou por duas grandes mudanças. Inicialmente financiada pelo capital estrangeiro, a MEB foi nacionalizada no processo de estatização que o governo conduziu a partir de 1964, com a criação das empresas federais de geração e das companhias estaduais de distribuição de energia elétrica. A segunda grande mudança deu-se com o processo de privatização, iniciado em 1995, revertendo o processo de nacionalização instalado anteriormente. Em 1996, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o objetivo de regular o setor elétrico, iniciando-se, portanto, o processo de divisão das atribuições da Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS) (GOMES e VIEIRA, 2009).

As privatizações acarretaram a implementação de uma série de medidas que alteraram profundamente o setor elétrico, portanto o governo federal criou em 1998 o Operador Nacional do Sistema (ONS), com o objetivo de realizar a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). A Eletrobras perdia mais uma atribuição (GOMES e VIEIRA, 2009).

Em 2004 foi criada a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), retomando o planejamento centralizado do setor. A EPE está vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), com o fim de realizar estudos e pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energé-

tico, que inclui energia elétrica, petróleo e derivados e gás natural, carvão mineral, fontes renováveis e eficiência energética. Ainda em 2004, foi criada e começou a operar a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), com o propósito de efetuar a contabilização e a liquidação financeira das operações realizadas no mercado de curto prazo (COSTA, 2017).

### 2.3 Fontes de geração de energia

Com base no que foi antes apresentado, este tópico apresenta as fontes de geração de energia elétrica disponíveis no país, elencando as respectivas especificidades.

A energia solar é responsável por boa parte das fontes de energia primária do planeta. Uma parcela da radiação solar fornece calor, outra forma os ventos, outra cria os potenciais hidráulicos dos rios (por evaporação e condensação) e outra forma as correntes marinhas. Os vegetais incorporam a radiação solar por meio da fotossíntese (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

Ao longo do tempo, a matéria orgânica oriunda dos restos de animais e plantas acumulou-se, formando as fontes fósseis de energia, a saber: petróleo, carvão mineral, gás natural e xisto betuminoso (GOLDEMBERG e LUCON, 2007). Além das fontes fósseis, são também fontes primárias de energia o urânio, o sol, o vento, os rios e mares, a biomassa e a geotérmica. As fontes primárias insumos para a energia final, como, por exemplo, a energia elétrica, denominada fonte secundária (CORREA e BENITE, 2019).

Portanto, energia pode ser obtida por meio da transformação de fontes primárias. O hidrogênio, por sua vez, é considerado fonte secundária, porque precisa ser produzido, e não é repostado pela natureza (EPE, 2021a).

Uma classificação que se faz das fontes de energia é quanto à sua capacidade de renovação. Essa tipologia as classifica, portanto, em não renováveis e renováveis. As fontes não renováveis de energia são, em termos pragmáticos, finitas. Para a maioria dessas fontes, a reposição na natureza é muito demorada, pois depende de processos que costumam durar milhões de anos sob condições especiais de temperatura e pressão (CORREA e BENITE, 2019).

As fontes fósseis caracterizam-se pela emissão atmosférica do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gás metano (CH<sub>4</sub>) e outras substâncias, por processos naturais e antropogênicos (causados pelo homem) (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

A energia nuclear, apesar de não renovável, é considerada por alguns fonte de energia limpa, por não produzir gases de efeito estufa, diferentemente das fontes fósseis, que são combustíveis, ou seja, precisam ser queimadas (EPE, 2021a).

Por sua vez, energia renovável é “todo tipo de energia que, de algum modo, retorna à sua origem no ciclo de transformações energéticas no qual se insere” (CORREA e BENITE, 2019, p. 22). As fontes renováveis de energia são repostas praticamente imediatamente pela natureza (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

O uso de fontes renováveis de energia não é novidade. Os primeiros usos dessas fontes datam de séculos atrás, por meio de moinhos de vento. Ao longo dos anos, as melhorias tecnológicas otimizaram o uso das fontes renováveis, em função da crescente demanda por alternativas energéticas sustentáveis (DUPONT et al., 2015). Algumas fontes renováveis apresentam variabilidade na geração de energia elétrica ao longo do dia ou do ano, configurando-se como fontes sazonais. Exemplos são a energia eólica, energia solar e energia hídrica. As fontes renováveis que não apresentam comportamento sazonal, ou apresentam menor sazonalidade, são biomassa, energia geotérmica e energia oceânica.

Observa-se, no entanto, que, com o aumento do aquecimento global, tem crescido o foco das pesquisas para a produção de hidrogênio verde, com o objetivo de atender a demanda energética a partir de fontes renováveis, intensificando-se a discussão mundial sobre a temática (NADALETI et al., 2021). O hidrogênio verde pode ser produzido em diferentes locais e ser transportado, além de ser armazenável em grandes volumes, atuando como uma reserva estratégica (GLOBAL GAS REPORT, 2020).

A figura a seguir evidencia a evolução da produção energética primária dividida em fontes não renováveis e renováveis, no Brasil, ao longo de 50 anos (1973 a 2022), conforme dados coletados junto ao Balanço Energético Nacional (BEN), disponibilizados pela EPE no sítio eletrônico <https://dashboard.epe.gov.br/apps/ben/>. Os dados estão expressos em 106 tep (tonelada equivalente de petróleo).

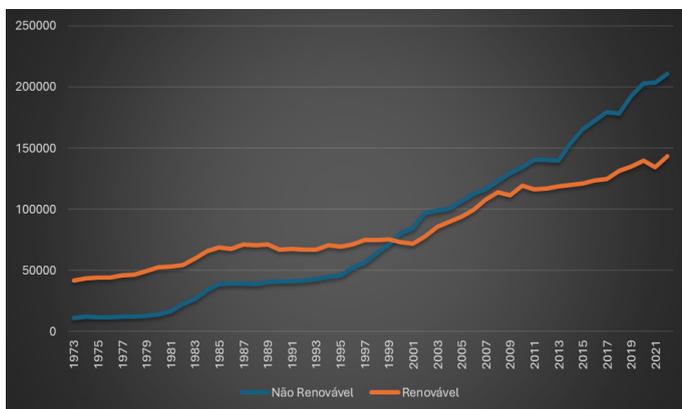


Figura 1 – Evolução da produção de energia primária no Brasil, por fontes não renováveis e renováveis, de 1973 a 2022

Nota-se um crescimento muito acentuado na produção de energia no Brasil ao longo desses anos. Ademais, percebe-se uma evidente inversão na participação no início dos anos 2000, quando a produção por fontes não renováveis ultrapassou as fontes renováveis.

## 2.4 Marcos regulatórios

Em virtude de haver regulação dos mercados energéticos por meio de marcos regulatórios, em especial o de energia elétrica, no presente tópico são abordados os principais marcos que regulam o setor elétrico brasileiro.

O marco regulatório é definido como um conjunto de normas, leis e diretrizes que regulam o funcionamento dos setores nos quais os agentes privados prestam serviços de utilidade pública. Os marcos estabelecem as regras para o funcionamento do setor, contemplando a fiscalização do cumprimento das normas por meio de auditorias técnicas, e estabelecem os indicadores de qualidade. A criação de um marco regulatório é fundamental para estimular a confiança de investidores e consumidores, e para o bom andamento do setor (IPEA, 2006).

No início, a utilização da energia elétrica no Brasil limitava-se a alguns serviços públicos e à atividade fabril, não havendo regulação específica para o setor. Existiam apenas algumas empresas de energia elétrica que ofertavam serviços públicos e eletricidade para fins fabris, que eram locais e independentes (GOMES e VIEIRA, 2009). Antes da década de 1930, as decisões sobre geração e expansão da capacidade instalada de geração eram comandadas pelo mercado. O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) era comandado por empresas privadas e estrangeiras capazes de tomar decisões em função do grau de rentabilidade que esse setor poderia lhes assegurar (MACEDO, 2016).

A histórica concentração da geração de energia elétrica por fonte hidráulica, fortemente dependente das variações climáticas, despertou a necessidade de implantar um sistema interligado de transmissão com despacho operacional centralizado das usinas geradoras, resultando o surgimento do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e do Sistema Interligado Nacional (SIN). Outro grande desafio do Brasil, no que tange ao suprimento de energia elétrica, está ligado à extensão continental do país. Por esse motivo, o SIN é composto por quatro subsistemas, denominados Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, este último abrangendo apenas parte da região. A configuração do SIN resultou na desverticalização da indústria de energia elétrica, e compartimentação do setor de energia elétrica em quatro segmentos operacionais: geração, transmissão, distribuição e comercialização (CHAVES, 2017).

O SIN, modelo único no mundo, foi estruturado, portanto, pela dimensão continental do país, além de a MEB ter composição forte-

mente hídrica. A dependência das hidrelétricas provocou a necessidade de compensar, via sistema, os períodos de estiagem nas regiões mais secas, assegurando o fornecimento de energia elétrica.

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), criado em 2002, um marco regulatório importante, foi instituído com o objetivo de aumentar a participação de energia elétrica renovável e alternativa no SIN, fomentando projetos de produtores independentes autônomos de energia elétrica, concebidos com base em energia eólica, pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e biomassa (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2012).

Em fevereiro de 2019, um novo marco regulatório do setor elétrico começou a tramitar no Senado. O projeto dispõe sobre o modelo comercial do setor elétrico, a portabilidade da conta de luz e as concessões de geração de energia elétrica (CENTRO DE LIDERANÇA PÚBLICA, 2021).

## 2.5 Estudos anteriores sobre a MEB

A busca dos estudos anteriores sobre a temática estudada se deu no portal de periódicos CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, nas bases *Web of Science*, *Scopus* e *Directory of Open Access Journals* (DOAJ), nos últimos 20 anos. O objetivo principal da pesquisa bibliográfica é obter subsídios teóricos ou metodológicos que influenciam o desenvolvimento de hipóteses e as escolhas metodológicas (AQUINO et al., 2008). O critério adotado para a seleção dos oito artigos abaixo indicados foi a relevância, uma vez que os estudos abordam, sob algum aspecto, a característica, a história ou a evolução da matriz elétrica no Brasil. Foram selecionadas, também, duas dissertações de mestrado e uma tese de doutorado identificadas através das leituras dos artigos.

Na Tabela 1 apresenta-se a lista, em ordem cronológica crescente, dos estudos que trazem contribuição para esta pesquisa.

Tabela 1 – Estudos anteriores sobre a MEB

| Autor (es)   | Ano  | Objetivo  | Metodologia   | Resultados   |
|--|------|---|---|--|
| Mauricio T. Tolmasquim, Amílcar Guerreiro e Ricardo Gorini | 2007 | Apresentar uma prospectiva do setor energético brasileiro para o período 2005-30. | Análise documental com levantamento de dados históricos e dados de mercado.                             | Análise indica a necessidade de desenvolvimento de estudos e planejamento contínuo do setor.   |
| Fabrizio Luiz Bronzatti e Alfredo Iarozinski Neto          | 2008 | Projetar a capacidade de produção e a demanda para cada matriz energética.        | Levantamento feito através de balanço energético simplificado para identificação das fontes de energia. | Petróleo e usinas hidroelétricas com desenvolvimento em curto-prazo e necessidade de investimentos. O gás natural tende a aumentar sua participação. A energia eólica e solar devem aumentar a participação na matriz energética brasileira. |

Tabela 1 – Estudos anteriores sobre a MEB (cont.)

| Autor (es)  | Ano  | Objetivo   | Metodologia   | Resultados   |
|---|------|--|---|--|
| Joaquim Francisco de Carvalho   | 2009 | Definir a sustentabilidade baseada na segunda lei da termodinâmica, desatrelando crescimento econômico do uso de recursos naturais.  | Aplicação do princípio da precaução para o planejamento energético.   | A tese demonstra que o Brasil tem condições de se tornar independente de fontes não renováveis.  |
| Lucas Lyrio de Oliveira   | 2017 | Definir a participação de cada fonte na geração de energia elétrica, em cada região do País, para que a demanda prevista pela EPE seja atendida.   | Teoria moderna de portfólios.   | Resultados foram comparados com os da matriz projetada pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.   |
| Ana Thereza Carvalho Costa  | 2017 | Analisar se os leilões de energia elétrica estão levando à construção de uma matriz estratégica, conforme o planejamento do setor.   | Consolidação de todos os resultados de leilões de energia nova ocorridos entre 2005 e 2016, bem como os acréscimos programados pelo Plano Decenal de Expansão de Energia no mesmo período.              | Evidenciou-se a correlação direta entre os leilões e o futuro da matriz elétrica brasileira, sendo esse um mecanismo fundamental para sua expansão.  |
| Danielle Rodrigues Raimundo, Ivan Felipe Silva dos Santos, Geraldo Lúcio Tiago Filho e Regina Mambeli Barros                            | 2018 | Estimar as emissões de CO2 evitadas em decorrência do crescimento dos parques eólicos no Brasil no período compreendido entre 2001 e 2016, e do crescimento projetado até 2030.  | Foram realizados cálculos das emissões de CO2 evitadas em três cenários, considerando variações na matriz elétrica ao longo dos anos e o fator de capacidade médio de geração eólica no país.           | As emissões evitadas projetadas no período de 2017 a 2030 foram muito maiores do que as emissões evitadas históricas no período de 2001 a 2017. Credita-se ao fato de que a energia eólica no Brasil só começou a se tornar significativo em 2011. |
| Fabiano Baldez da Costa Brito, Jairo Lúcio Gomes Siqueira, Mariana Bachelar Turra, Marcos Antônio Cruz Moreira e Flavia Ribeiro Villela | 2019 | Analisar a evolução da participação das fontes de energia eólica e fotovoltaica (EFV) na matriz brasileira de geração de energia elétrica no período de 2013 a 2017.   | Os dados utilizados foram levantados da ANEEL, utilizando métodos de Estatística Descritiva, tanto gráficos quanto de resumos numéricos, assim como métodos de normalização e de correlação de Pearson. | Constatou-se o aumento da participação dessas fontes de energia na matriz energética brasileira mesmo com as limitações climáticas ocorridas em determinadas estações.   |
| Andreas Joachim Krell e Carolina Barros de Castro e Souza   | 2020 | Analisar os aspectos jurídicos do panorama regulatório da matriz energética brasileira diante da preocupação da comunidade internacional com o meio ambiente, e com o questionamento se a matriz pode ser considerada "sustentável". | Análise documental dos marcos regulatórios do setor que abrangem o tema sustentabilidade.   | Evidenciou-se que a divergência entre a legislação e a realização de políticas públicas viola os direitos fundamentais.  |

Tabela 1 – Estudos anteriores sobre a MEB (cont.)

| Autor (es)                                     | Ano  | Objetivo  | Metodologia  | Resultados   |
|--|------|---|--|--|
| Donisete da Silva Pereira e Romeu e Silva Neto | 2020 | Analisar a MEB.   | Análise documental das bases ANEEL, MME, CCEE.   | Confirma a exagerada dependência da matriz elétrica da fonte hídrica, principalmente hidrelétricas, e a necessidade de diversificação da MEB.  |
| Bianca Reichert e Adriano Mendonça Souza       | 2021 | Identificar as relações existentes entre as fontes geradoras brasileiras diante de cenários adversos. | Modelo de Vetor Autorregressivo (VAR) para identificar relações positivas entre fontes de energia, variáveis econômicas e aumento da tarifa de eletricidade. | Destaca a conhecida dependência entre as fontes hidroelétricas e térmicas, expondo os efeitos reversos dessa dependência, ampliando o uso de fontes não convencionais, como a biomassa e a energia eólica.   |
| Donisete da Silva Pereira e Romeu e Silva Neto | 2021 | Analisar estudos de temas relacionados à diversificação de fontes geradoras da MEB.                   | Estudo bibliométrico.  | Identificou que, apesar de ocorrer uma breve movimentação em prol dessa diversificação, há necessidade de intensificar ações que promovam menor dependência entre a MEB e o uso dos recursos hídricos, confirmando a necessidade de a MEB ser diversificada. |

Os estudos indicam que no início do século XXI o Brasil demonstrava preocupação com os destinos da matriz elétrica e, conforme Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007), as economias que melhor se posicionassem quanto ao acesso a recursos energéticos de baixo custo e de baixo impacto ambiental obteriam vantagens competitivas. Enfatizavam, ainda, que nas próximas décadas a questão se apresentaria como um desafio, porque o desenvolvimento econômico e social demandaria grande quantidade de energia com alto grau de sustentabilidade energética, e como uma oportunidade, porque o Brasil dispunha de recursos energéticos renováveis e tecnologias com capacidade para transformar suas riquezas naturais.

O artigo de Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007) já indicava a tendência de diversificação da matriz energética brasileira, ressaltando que em 1970 apenas duas fontes de energia (petróleo e lenha) respondiam por 78% do consumo total do país. Já em 2000, três fontes correspondiam a 74% do consumo (petróleo, lenha e energia hidráulica), e projetavam quatro fontes para atender 77% do consumo em 2030, que seriam petróleo, energia hidráulica, cana-de-açúcar e gás natural. Destacavam uma redução da participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira que em 1970 era superior a 58%, com predominância da lenha, caindo para 53% no ano 2000 e chegando a 44,5% em 2005. Entretanto, visualizavam que essa tendência possivelmente se reverteria a partir de 2010.

Bronzatti e Iarozinski Neto (2008) identificaram que nas regiões mais desenvolvidas do país boa parte do potencial hidráulico já havia sido aproveitado. Ressaltavam também que haveria o aproveita-

mento da Bacia Amazônica tentando preservar, na medida do possível, o meio ambiente. Os autores davam ênfase ao fato de o Brasil possuir uma das maiores reservas de urânio no mundo, além de dominar o processo de fabricação do combustível nuclear. Mas, indicavam que a exploração era incipiente e exigia investimentos em tecnologia de enriquecimento do urânio.

Bronzatti e Iarozinski Neto (2008) concluíram que o petróleo continuaria como principal fonte de energia pelo menos até 2020, bem como o crescimento do gás natural. Indicavam queda na participação da energia hidroelétrica em 2020, chegando a 80% do aproveitamento do potencial de geração com os 20% restantes sofrendo restrições ambientais quanto ao uso da fonte. Projetavam que a deficiência seria, então, suprida por outras fontes energéticas para geração de eletricidade, como por exemplo o gás natural, a partir de 2010, com relevância na geração de energia elétrica em usinas termelétricas. Já a partir de 2020, as fontes eólica e solar apresentariam maior maturidade e menor custo, e aumentariam a participação na matriz energética.

Carvalho (2009) sugere um comportamento inercial do consumidor, que reluta em adaptar suas necessidades a se ter maior acesso às fontes sustentáveis, o que reforça a exigência de contribuição por parte da administração pública, empresários, universidades e público em geral, no sentido de cooperar para a transição de uma matriz poluente para uma matriz sustentável. Reforça a necessidade de políticas públicas que não visem somente lucro, baseadas unicamente na minimização de custos e que também foquem na redução dos impactos ambientais e na emissão dos gases de efeito estufa (GEE). As políticas baseadas nos custos acabam definindo a direção da matriz elétrica do Brasil. O autor ressalta que uma vez que o país dispõe de fontes renováveis em abundância, não deve esperar que as condições ambientais se tornem mandatórias obrigando a transição de uma matriz insustentável para uma matriz sustentável de forma abrupta e não planejada.

Após oito anos do último estudo sobre a MEB, Oliveira (2017), usando a teoria de portfólios, fez um estudo comparativo entre a matriz elétrica projetada no Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (PDE 2024) e o resultado identificado nas composições de fontes para a matriz elétrica via teoria de portfólios. O estudo tem foco nos custos de implantação e de operação das fontes que compõem a matriz elétrica, considerando a disponibilidade da fonte primária e a região onde a geração será instalada. O autor conclui que as hidrelétricas diminuem a participação na matriz elétrica quando há menor tolerância ao risco e maior aceitação de alto custo médio. Quanto a redução de risco a fonte que ganha participação é a eólica, apesar de apresentar custo médio acima das hidrelétricas, mas com menor variabilidade.

Costa (2017), em sua pesquisa, conclui que o planejamento do

setor elétrico, iniciado no período entre 1945 e 1964, é imprescindível para um país de dimensões continentais como o Brasil. Naquele período implantou-se uma rotina de planejamento para o setor ao ser realizado o primeiro plano integrado de longo prazo. A autora constatou a posterior modernização do setor, que estabeleceu um novo modelo de alta complexidade, quando foi necessário reajustar o papel de algumas entidades já existentes, como a ANEEL, e criação de outras entidades para exercer novas funções, como a EPE. O novo modelo implementou inovações, e o principal instrumento para viabilizar a contratação de capacidade de geração de energia elétrica foram os leilões. É através dos leilões que se definem os projetos a serem implantados, bem como as fontes que comporão a matriz elétrica futura.

Costa (2017) identificou que existem grandes variações entre as versões do Plano de Desenvolvimento de Energia (PDE), demonstrando não uniformidade entre os estudos e os direcionamentos para o setor elétrico. Constatou que, apesar dos leilões serem eficientes na contratação de eletricidade para atender a demanda projetada, não conseguem indicar as fontes que comporão a matriz elétrica.

Raimundo et al. (2018) demonstram o benefício que a energia eólica traz para o meio ambiente no que tange à emissão de GEE, especialmente porque se tornou uma importante fonte de energia no Brasil. Os autores reforçam que o crescimento da fonte eólica é de extrema importância para a construção de uma matriz energética diversificada, limpa e renovável. Ressaltam, também, que o aumento global da temperatura aumentará a taxa de evaporação de água, impactando principalmente a região nordeste do país, que sofrerá nos períodos de seca quando as condições de vento são extremamente favoráveis, e que podem ser amplamente aproveitadas com implantação de usinas eólicas *onshore* e *offshore*.

Brito et al. (2019) destacam que a diversificação de fontes de energia, principalmente com as renováveis, é uma tendência mundial e atende o objetivo nº 7 da Agenda 2030. O Brasil se destaca no cenário mundial, pois tem atendido grande parte de sua demanda elétrica com fontes renováveis, com resultados superiores à média mundial. Reforçam que as energias eólica e fotovoltaica vêm crescendo fortemente em participação na matriz energética brasileira.

Os autores avaliam se a geração total de energia elétrica proveniente das fontes eólica e solar atende à demanda socioeconômica independentemente das condições climáticas, ou seja, se as variações na geração fotovoltaica são dependentes somente das condições climáticas ou se são afetadas também pelas condições socioeconômicas. Concluíram que a geração de energia elétrica através das fontes eólica e solar dependem, exclusivamente, das condições climáticas, aspecto que deve ser considerado para composição da matriz.

Krell e Souza (2020) abordam o assunto da diversificação da

matriz elétrica brasileira sob a ótica do Direito Administrativo. Destacam que a geração de energia elétrica depende dos recursos naturais. Por se tratar de um bem imprescindível, o Estado se incumbiu da regulação da geração, controle e distribuição dos serviços de energia elétrica, que são considerados serviços públicos.

Entretanto, Krell e Souza (2020) observam que o Brasil possui fontes não renováveis em sua matriz, e que não há matriz energética ambientalmente sustentável. Ressaltam que a matriz elétrica do país é dominada pelas usinas hidrelétricas e constata a expansão das hidrelétricas, indicando que a geração de eletricidade caminha na contramão dos interesses socioambientais defendidos na legislação federal. Concluem a análise identificando que “as políticas energéticas nacionais não cumprem o dever de substituir gradualmente os combustíveis fósseis no âmbito do uso sustentável da biodiversidade”, quando desconsideram que as energias limpas são essenciais à matriz energética, portanto apresentando uma contradição entre a legislação vigente, o discurso político e as políticas públicas setoriais.

Pereira e Silva Neto (2020) observam que a MEB é composta essencialmente por hidrelétricas, provocando insegurança no abastecimento elétrico e, nos períodos de estiagem, exigindo a entrada das termelétricas para complementar o fornecimento de energia. As termelétricas, além de agredir o meio ambiente, por se tratar de fonte poluente, impacta a população usuária que se submete ao regime de bandeiras tarifárias: bandeiras verde, amarela e vermelha, que indicam que a energia custa mais ou menos a depender das condições de geração. Sob este enfoque defendem a diversificação da MEB, privilegiando, na sua composição, fontes renováveis.

Os autores reconhecem que a geração por fonte hídrica se caracteriza por ser renovável, mas não é uma fonte limpa e nem sustentável em função da perturbação que provoca na fauna e na flora. Além disso as hidrelétricas têm alto custo de implantação, processo de construção longo e estão localizadas em regiões distantes dos centros urbanos, exigindo altos investimentos na infraestrutura de transmissão. Destacam a preocupação com o país basear o desenvolvimento em fonte única e à mercê das condições climáticas.

Reichert e Souza (2021) verificaram as relações entre as principais fontes geradoras da matriz elétrica brasileira, analisando os efeitos diante de cenários adversos. Destacaram a conhecida dependência das fontes hidrelétricas e térmicas e expuseram os efeitos dessa dependência, com a necessidade de ampliação do uso de fontes como biomassa e eólica. Os autores dão como alternativa para reduzir essa dependência, e aumentar a segurança, a criação de políticas públicas que incentivem a expansão da energia solar.

Reichert e Souza (2021) sugerem a revisão e modernização das usinas termelétricas a gás natural já existentes, compensando a

instabilidade da fonte renovável por meio de fonte térmica de baixo carbono. Reforçam que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) precisa, a longo prazo, implementar soluções de armazenamento de energia, diminuindo a dependência térmica da matriz brasileira e mantendo a estabilidade do fornecimento de energia elétrica.

Pereira e Silva Neto (2021) observam que o Brasil, com potencial de geração elétrica de diversas fontes, possui hoje uma matriz elétrica baseada predominantemente em hidroeletricidade. Considerada por muitos como uma fonte de “energia limpa”, as hidrelétricas do ponto de vista ambiental não podem ser consideradas uma solução ecológica e, diante disso, a geração de energia elétrica por fontes renováveis vem crescendo na composição da matriz elétrica brasileira.

Os autores concluem na análise que existe a necessidade de diversificar a matriz elétrica brasileira. Portanto, há uma forte tendência de que a matriz seja mais diversificada, constituída principalmente por fontes renováveis de energia. A diversificação é vislumbrada como um elemento estratégico necessário para aumentar a confiabilidade do sistema, garantindo maior sustentabilidade, segurança e eficiência. O principal obstáculo que deverá ser superado para atingir o objetivo de diversificar a MEB será estabelecer e implantar políticas públicas que orientem o setor na direção do desenvolvimento sustentável.

Baseando-se nos estudos citados, identifica-se claramente a necessidade de diversificar a MEB baseada fortemente em hidrelétricas e compensadas pelas térmicas em períodos de estiagem. A diversificação da matriz deverá ter o objetivo de conduzir a transição energética requerida pela mudança climática que o planeta enfrenta, provocada pela emissão de carbono, tendo como consequência desastres naturais, comprometimento da produção agrícola e da sobrevivência das gerações futuras.

Esta pesquisa difere dos estudos anteriores quando prospecta, considerando a visão de especialistas do setor elétrico no Brasil, quais os possíveis direcionamentos que poderão ser dados às políticas públicas que regulam os órgãos competentes no sentido de diversificar e promover a sustentabilidade da MEB.

Portanto, este estudo poderá contribuir levantando questões que poderão e deverão ser consideradas para a construção de uma matriz elétrica limpa e sustentável. Limpa, no sentido de evitar a emissão de carbono, e sustentável no sentido de garantir o suprimento, independente das condições climáticas e sazonalidades.

### 3. METODOLOGIA

Quanto à natureza, a pesquisa caracteriza-se como mista, com perspectiva pragmática justificada por não estar comprometida com nenhum sistema filosófico e buscar várias abordagens para coletar e

analisar os dados. O método misto tem por objetivo integrar esses dados (CRESWELL, 2020). Em uma pesquisa científica, os tratamentos quantitativos e qualitativos dos resultados podem se complementar, enriquecendo a análise e as discussões finais (MINAYO, 1997).

Quanto aos fins, a pesquisa tem caráter descritivo. Tais pesquisas têm como principal objetivo avaliar e descrever características pertinentes à questão de pesquisa (COLLIS e HUSSEY, 2005). Segundo Gil (2007), a pesquisa descritiva tem por objetivo descrever as características de determinada população ou fenômeno, ou estabelecer relações entre suas variáveis. Uma de suas principais características baseia-se na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados.

Quanto aos procedimentos, o presente estudo é definido como pesquisa de campo. As pesquisas de campo têm considerável grau de flexibilidade metodológica, não necessitando de padrões rígidos para sua elaboração, tratando com profundidade as características de um único grupo ou comunidade, além de não requerer equipamentos especiais para a coleta de dados, tornando-a mais econômica (GIL, 2007).

Os dados primários foram coletados em dois grupos. No primeiro, foi aplicado um *survey* junto a 40 profissionais do setor de energia, dos quais 18 responderam efetivamente. O período de envio e coleta dos dados se deu nos meses de maio e junho de 2023.

No segundo grupo, foram realizadas entrevistas com cinco especialistas do setor, considerados de “notório saber”. O principal critério para definir os entrevistados como notório saber foi a senioridade, já que todos os participantes tinham mais de 10 anos de atuação no setor elétrico. Ademais, a maioria participa de organizações como ANEEL, ABNT e CREA. Outras características indicativas de conhecimento no setor, são a formação acadêmica em nível de pós-graduação nacional e internacional, experiência profissional internacional e atuação em nível de diretoria de empresas do setor.

Ambos os conjuntos de dados foram levantados de forma virtual, sendo o *survey* por e-mail, via *Google Forms*, e a entrevista pré-agendada *online*, seguindo um roteiro predefinido.

O tratamento dos dados deu-se por meio de estatística descritiva e análise de conteúdo. A análise dos dados do *survey* baseou-se nos indicadores de energia para o desenvolvimento sustentável e na relação que têm com os objetivos específicos. Tais indicadores são guias para o planejamento das matrizes energéticas dos países em todo o mundo.

No tocante às entrevistas, parte do método misto em que consiste a etapa qualitativa, utilizou-se a análise de conteúdo, que, segundo Bardin (2016), trata-se de técnicas de análise das comunicações que buscam obter indicadores que permitam inferir conhecimentos relativos às condições de produção/recepção dessas mensagens.

Como a análise de conteúdo é uma maneira de converter sistematicamente textos em variáveis numéricas, por meio de códigos pré-estabelecidos (COLLIS e HUSSEY, 2005), codificou-se a pesquisa com base nos objetivos específicos, de modo que cada um constituiu uma categoria de análise, possibilitando a qualificação e a quantificação dos dados, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Categorias de análise

| Objetivo específico   | Categoria                |
|---|--------------------------|
| 1 Analisar os marcos regulatórios para o setor                    | Transição energética     |
| 2 Analisar as políticas de diversificação da matriz               | Hidrogênio verde         |
| 3 Mapear as estratégias para uma matriz renovável                 | Compensação ambiental    |
| 4 Mapear as estratégias para uma matriz sustentável               | Geração distribuída      |
| 5 Identificar as características da matriz elétrica para o futuro | Armazenamento de energia |

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O início desta seção é pela apresentação do perfil dos respondentes do survey. Segue com os resultados obtidos com o survey e com as entrevistas. É finalizada com uma síntese dos resultados obtidos nas duas etapas.

##### 4.1 Perfis dos respondentes do survey e dos entrevistados

Dos 40 questionários enviados, obteve-se resposta de 18, constituindo-se no seguinte perfil: 15 (83,3%) do gênero masculino; distribuição homogênea entre as três faixas etárias; profissionais com elevado nível de escolaridade (mais da metade possui graduação universitária e 1/3 deles cursou mestrado); 55,5% dos respondentes atuam na iniciativa privada; 50,1% ocupam cargos de alta direção; e 38,9% têm mais de 20 anos de atuação no setor elétrico (Tabela 3).

Tabela 3 – Perfil dos respondentes

| Gênero       |           | Faixa etária |           | Escolaridade    |           |
|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------------|-----------|
| Feminino     | 3         | 20 a 40      | 6         | Ensino superior | 10        |
| Masculino    | 15        | 41 a 60      | 6         | Mestrado        | 6         |
| <b>Total</b> | <b>18</b> | 61 a 80      | 6         | Outra           | 2         |
|              |           | <b>Total</b> | <b>18</b> | <b>Total</b>    | <b>18</b> |

Tabela 3 – Perfil dos respondentes (cont.)

| Ocupação            |           | Cargo        |           | Experiência (anos) |           |
|---------------------|-----------|--------------|-----------|--------------------|-----------|
| Iniciativa privada  | 10        | Conselheiro  | 1         | Menos de 5         | 2         |
| Funcionário público | 2         | Coordenador  | 3         | 5 e 10             | 4         |
| Autônomo            | 4         | Diretor      | 5         | 10 e 15            | 2         |
| Aposentado          | 1         | Gerente      | 1         | 15 e 20            | 3         |
| Empresário          | 1         | Presidente   | 3         | 20 e 25            | 2         |
| <b>Total</b>        | <b>18</b> | Supervisor   | 2         | Mais de 25         | 5         |
|                     |           | Outro        | 3         | <b>Total</b>       | <b>18</b> |
|                     |           | <b>Total</b> | <b>18</b> |                    |           |

A Tabela 4 apresenta os perfis dos cinco entrevistados.

Tabela 4 – Perfil dos entrevistados

| Entrevistado | Nível de escolaridade                        | Cargo   | Tempo de experiência no setor (anos) | Data da entrevista |
|--------------|--|---|--------------------------------------|--------------------|
| E1           | Engenheiro eletricista com pós-graduação     | Secretário estadual   | 22                                   | 19/06/2023         |
| E2           | Engenheiro eletricista e engenheiro mecânico | Consultor de energia e membro de conselhos de administração de empresas públicas e privadas | 57                                   | 06/06/2023         |
| E3           | Engenheiro civil                             | Empresário e membro de conselhos de administração de empresas privadas                      | 28                                   | 09/06/2023         |
| E4           | Engenheiro mecânico                          | Presidente de conselho de empresa privada de geração de energia elétrica                    | 45                                   | 12/06/2023         |
| E5           | Doutor                                       | Presidente de empresa vinculada a órgão público   | 10                                   | 14/06/2023         |

Conclui-se que os participantes das duas etapas de pesquisa estão qualificados para avaliar a MEB com propriedade.

#### 4.2 Resultados evidenciados a partir do survey

No que se refere ao primeiro objetivo (analisar os marcos regulatórios para o setor), identificou-se uma resistência à implantação de térmicas e de pequenas centrais hidrelétricas. Essa oposição indica que o setor pode estar posicionado contra a emissão de gases de efei-

to estufa e de uso de água para fins de geração de energia elétrica e estabilização do suprimento.

Quanto ao segundo objetivo (analisar as políticas de diversificação da matriz), identificou-se um ponto de divergência quanto a diversificar a matriz com fontes nuclear e hidrotérmica. Percebe-se uma divergência quanto à expansão da fonte hídrica ou da sua combinação com outras fontes, como biomassa e eólica, para dar estabilidade ao sistema. Conclui-se que as hidrelétricas não fazem mais parte da escolha do setor no sentido da diversificação da MEB.

Quanto ao terceiro objetivo (mapear as estratégias para uma matriz renovável), observou-se discordância quanto ao impacto ambiental causado pela fonte eólica. Também discordam da combinação de fontes e da utilização de pequenas centrais hidrelétricas para estabilizar o sistema. O resultado sugere que as fontes renováveis causam impacto ambiental e que o problema de suprimento de energia elétrica não deverá ser resolvido com a fonte hídrica.

No que tange ao quarto objetivo (mapear as estratégias para uma matriz sustentável), observou-se divergência quando se faz referência à sustentabilidade ambiental, ou seja, fontes renováveis causam impacto. No tocante à sustentabilidade do suprimento, as respostas indicam que a matriz não é sustentável e discordam do uso de hidrelétricas para estabilizar o sistema.

Quando ao quinto objetivo (identificar as características da matriz elétrica para o futuro), os resultados indicam que o Brasil tem a matriz do futuro, renovável e com baixa emissão de carbono. Não concordam com combinações que incluam as hidrelétricas, em especial de pequeno porte. Indicam, também, uma divergência quanto ao aspecto de descarbonização, porém a maioria concorda que a emissão de carbono será reduzida, apesar de não ser eliminada.

### **4.3 Resultados evidenciados a partir das entrevistas**

#### **4.3.1 Analisar os marcos regulatórios para o setor**

O principal achado para esse objetivo está relacionado à necessidade mundial de proceder com a transição energética. Os entrevistados expuseram seus pontos de vista quanto à regulamentação do setor, e deram ênfase à atual necessidade de regulação, por causa do surgimento de novas fontes, como o hidrogênio verde, além da necessidade de expandir a geração de energia elétrica com usinas *offshore*.

Para que se esclareça, as usinas eólicas *offshore* são instaladas no mar, obtendo-se melhor aproveitamento da força do vento, porque este atinge maior velocidade e tem regime mais constante. Isso acontece devido à inexistência de barreiras.

#### 4.3.2 Analisar as políticas de diversificação da matriz

O principal achado para esse objetivo está relacionado à produção de hidrogênio verde. O hidrogênio verde não será utilizado, a princípio, para geração de energia elétrica, mas será empregado para geração de outras fontes secundárias de energia, ou seja, será utilizado na matriz energética do país. Todos os entrevistados abordaram o assunto hidrogênio verde como alternativa à diversificação da matriz.

#### 4.3.3 Mapear as estratégias para uma matriz renovável

Os entrevistados concordam que a MEB já é fortemente renovável. Entretanto, dois deles salientaram que o fato de a matriz elétrica ter característica renovável não exime o país de pensar em compensação ambiental, porque qualquer fonte geradora, mesmo renovável, vai gerar impacto social, econômico e ambiental. No mapeamento surge a necessidade de desenvolver tecnologias para captura de carbono.

#### 4.3.4 Mapear as estratégias para uma matriz sustentável

O principal conceito que surgiu das entrevistas, correspondente a esse objetivo, foi o crescimento da geração distribuída. Todos enfatizaram que para a MEB ser sustentável pela ótica de fornecimento de energia, o Brasil terá que fazer opção por descentralizá-la, mesmo considerando o SIN uma grande vantagem para o país, em função das grandes distâncias para transmissão de energia elétrica.

#### 4.3.5 Identificar as características da matriz elétrica para o futuro

O principal achado para atender a esse objetivo foi o fato de os entrevistados pautarem a necessidade de armazenar a energia gerada pelas fontes eólica e solar, consideradas fontes variáveis, opondo-se às despacháveis que geram ininterruptamente. Justificam que, como a fonte solar gera durante o dia e a fonte eólica gera com melhor desempenho à noite, há momentos de perda, porque não há consumo.

### 4.4 Relação entre respostas e objetivos

Estabelecendo-se uma relação entre as respostas do survey e as respostas das entrevistas na avaliação da MEB (Tabela 5), obtém-se uma síntese dos resultados da pesquisa.

Tabela 5 – Relação entre respostas e objetivos

| Objetivo  | Survey  | Entrevistas  | Conclusão   |
|---|---|--|---|
| Analisar os marcos regulatórios para o setor                    | Discordam de geração com fontes fósseis, e o uso de PCH e CGH indicam que a regulação do setor caminhará no sentido de baixo carbono  | Entendem que os marcos deverão ser analisados e adaptados às novas fontes geradoras de energia elétrica, sem privilegiar fonte fóssil ou hídrica   | Convergem para a mesma visão, ou seja, regulação do setor sem uso de fontes fósseis e redução de uso da hídrica   |
| Analisar as políticas de diversificação da matriz               | Discordam sobre as fontes nuclear e fósseis concordam totalmente quanto ao hidrogênio verde, indicando que a diversificação da matriz será com fontes renováveis  | A produção de hidrogênio verde figura como a principal alternativa de diversificação da Matriz Energética  | Concordam totalmente que o futuro é o hidrogênio verde Sugerem, com pouca ênfase, a fonte nuclear, e concordam que as fontes fósseis deverão ser reduzidas  |
| Mapear as estratégias para uma matriz renovável                 | Consideram a matriz brasileira fortemente renovável   | Concordam que, mesmo com matriz fortemente renovável, o país precisa desenvolver tecnologias para captura de carbono   | Concordam totalmente que o Brasil é um país com, potencialmente, praticamente 100% da matriz elétrica renovável   |
| Mapear as estratégias para uma matriz sustentável               | Concordam que a matriz é sustentável do ponto de vista ambiental. Quanto à sustentabilidade ligada ao fornecimento, concordam que, em razão da sazonalidade das fontes geradoras, a matriz não garante o suprimento | Sugerem que o país já percebeu que o rumo será investir em geração distribuída, reduzindo a distância entre geração e consumo. Esse é um caminho para garantir a sustentabilidade do suprimento          | A pesquisa detecta a compreensão de matriz não sustentável pela ótica de suprimento, apesar de ser uma matriz sustentável pela ótica ambiental  |
| Identificar as características da matriz elétrica para o futuro | Concordam em descarbonizar, e que fontes despacháveis, aquelas que não são dependentes dos aspectos sazonais, são benéficas para a matriz   | Sugerem, para o futuro da matriz, o armazenamento de energia das fontes denominadas variáveis, ou seja, solar e eólica, garantindo o suprimento de energia e evitando desperdício do que pode ser gerado | Como o <i>survey</i> não aborda armazenagem de energia, esse aspecto não foi detectado pelos respondentes. Entretanto, tanto os respondentes quanto os entrevistados entendem que o país necessita de uma matriz sustentável pela ótica do suprimento |

A partir destas análises, pode-se seguir para as considerações finais da pesquisa.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O futuro da MEB está fundamentado estruturalmente na transição energética que o momento mundial exige, lastreado pelo imenso potencial de geração das fontes eólica e solar no Brasil, em especial no Nordeste. Em função dessa necessidade, existe um direcionamento no sentido de expandir a geração distribuída, visando reduzir os investimentos em infraestrutura de transmissão, além de garantir o fornecimento de energia elétrica às cinco regiões do país.

Observou-se, quanto aos marcos regulatórios (primeiro objetivo específico), que as regras e leis que forem definidas para a MEB deverão reduzir a geração de energia por fonte fóssil e reduzir o avanço das hidrelétricas, tendo como foco a transição energética.

Quanto às políticas de diversificação da matriz (segundo objetivo específico), os dois grupos discordam das térmicas. No *survey*, os respondentes discordam da fonte nuclear. Nas entrevistas, deixaram claro que as hidrelétricas, daqui em diante, não têm sentido, ou porque estão distantes dos centros de consumo ou porque a água deverá ser preservada para consumo humano e animal. Os cinco entrevistados citam o hidrogênio verde como a fonte do futuro, mesmo que não seja para fins de geração de energia elétrica.

Quanto à estratégia para uma matriz renovável (terceiro objetivo específico), há unanimidade nos dois grupos de que a MEB tem alta participação de fontes renováveis, atingindo 90% na sua composição. Entretanto, acreditam que as fontes fósseis permanecerão, mas com baixa emissão de carbono, por meio de tecnologia para captura de carbono.

Para o objetivo da estratégia para uma matriz sustentável (quarto objetivo específico), identificou-se que os dois grupos concordam com a sustentabilidade ambiental da matriz. Entretanto, ao abordar a sustentabilidade quanto ao suprimento, os dois grupos concordam que no Brasil ainda não é sustentável. Os entrevistados sugerem que o caminho será ampliar a geração distribuída, porque pode-se gerar próximo ao centro consumidor, reduzindo-se perdas e custos de transmissão.

Quanto ao quinto objetivo específico de identificar as características da matriz elétrica para o futuro, observou-se que se deve privilegiar fontes de baixo carbono, podendo ser eólica, solar, biogás, hidrogênio, nuclear ou qualquer outra, desde que não seja fóssil. O *survey* responde com fontes despacháveis, mas que não sejam as térmicas fósseis. Os entrevistados citam a necessidade de armazenar a energia excedente gerada em momentos em que o consumo é baixo, para que seja despachada em períodos de alto consumo ou em falhas no sistema.

Após contemplar e atingir todos os objetivos específicos, o

objetivo geral da pesquisa foi atingido, permitindo chegar a uma perspectiva ampla sobre a MEB na ótica de especialistas.

Conclui-se que a MEB é renovável, causa impactos ambientais independentemente da fonte, não é sustentável sob o aspecto de garantia de suprimento e não crescerá com a instalação de hidrelétricas. Existe dúvida quanto a seguir com fonte nuclear, apesar de limpa, e não concordam com as pequenas centrais hidrelétricas.

Este trabalho contribui com uma ótica diversa para o setor elétrico, já que discorre sobre o seu desenvolvimento e identifica o horizonte para o futuro da MEB, ressaltando a deficiência na garantia do suprimento de eletricidade para todas as regiões do país, e, por esse motivo pode ser classificada como não sustentável pela ótica do atendimento à demanda. Contribui para direcionar a academia, sinalizando quais as principais formações e qualificações exigidas pelo mercado de trabalho e orientando para as novas tecnologias em estudo no âmbito mundial. Contribui, também, para orientar as empresas que fazem parte da cadeia produtiva do setor, no sentido de se planejarem para aproveitar as oportunidades do momento riquíssimo que o país vive.

Dentre as dificuldades enfrentadas, destaca-se o acesso aos especialistas, atualmente dedicados a definir os marcos regulatórios da legislação ambiental, da utilização da costa para implantação de usinas eólicas *offshore* e da produção de hidrogênio verde, o que, pelo volume de trabalho necessário, os autores julgam ter sido o maior motivo da dificuldade na obtenção das respostas.

Ressalta-se que o assunto não se esgota com esta pesquisa. Ao contrário, está longe de ser encerrado, principalmente sob o olhar de gestão do setor elétrico, com o objetivo de pesquisar e sugerir alternativas de melhoria para incrementar a qualidade do atendimento a todas as regiões do Brasil, incluindo as mais remotas, abastecendo-as com preços acessíveis e atendendo aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Finalmente, acredita-se que quanto melhor for o direcionamento das próximas pesquisas, maior será a contribuição ao setor elétrico, proporcionando alternativas para o acesso das comunidades mais carentes às condições mínimas que o suprimento de energia elétrica requer, e, quem sabe, reduzir as desigualdades sociais, problema secular no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. 3. ed. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BIZAWU, K.; AGUIAR, P. L. M. Energias renováveis e desenvolvimento sustentável: desafios e perspectivas para os países emergentes. *Conpedi Law Review*, v. 2, n. 4, p. 394-411, 2016.

BRITO, F. B. C.; SIQUEIRA, J. L. G.; TURRA, M. B.; MOREIRA, M. A. C.; VILLELA, F. R. Participação da geração eólica e fotovoltaica na matriz energética brasileira – 2013 a 2017. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 168-184, 2019.

BRONZATTI, F. L.; IAROSZINSKI NETO, A. Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Abepro, 2008.

BRUNDTLAND, G. Report of the World Commission on Environment and Development: our common future. New York: United Nations, 1987.

CARVALHO, J. F. O declínio da era do petróleo e a transição da matriz energética brasileira para um modelo sustentável. 2009. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CENTRO DE LIDERANÇA PÚBLICA. O Brasil precisa flexibilizar sua matriz energética? Disponível em: <https://www.clp.org.br/nota-tecnica-novo-marco-regulatorio-do-setor-eletrico/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CHAVES, R. B. S. O trilema regulatório aplicado ao setor elétrico brasileiro: análise sociojurídica de disfunções sistêmicas. 2017. Dissertação (Mestrado em Direito, Estado e Constituição) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Direito, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

COLLIS, J.; HUSSEY, R. Pesquisa em administração: um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

CORREA, N. B. O.; BENITE, C. R. M. Fontes renováveis de energia: uma abordagem interdisciplinar no estudo de física. Curitiba: Appris, 2019.

COSTA, A. T. C. Determinantes da matriz elétrica nacional: uma análise do planejamento do setor e a contratação via leilões. 2017. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento) – Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David. Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.

DUPONT, F. H.; GRASSI, F.; ROMITTI, L. Energias renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Ed. Especial, v. 19, n. 1, p. 70-81, 2015.

ELKINGTON, J. Sustentabilidade, canibais com garfo e faca. São Paulo: M. Books do Brasil Editora, 2012.

GIBSON, R. B. Specification of sustainability-based environmental assessment decision criteria and implications for determining "significance" in environmental assessment. Disponível em: [https://static.twoday.net/NE1BOKU0607/files/Gibson\\_Sustainability-EA.pdf](https://static.twoday.net/NE1BOKU0607/files/Gibson_Sustainability-EA.pdf). Acesso em: 4 jul. 2021.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2007.

GLOBAL GAS REPORT 2020. BloombergNEF / InternationalGas Union / Snam 2020. Disponível em: [https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-IGU-Snam-2020-Global-Gas-Report\\_FINAL.pdf](https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-IGU-Snam-2020-Global-Gas-Report_FINAL.pdf). Acesso em: 2 jan. 2022.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Disponível em: [https://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/2ANALISE\\_DO\\_MARCO\\_REGULATORIO\\_PARA\\_GERACAO\\_EOLICA\\_NO\\_BRASIL.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/2ANALISE_DO_MARCO_REGULATORIO_PARA_GERACAO_EOLICA_NO_BRASIL.pdf). Acesso em: 30 nov. 2021.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia renováveis: um futuro sustentável. Revista USP, São Paulo, n. 72, p. 6-15, 2007.

GOMES, J. P. P.; VIEIRA, M. M. F. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. RAP –Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 43, n. 2, p. 295-322, 2009.

GUÐLAUGSSON, B.; FAZELI, R.; GUNNARSDOTTIR, I.; DAVIDSDOTTIR, B.; STEFANSSON, G. Classification of stakeholders of sustainable energy development in Iceland: utilizing a power-interest matrix and fuzzy logic theory. Energy for Sustainable Development, v. 57, p. 168-188, 2020.

GUNNARSDOTTIR, I.; DAVIDSDOTTIR, B.; WORRELL, E.; SIGURGEIRSDOTTIR, S. Review of indicators for sustainable energy development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 133, 2020.

GUNNARSDOTTIR, I.; DAVIDSDOTTIR, B.; WORRELL, E.; SIGURGEIRSDOTTIR, S. Sustainable energy development: history of the concept and emerging themes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 141, 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. O que é? Marco regulatório. Desafios do Desenvolvimento, v. 19, n. 3, 2006. Disponível em: [http://desafios.ipea.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2093:catid=28&Itemid=23](http://desafios.ipea.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2093:catid=28&Itemid=23). Acesso em: 24 jul. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Analytical frameworks for electricity security. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/search?q=electricity%20security%202021>. Acesso em: 3 jul. 2021.

JANNUZZI, A. C. Regulação da qualidade de energia elétrica sob o foco do consumidor. 2007. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) – Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

KRELL, A. J.; SOUZA, C. B. C. A sustentabilidade da matriz energética brasileira: o marco regulatório das energias renováveis e o princípio do desenvolvimento sustentável. *Revista de Direito Econômico e Socioambiental*, v. 11, n. 2, p. 157-188, 2020.

KRISTJANPOLLER, W. R.; SIERRA, A. C.; SCAVIA, J. D. Dynamic co-movements between energy consumption and economic growth. A panel data and wavelet perspective. *Energy Economics*, v. 72, p. 640-649, 2018.

KUHLMAN, T.; FARRINGTON, J. What is sustainability? *Sustainability*, v. 2, p. 3436-3448, 2010.

MACEDO, L. D. Formação e estruturação do setor elétrico brasileiro: dos anos de 1930 a 1950. *Revista de Economia Regional, Urbana e do Trabalho*, v. 5, n. 2, p. 30-51, 2016.

MARIANO, J. D.; SANTOS, F. R.; BRITO, G. W.; URBANETZ JÚNIOR, J.; CASAGRANDE JÚNIOR, E. F. Hydro, thermal and photovoltaic power plants: A comparison between electric power generation, environmental impacts and CO2 emissions in the Brazilian scenario. *International Journal of Energy and Environment – IJEE*, v. 7, n. 4, p. 347-356, 2016.

MAY, P. H.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V. *Economia do meio ambiente: teoria e prática*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

MINAYO, M. C. S. *Pesquisa social: teoria, método e criatividade*. 7. ed. Petrópolis: Vozes, 1997.

NADALETI, W. C.; LOURENÇO, V. A.; AMÉRICO, G. Green hydrogen-based pathways and alternatives: towards the renewable energy transition in South America's regions – Part A. *International Journal Hydrogen Energy*, v. 46, n. 43, p. 22247-22255, 2021.

NEMET, A.; KLEMEŠ, J. J.; DUIC, N.; YAN, J. Improving sustainability development in energy planning and optimization. *Applied Energy*, v. 184, p. 1241-1245, 2016.

OLIVEIRA, L. L. Análise da matriz de geração de energia elétrica no Brasil: uma aplicação da teoria de portfólios. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Produção, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PAPP, L. Regulação jurídica, meio ambiente e energia: desafios e oportunidades da geração distribuída em áreas urbanas. *Revista de Direito da Cidade*, v. 11, n. 3, p. 496-515, 2019.

PASCON, B. Brasil precisa repensar sistema elétrico para garantir segurança energética. *Canal Energia*, 13 de maio de 2021. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/artigos/53172742/brasil-precisa-repensar-sistema-eletrico-para-garantir-seguranca-energetica>. Acesso em: 20 jul. 2021.

PEREIRA, D. S.; SILVA NETO, R. Diversificação de fontes geradoras da matriz elétrica brasileira: uma revisão sistemática. *Meio Ambiente*, v. 3, n. 1, p. 2-21, 2021.

PEREIRA, D. S.; SILVA NETO, R. Matriz elétrica brasileira: uma análise na distribuição de geração da matriz elétrica. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 369-385, 2020.

RAIMUNDO, D. R.; SANTOS, I. F.S.; TIAGO FILHO, G. L.; BARROS, R. M. Evaluation of greenhouse gas emissions avoided by wind generation in the Brazilian energetic matrix: a retroactive analysis and future potential. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 137, p. 270-280, 2018.

REICHERT, B.; SOUZA, A. M. Interrelationship simulations among Brazilian electric matrix sources. *Electric Power Systems Research*, v. 193, 2021.

SILVEIRA, P. G. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. *Opinião Jurídica*, v. 17, n. 33, p. 123-147, 2018.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. *Novos Estudos*, Cebrap, v. 79, p. 47-69, 2007.

UDEMBA, E. N.; TOSUN, M. Energy transition and diversification: a pathway to achieve sustainable development goals (SDG) in Brazil. *Energy*, v. 239, parte C, 2022.

VERA, I. A.; LANGLOIS, L. M.; ROGNER, H. H.; JALAL, A. I.; TOTH, F. L. Indicators for sustainable energy development: an initiative by the International Atomic Energy Agency. *Natural Resources Forum*, v. 29, p. 274-283, 2005.

WIERSUM, K. F. 200 years of sustainability in forestry: lessons from history. *Environmental Management*, New York, v. 19, n. 3, p. 321-329, 1995.

## ESTUDO DE CASO PARA APLICAÇÃO DE MECANISMOS DE CAPACIDADE EM UM SISTEMA DE ENERGIA SIMPLIFICADO

Matheus Lehmkuhl<sup>1</sup>  
Murilo Reolon Scuzziato<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina*

DOI: 10.47168/rbe.v30i2.868

### RESUMO

Em mercados puramente energéticos podem ocorrer problemas no suprimento de energia por diferentes fatores. Para corrigir isso utilizam-se mecanismos de capacidade, com a contratação de usinas geradoras de energia para mitigar a probabilidade de déficit de potência e/ou energia do sistema. Assim, este trabalho tem como foco avaliar diferentes possibilidades de contratação de capacidade para o Sistema Interligado Nacional, utilizando um sistema com características físicas e regulatórias simplificadas. Como principais resultados tem-se um benefício sistêmico com a redução de risco do suprimento, no entanto, percebe-se um aumento dos custos para os consumidores na maioria das condições operativas, assim como um impacto financeiro considerável para os agentes participantes do Mecanismo de Realocação de Energia.

Palavras-chave: Mecanismos de capacidade; Programação da operação; Operação ótima; Programação linear.

### ABSTRACT

In energy-only, problems may occur in energy supply due to different factors. To correct this, capacity mechanisms are used, with the contracting of energy generating plants to mitigate the probability of a power and/or energy deficit in the system. Thereby, this work focuses on evaluating different capacity contracting possibilities for the National Interconnected System, using a system with simplified physical and regulatory characteristics. The main results show a systemic benefit with the reduction of supply risk, however, there is an increase in costs for consumers in most operating conditions, as well as a considerable financial impact of the participants of the Energy Reallocation Mechanism.

Palavras-chave: Capacity Mechanisms; Operation scheduling; Optimal operation; Linear programming.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil, assim como outros países, vem passando por transformações constantes em sua matriz elétrica, com o aumento da participação de fontes que, há alguns anos, tinham representação pouco relevante no fornecimento de energia elétrica do país, como eólica e solar. Conforme dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2022 a fonte eólica foi responsável por 13% da geração total do sistema, enquanto em 2012, esse valor foi de aproximadamente 1% (ONS, 2023). Embora o crescimento de renováveis seja benéfico, sob o ponto de vista ambiental, sua elevada participação torna a operação do sistema mais complexa, dependendo ainda mais das demais fontes para prover capacidade de potência e energia ao sistema.

Além disso, com a intermitência e imprevisibilidade inerentes dessas fontes tende a ocorrer variações bruscas no fornecimento de energia elétrica. Essa redução brusca da geração exige que outras fontes - inclusive a própria demanda - se adequem para garantir o balanço de potência do sistema, garantindo atendimento da carga. Assim, aumenta-se o risco para o atendimento da demanda em todos os instantes de tempo, tendo em vista a impossibilidade de controlar a modulação da geração das fontes eólica e solar.

Nesse sentido, é fundamental a constante revisão do planejamento da operação do sistema, devido à evolução de suas características, buscando-se evitar a ocorrência de problemas percebidos no passado - como o racionamento de 2001. Segundo a EPE (2022a), caso não ocorra planejamento para atender os requisitos de potência, há a possibilidade de não ser possível realizar atendimento da demanda em todos os instantes para o ano de 2026, fazendo-se necessária a contratação de capacidade.

Assim, de forma a garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica com vistas ao atendimento à necessidade de potência requerida pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), foi publicado o Decreto nº 10.707, de 28 de maio de 2021 (BRASIL, 2021). Desse modo, regulamentou-se a contratação de reserva de capacidade - que até então não tinha previsão legal - atendendo os critérios gerais de garantia de suprimento estabelecidos pelo Conselho Nacional de Política Energética.

Após a publicação do Decreto nº 10.707/2021, foram realizados dois leilões, o “Leilão de Reserva de Capacidade de 2021” e o “Leilão de Reserva de Capacidade na forma de Energia de 2022”.

Nesse contexto, busca-se com este trabalho modelar e simular a adoção de mecanismos de capacidade no SIN. Para tal, visa-se realizar simulações do planejamento da operação de curto prazo para um sistema simplificado, examinando a influência de dois mecanismos de capacidade na operação e comercialização de energia elétrica. Os

resultados são comparados por meio de indicadores de avaliação, tanto de operação - como o Custo Marginal da Operação (CMO), custo da operação, custo futuro da operação e armazenamento – quanto de comercialização, como a evolução da geração hidrelétrica dos participantes do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) e impacto para os consumidores.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A literatura apresenta que em um mercado de energia puro (*energy-only*), os geradores de energia elétrica são remunerados pelo montante de energia produzido, mas não são compensados por manter a capacidade disponível (GORE; VANADZINA; VILJAINEN, 2016). No Brasil, alguns geradores do mercado cativo têm a remuneração ocorrendo pela disponibilidade, possibilitando a recuperação do investimento independente da geração de energia. No entanto, no mercado livre de energia, a remuneração ocorre de forma correspondente ao mercado de energia puro, pela quantidade de geração produzida.

Fundamentalmente, o preço do mercado de curto prazo de energia elétrica é capaz de remunerar adequadamente o gerador, inclusive seus custos fixos, recuperando o investimento e viabilizando a expansão do sistema, assim como também indicar o nível adequado de investimento de cada tipo de tecnologia disponível (ZUCARATO, 2009). A ocorrência de preços elevados – comumente denominados como preços de escassez de oferta – em conjunto com a renda inframarginal, permite a recuperação do custo de despacho da usina, assim como a receita fixa, considerando que não há falhas no mercado (GORE; VANADZINA; VILJAINEN, 2016).

Ou seja, a presença de picos de preço permite a remuneração adequada dos agentes geradores, compensando os períodos de preços baixos. Assim, possibilita-se inclusive a recuperação dos custos de responsabilidade do agente gerador - mesmo sem a ocorrência de geração - denominados custos fixos.

No entanto, na prática, ocorrem falhas de mercado que provocam a insuficiência do investimento para suprimento de capacidade ao sistema (DE VRIES, 2007). Como exemplo, cita-se o risco de intervenção governamental para redução dos preços, estabelecendo limites no preço do mercado de curto prazo. Uma vez que a definição de preços máximo e mínimo inviabiliza a ocorrência de preços elevados, impossibilita-se a remuneração dos custos totais dos empreendimentos geradores (ZUCARATO, 2009; DE VRIES, 2007).

Com isso, tende-se a incentivar a expansão de fontes com custos menores para implantação e operação, o que possibilita a maximização da receita dos agentes geradores e a redução dos custos para os consumidores. Como as fontes renováveis intermitentes não

são capazes de controlar a geração, aumenta-se o risco de escassez da oferta na ocorrência de variações repentinas da fonte primária (HACH, 2016). Tais variações podem provocar elevações repentinas de preço, sinalizadas pela escassez momentânea da oferta.

Apesar da ocorrência de preços elevados implicarem incentivo à expansão, conforme citado anteriormente, longos períodos de preços elevados podem ser prejudiciais ao sistema. Isto ocorre porque a elevação de preços visa sinalizar uma escassez da oferta para atendimento da demanda por energia elétrica. Porém, a existência de uma parcela da demanda que não é responsiva ao preço pode implicar a predominância de preços elevados (CRAMTON; OCKENFELS; STOFT, 2013).

Assim, a permanência de preços elevados, em conjunto com a inelasticidade da demanda, além de ocasionar cobranças elevadas para os consumidores, acarreta o risco de suprimento, tendo em vista que mantém o descompasso entre a oferta e a demanda de energia elétrica.

## **2.1 Mecanismo de capacidade**

Apesar da limitação de preço máximo ser um dispositivo desejável para mitigar a perda econômica por parte do consumidor, essa ferramenta pode causar falta de remuneração para alguns geradores. Além disso, a penetração de renováveis e a intermitência da demanda, podem contribuir para aumento do risco de suprimento em mercados puramente energéticos. Assim, de forma a corrigir falhas de mercado, remunerando adequadamente os geradores no mercado de curto prazo, que agregam contribuição de capacidade ao sistema, foram criados os Mecanismos de Capacidade, cujas principais alternativas são descritas a seguir.

### **2.1.1 Reserva operativa**

No mecanismo de reserva operativa, uma certa capacidade é contratada e mantida fora de operação, sendo que um agente independente – normalmente o operador do sistema – estabelece o montante a ser contratado (ZUCARATO, 2009). Essa reserva é estabelecida como uma demanda adicional e, sempre que o nível da reserva cair a níveis abaixo dos requisitos preestabelecidos, o operador paga um determinado preço para contratação dessa reserva (ZUCARATO, 2009).

Ou seja, a contratação da reserva operativa permite a concomitância do mercado puramente de energia, com contratação de usinas para garantir a confiabilidade do suprimento, dado que essas usinas são despachadas apenas em momentos críticos do sistema e são remuneradas pela capacidade.

No Brasil, a nomenclatura de reserva de potência operativa é compreendida como um serviço ancilar, sendo utilizado principalmente para limitação da variação da frequência do sistema. Neste trabalho esse conceito não é considerado, sendo utilizado o termo Reserva Operativa para denominar a contratação de um volume adicional como mecanismo de capacidade, como uma sobra de disponibilidade de potência.

De modo geral, mecanismos de reserva operativa permitem o aumento da confiabilidade do suprimento, em troca do pagamento de uma receita fixa a usinas que são contratadas nessa modalidade. Desse modo, possibilita-se que mercados em que há requisitos de confiabilidade – com a existência de preço teto regulatório - mantenham reserva suficiente para garantir a adequação de suprimento, incentivando a entrada de novos agentes por meio da remuneração adequada (SENER; KIMBALL, 2007). Além disso, destaca-se que, a depender das características do mercado, a reserva operativa pode ser utilizada para períodos curtos ou para horizontes mais longos.

### 2.1.2 Mecanismo de capacidade baseado em preço e quantidade

Em sua essência, esta modalidade de contratação consiste em realizar pagamentos para as usinas contratadas apenas quando disponíveis, sendo que essa receita é calculada pela multiplicação da capacidade firme de geração pelo preço contratado, em \$/MW, que pode ser uniforme ou sazonal (BATTLE et al., 2007). Diferentemente da Reserva Operativa, nesse tipo de mecanismo as usinas não são contratadas apenas para atendimento ao sistema em momentos críticos, podendo fornecer energia elétrica em todos os instantes de tempo. Com isso, tem-se a separação da remuneração pela eletricidade gerada e pela capacidade disponível.

Nos mecanismos baseados em quantidade, comumente denominados na literatura pelo termo de Mercado de Capacidade, o agente independente define a geração necessária para adequação do suprimento e o mercado decide o preço. Assim, os geradores ofertam pela oportunidade de prover capacidade para o sistema, com os vencedores determinados pela agregação dos menores preços que atendem a capacidade estipulada (ORANYE; ALABI, 2020). Já em mecanismos em que o pagamento ocorre pelo preço, o agente regulador estabelece um preço teto de contratação de capacidade, em unidades monetárias por potência. A partir do preço definido, o mercado estabelece o montante a ser contratado, determinando o montante de capacidade que é rentável, tendo em vista o preço teto de contratação (ZUCARATO, 2009; HACH, 2016).

### 3. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho consiste em simular o processo de definição do despacho e da determinação do preço de energia para um sistema similar ao SIN, com simplificações. O sistema é simulado para duas diferentes alternativas de mecanismo de capacidade, cujos impactos são comparados e avaliados entre si e em relação ao sistema sem nenhum mecanismo de capacidade.

Vale destacar que não se consideram variações da operação em tempo real com o despacho definido no planejamento, ou seja, supõe-se que a operação em tempo real segue fielmente a programação da operação definida a priori. Isso pode parecer uma simplificação significativa, no entanto não inviabiliza as comparações dos mecanismos, visto que ambos são comparados sem considerar variações em tempo real. Além disso, atualmente no Brasil o preço da energia elétrica não se altera em tempo real, e é resultado da programação da operação de curtíssimo prazo.

A seguir apresentam-se as premissas utilizadas no planejamento da operação eletroenergética e as informações do sistema elétrico considerados nas simulações.

#### 3.1 Planejamento da operação eletroenergética

A resolução do problema de planejamento da operação energética compreende em definir metas de geração para as usinas hidroelétricas e termoeletricas, para cada estágio de tempo do horizonte de planejamento, atendendo à demanda de energia elétrica e às restrições operativas do sistema (OLIVEIRA, 2020).

Devido ao seu tamanho e complexidade, a resolução de problemas de planejamento da operação em sistemas hidrotérmicos é usualmente separada em dois problemas, hierarquicamente conectados: Programação Hidrotérmica de Longo Prazo e Programação Hidrotérmica de Curto Prazo (SOARES; CARNEIRO, 1991). O problema de longo prazo tem como objetivo controlar o armazenamento dos reservatórios, de modo a maximizar a geração hidrelétrica e, como consequência, reduzir a geração termelétrica. Normalmente, aplica-se um horizonte de um ano ou maior, discretizados em intervalos semanais ou mensais (SOARES; CARNEIRO, 1991).

No entanto, considerando que a capacidade de armazenamento de um sistema é limitada pelos seus reservatórios e dado o desconhecimento das afluências futuras, há um acoplamento entre a decisão tomada no presente e suas consequências no futuro (OLIVEIRA, 2020).

Fundamentado na teoria de divisão de problemas em longo e curto prazo, criou-se dois algoritmos para resolução do problema de

planejamento, acoplados, com o objetivo de resolver o problema de planejamento energético. Nesse modelo o longo prazo é discretizado mensalmente (com o primeiro mês discretizado semanalmente) com horizonte de dez anos. Por outro lado, o problema de curto prazo é discretizado a cada hora com horizonte de uma semana. O acoplamento entre os dois problemas é dado por metas de volume final das usinas hidrelétricas.

Além disso, considera-se a modelagem de reservatórios agregados de energia - que representam a junção do reservatório de diversas usinas, desconsiderando o acoplamento geográfico - e caso determinístico de disponibilidade de água. Ademais, as variáveis referentes à modelagem das hidrelétricas são tratadas de forma energética, ao invés de volume e vazões. A modelagem utilizada é fundamentada no trabalho de Saravanan et al. (2013), cujos detalhes podem ser vistos em Lehmkuhl (2023).

Os algoritmos foram criados usando a linguagem de programação *Python*, utilizando-se bibliotecas para leitura de arquivos (*Pandas*), para cálculos matriciais (*Numpy*) e para resolução de problemas de programação linear (*SciPy*), utilizando o método *HiGHS dual solver*.

### 3.2 Sistema simulado

O sistema elétrico utilizado tem características operativas similares ao SIN, baseado nos dados de 2021 (ONS, 2023), como: capacidade instalada hidrelétrica, termelétrica, armazenamento máximo do sistema, geração eólica, geração fotovoltaica e capacidade de interligação entre os subsistemas. A Figura 1 apresenta o diagrama do sistema objeto de simulações. Os parâmetros por subsistema são apresentados na Tabela 1.

Como um dos objetivos do estudo é a avaliação da implicação no MRE da incorporação de mecanismos de capacidade, fez-se necessário definir a Garantia Física (GF) total dos empreendimentos hidrelétricos. Dessa maneira, utilizou-se o valor da GF das hidrelétricas despachadas centralizadamente do SIN, para o ano de 2021, resultando no valor de 55.174 MWh.

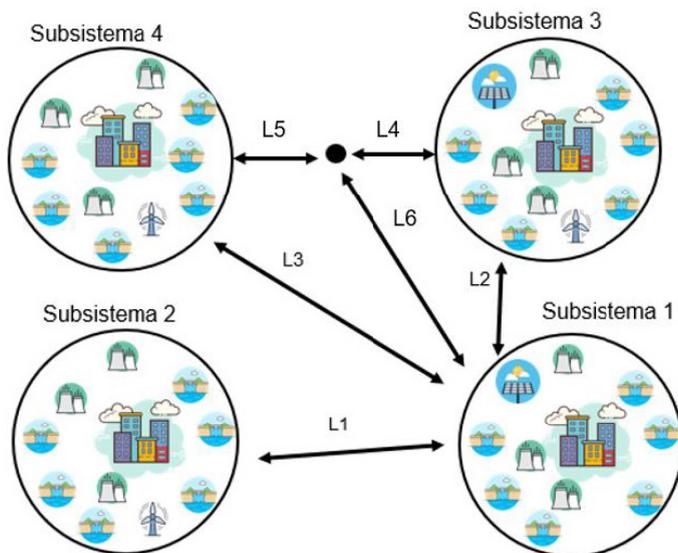


Figura 1 - Diagrama do sistema simplificado, com proporções do SIN

Tabela 1 – Principais parâmetros do sistema simulado

| Parâmetro                              | Subsistema |         |        |        |        |
|--|------------|---------|--------|--------|--------|
|  | Total      | 1       | 2      | 3      | 4      |
| Carga anual (MWm)                      | 69.529     | 40.327  | 12.168 | 11.198 | 5.736  |
| Capacidade instalada hidrelétrica (MW) | 108.815    | 58.225  | 17.280 | 11.037 | 22.273 |
| Capacidade instalada termelétrica (MW) | 23.204     | 9.774   | 2.957  | 6.742  | 3.731  |
| Armazenamento máximo (MW mês)          | 293.293    | 205.576 | 19.928 | 52.009 | 15.780 |
| Geração eólica anual (MWm)             | 7.929      | 0       | 697    | 7.029  | 203    |
| Geração fotovoltaica anual (MWm)       | 873        | 254     | 0      | 619    | 0      |

#### 4. MECANISMOS DE CAPACIDADE SIMULADOS

Com o objetivo de simular de forma quantitativa a influência de mecanismos de capacidade na operação e no mercado, criou-se alternativas de mecanismos fundamentados em propostas existentes. Para analisar e comparar a influência dos mecanismos de capacidade na operação do sistema e no mercado de energia elétrica, definiu-se indicadores de estudo. A Tabela 2 apresenta um resumo desses indicadores utilizados.

Tabela 2 – Indicadores analisados

| Indicador                 | Objetivo de análise  |
|---------------------------|--|
| CMO e PLD horário         | Volatilidade do custo de operação do sistema em cada hora. Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) considera valores mínimos de 68 \$/MWh e 998 \$/MWh, baseado no Custo Variável Unitário (CVU) das termelétricas. |
| MRE                       | Impacto financeiro para agentes hidrelétricos.   |
| Impacto para o consumidor | Custo de operação e contratação para os consumidores.  |

#### 4.1 Alternativa com inserção de termelétricas como reserva operativa

Similar ao modelo de reserva operativa discutido na Seção 2.1.1, criou-se um mecanismo de capacidade com o objetivo de atender a demanda em momentos de estresse do sistema, evitando impactos no mercado. Como o mecanismo não pode influenciar no preço de mercado, estabeleceu-se que nos momentos em que ocorreu o despacho das usinas contratadas como reserva operativa, o PLD considerado foi equivalente ao CVU da última termelétrica despachada que não faz parte do mecanismo de capacidade.

Com o intuito de mensurar a implicação da adoção do mecanismo para o sistema, fez-se necessário realizar o cálculo do encargo gerado pelo mecanismo de capacidade. Para tal, fundamenta-se no conceito de *Levelized Cost of Energy* (LCOE), que pode ser considerado o custo mínimo pela qual a energia deve ser vendida para atingir o ponto de equilíbrio durante a vida útil do projeto (LAI. MCCHULLOCH, 2017).

Assim, o custo de receita fixa a ser cobrado pela termelétrica para a viabilidade de implantação e operação - considerando um retorno nulo - deve considerar o valor de implantação, acrescido do custo de operação e manutenção e o custo esperado com combustível. A Equação (1) expõe a fórmula considerada neste trabalho, do valor de retorno anualizado para uma termelétrica contratada como reserva operativa.

$$CTro = P \left( \frac{CAPEX \cdot 1000}{Vu} + OPEX \cdot 1000 + CVU \cdot hP \cdot 12 \right) \quad (1)$$

Sendo que:

$CTro$  Custo anualizado, contratado como reserva operativa (\$)

$P$  Potência da termelétrica (MW)

|                      |  |
|----------------------|--|
| <i>CAPEX</i>         | Custo de implantação termelétrica (\$/kW)  |
| <i>V<sub>u</sub></i> | Vida útil da usina (anos)                  |
| <i>OPEX</i>          | Custo de operação e manutenção (\$/kW/ano) |
| <i>CVU</i>           | Custo variável unitário (\$/MWh)           |
| <i>h<sub>P</sub></i> | Tempo de geração na ponta (horas/mês)      |

Para definição dos parâmetros apresentados na Equação 1, fundamentou-se em valores apresentados por EPE (2022b). Portanto, considerando uma usina a gás natural de ciclo simples, calculou-se o retorno anualizado com os parâmetros definidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros associados para cálculo do encargo de reserva operativa

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| CAPEX (\$/kW)                         | 3.600 |
| Vida útil (anos)                      | 20    |
| OPEX (\$/kW/ano)                      | 80    |
| CVU (\$/MWh)                          | 600   |
| Tempo de geração na ponta (horas/mês) | 10    |

Com isso, como o valor do encargo visa cobrir todos os custos da usina, considerou-se que a geração das usinas contratadas por reserva operativa não é contemplada no custo de operação, sendo adicionadas apenas na parcela de encargos.

#### 4.2 Alternativa com inserção de termelétricas inflexíveis

Com o intuito de simular o impacto de um mecanismo de termelétricas inflexíveis, fundamentado na Lei n° 14.182/2021, criou-se um mecanismo em que são adicionadas 8.000 MW de capacidade termelétrica instalada no sistema. Ademais, definiu-se que tais usinas teriam inflexibilidade média mensal de 35% entre os meses de janeiro a maio, e de 95% entre os meses de junho a dezembro.

Para cálculo do impacto para o consumidor, a geração dessas termelétricas não foi considerada no custo da operação, sendo computadas apenas na parcela de encargos. Pelo fato de já ter sido verificado um leilão de reserva de capacidade, nos termos da Lei n° 14.182/2021, adotou-se o CVU médio das usinas vencedoras como o CVU das usinas do mecanismo de reserva operativa simulados, resultando em um valor de aproximadamente 140 \$/MWh (EPE, 2022c). Em relação ao custo de contratação, utilizou-se o valor de 444 \$/MWh, referente ao preço médio do leilão (EPE, 2022c).

Desse modo, calculou-se o encargo baseado no Encargo de Energia de Reserva (CCEE, 2022). A Equação (2) apresenta a metodologia utilizada para cálculo do valor do encargo para uma usina, como exemplo.

$$EncRO = (P \cdot Pv \cdot h_{mês}) - \sum_{t=1}^{h_{mês}} (GT_t \cdot PLD) \quad (2)$$

Sendo que:

- EncRO* Encargo de Reserva Operativa (\$)
- P* Potência da termelétrica (MW)
- Pv* Preço de venda (\$/MWh)
- GT<sub>t</sub>* Geração termelétrica no instante t (MWh)
- h<sub>mês</sub>* Tempo de duração do mês (horas)

Com isso, para cada mês de contabilização, há um valor de encargo a ser cobrado do mercado pagante, que para fins deste estudo foi considerado como a demanda total do sistema. Além disso, considerou-se que nos meses em que o PLD é superior ao preço de venda o encargo tem valor negativo, representando um repasse para os consumidores.

## 5. RESULTADOS

De modo a simular diferentes condições operativas do sistema, determinou-se um conjunto de casos, a serem considerados para cada alternativa de mecanismo de capacidade, conforme destacado pela Figura 2. Para se ter uma ampla variedade de condições foram definidos cenários com diferentes valores de Energia Natural Afluente (ENA), armazenamento inicial (Arm), perfil de geração renovável e perfil de demanda. A ENA é definida com base na Média de Longo Termo<sup>1</sup>(MLT). O armazenamento inicial representa a disponibilidade de água nas hidrelétricas no início do horizonte de estudo. Por sua vez, o perfil de geração renovável representa as curvas de geração das usinas eólicas e fotovoltaicas, considerando nessa curva a variabilidade e intermitências dessas fontes. O perfil da demanda representa a curva da demanda ao longo do horizonte de estudo. Essas quatro condições são então combinadas para gerar os 36 casos de estudo, conforme ilustrado na Figura 2. A título de exemplo, o caso 10 possui ENA igual

<sup>1</sup> Média das vazões naturais em um histórico desde o ano de 1931.

a 60% da MLT, armazenamento inicial de 50% do volume útil do sistema, perfil 2 de geração renovável e perfil 1 de variação de demanda.

Assim, a simulação dos mecanismos é feita para cada um dos casos, considerando um horizonte de um ano, em que os modelos de planejamento de curto e longo prazos são rodados de forma encadeada.

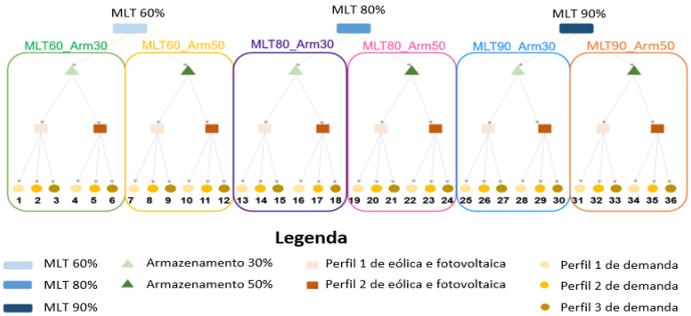
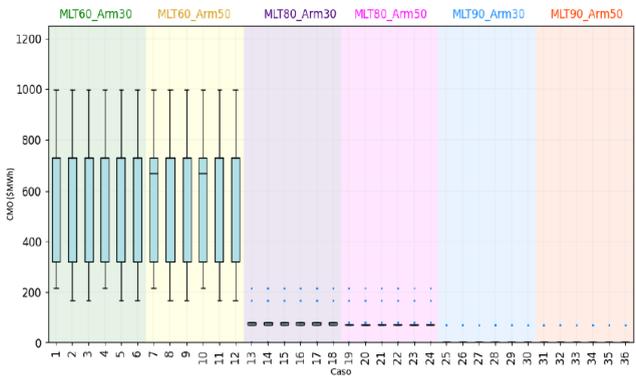


Figura 2 - Definição dos casos com agrupamento pela ENA e Armazenamento

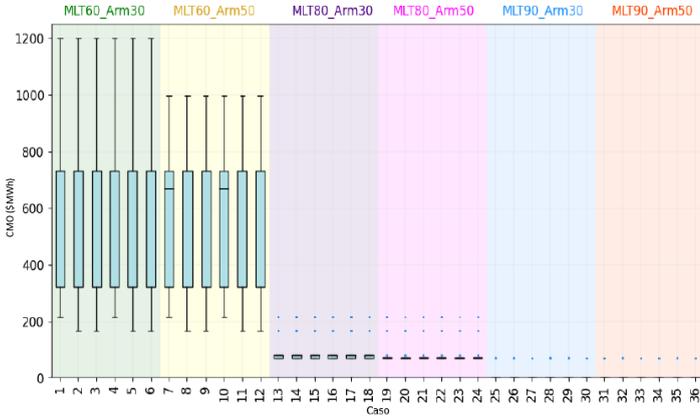
Com as simulações concluídas, avaliou-se os principais indicadores definidos na Tabela 2, apresentando os resultados e realizando análises para cada um, indicando os bônus e ônus da adoção dos mecanismos objetos desse estudo.

### 5.1 CMO e PLD horário

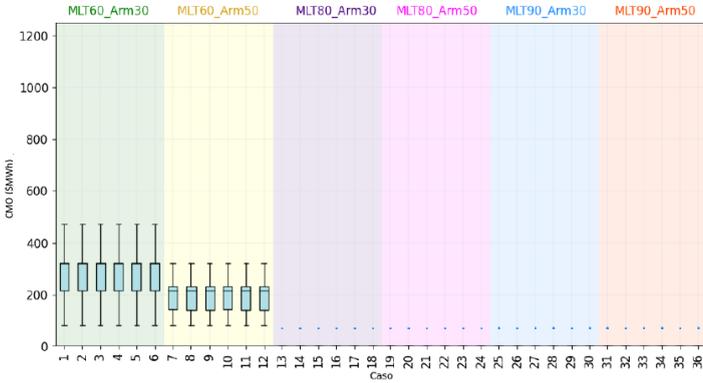
A Figura 3 apresenta a distribuição do CMO de todas as horas do ano simulado (compreendendo 8064 horas), por caso, para as alternativas: (a) sem mecanismo de capacidade, (b) com reserva operativa e, (c) com inflexibilidade térmica.



(a)



(b)



(c)

Figura 3 - Distribuição do CMO horário

Para a alternativa de mecanismo de capacidade de reserva operativa ocorre um aumento do CMO horário em alguns instantes, devido às termelétricas adicionadas ao sistema. Com isso, propicia-se um aumento da volatilidade do CMO. Já para os casos com hidrologia mais favorável, a inserção das termelétricas de reserva operativa não influenciou no despacho do sistema, mantendo a distribuição de CMO idêntica à alternativa sem mecanismo de capacidade.

Por sua vez, para a alternativa com termelétricas inflexíveis, apresentada na Figura 3 (c), constata-se a redução dos valores médios de CMO, assim como a redução da volatilidade, evitando o despacho de termelétricas mais caras.

Portanto, conclui-se que a adição de térmicas inflexíveis ao

ao sistema tende a implicar uma menor volatilidade do preço de curto prazo, para os casos mais críticos, dado que ocorre uma alteração do empilhamento térmico e, por consequência, ocorre a redução da geração térmica da ordem do mérito necessária para atender a demanda líquida (demanda descontada da geração de eólica, fotovoltaica e inflexibilidade térmica).

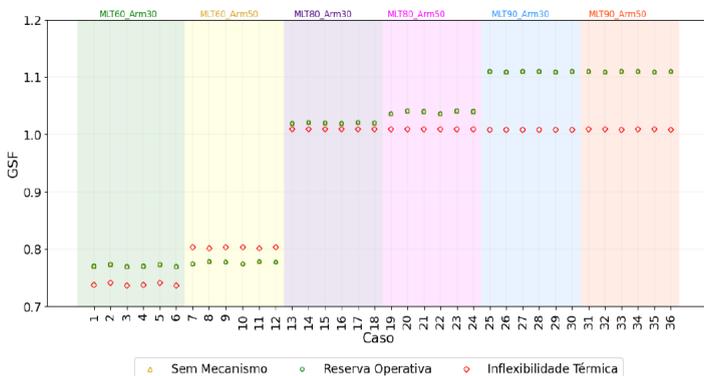
### 5.2 MRE

Outro ponto impactado pela incorporação de mecanismos de capacidade é o MRE, que nos últimos anos vem apresentando incoerências, como indicado pela recorrência de baixos valores de fator de ajuste de garantia física das usinas hidrelétricas (GSF, do inglês *Generation Scaling Factor*) (MME, 2019). Fundamentado na geração hidrelétrica simulada e na questão atinente ao MRE, verificou-se a média anual do GSF para cada caso e alternativa, disposto na Figura 4 (a).

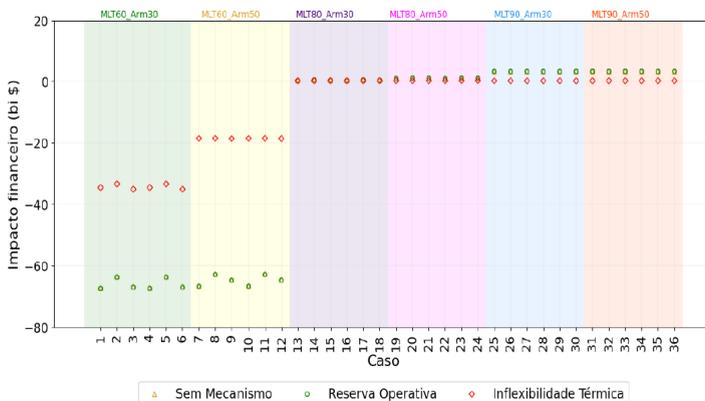
Conforme percebido pela geração hidrelétrica, para os casos do grupo MLT60\_Arm30, ocorre uma redução do GSF na alternativa de reserva operativa e inflexibilidade térmica, resultante da geração hidrelétrica reduzida. Porém, para os casos do grupo MLT60\_Arm50, ocorre uma elevação na geração hidrelétrica, já que o ganho de armazenamento em conjunto com a inflexibilidade térmica permite que não seja necessário guardar tanta água como os outros casos.

Para os demais casos a reserva operativa não altera o GSF, diferentemente da alternativa com inflexibilidade, que influenciou na redução da geração hidrelétrica em todos os casos.

Além disso, de modo a analisar o impacto financeiro para o MRE, calculou-se a exposição total dos agentes hidrelétricos, realizando o produto do PLD horário pela diferença entre geração horária e GF do sistema. A Figura 4 (b) exhibe o resultado para cada caso e alternativa.



(a)



(b)

Figura 4 – GSF e impacto financeiro (a) para cada caso e alternativa (b)

Para os casos do grupo MLT60\_Arm30, apesar da inserção de inflexibilidade térmica provocar um deslocamento da geração hidrelétrica (GSF menor na Figura 4 (a)), o impacto financeiro é menor que as demais alternativas devido à redução significativa do PLD. Para os demais casos (com exceção do conjunto MLT60\_Arm30 e MLT60\_Arm50), a inflexibilidade termelétrica provocou um impacto financeiro negativo maior para as usinas do MRE, conforme Figura 4 (b), dado que a redução do PLD não foi suficiente para compensar o deslocamento hidrelétrico.

Por fim, pondera-se sobre alguns pontos relativos ao MRE. Como a GF representa a energia elétrica que um equipamento consegue suprir ao sistema, é necessária a revisão periódica dos valores de GF para todas as usinas após a inserção de novas fontes no sistema. Atualmente essa revisão está prevista para as usinas hidrelétricas do MRE, de forma a revisar o valor a cada cinco anos. Porém, a matriz energética tem sua composição alterada ano após ano – influenciada, por exemplo, pela alta penetração das fontes eólica e solar, indicando que o período para revisão de GF pode ser menor, de modo a evitar a recorrência de valores baixos de GSF.

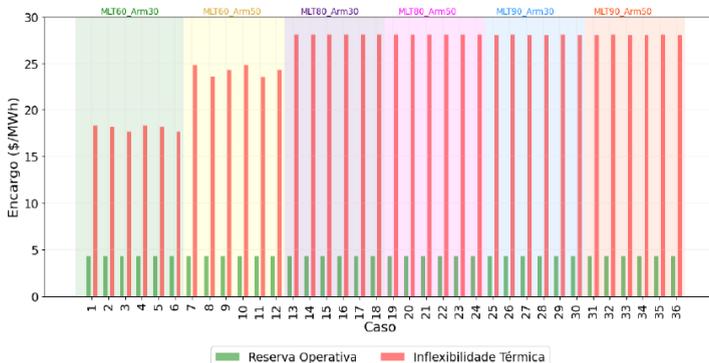
Além disso, ao contratar usinas com inflexibilidades, está sendo considerado uma contribuição energética para o sistema, e, ao aumentar a oferta de energia sem necessariamente ocorrer aumento da demanda de forma concomitante, propicia-se o deslocamento de fontes mais baratas, como hidrelétrica, sem ensejar um aumento da contribuição energética do sistema.

Todavia, caso as diretrizes de expansão sejam concentradas na

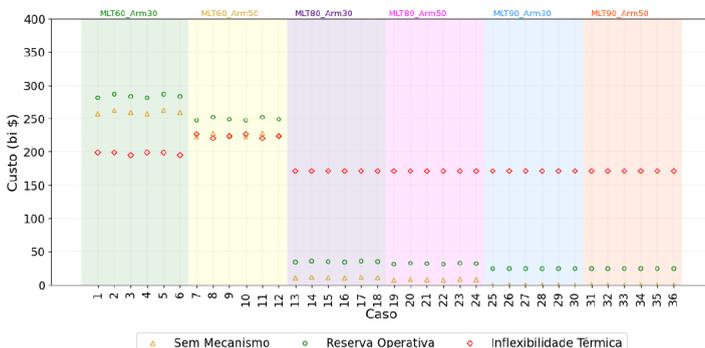
oferta com fontes alternativas – com potencial para reduzir a reserva do sistema ou deslocar as demais fontes de geração – dever-se-ia criar um mecanismo focado nas fontes deslocadas, mudando o paradigma do suprimento de energia para suprimento de potência, possibilitando a remuneração adequada.

### 5.3 Impacto para o consumidor

A avaliação do impacto para o consumidor foi separada em duas partes. Na primeira, avaliou-se somente o efeito dos encargos provenientes da contratação. Por sua vez, a segunda parte contemplou o custo total de operação do sistema, considerando custo imediato, custo futuro e os valores de encargos. A Figura 5 apresenta o valor médio anual do encargo e custo total de operação para as alternativas de reserva operativa e de inflexibilidade, proporcionalizado pelo mercado pagante.



(a)



(b)

Figura 5 - Encargo para os consumidores e custo total de operação

Percebe-se que em todos os casos a alternativa de inflexibilidade térmica provoca valores maiores de encargos que a alternativa de reserva operativa. Devido à dependência do encargo em relação ao PLD, em casos em que o preço é maior ocorre uma redução do valor do encargo. Porém, nos casos em que há maior disponibilidade de água, os valores dos encargos sofrem aumento, já que o PLD tem valor próximo ao valor mínimo. Portanto, observa-se que, em todos os casos, a alternativa com inflexibilidade implica uma cobrança para o consumidor superior à alternativa de reserva operativa.

De modo a simular o efeito para o consumidor que não possui contrato, examinou-se o custo total da operação do sistema, exibido na Figura 5 (b). Nesse caso, observa-se que em todas as alternativas a alteração dos níveis dos reservatórios iniciais tem pouca influência no custo de operação futuro do sistema, enquanto o aumento de ENA implica reduções significativas, tendo em vista que possibilita a redução do despacho termelétrico.

Em relação à reserva operativa, nota-se que o mecanismo proporcionou um aumento para o consumidor em todos os casos, devido ao encargo para a contratação das termelétricas (custo fixo), que são despachadas ao fim da ordem de mérito.

Apesar da contratação de termelétricas inflexíveis provocar um valor de encargo a ser cobrado dos consumidores, a inserção de geração termelétrica com baixo CVU provoca uma redução no custo de operação imediato e futuro. Porém, nos casos em que há melhoria nas condições hidrológicas, o mecanismo provoca um aumento do custo para o consumidor – inclusive em relação à alternativa sem mecanismo de capacidade. Isso advém da alta oferta de energia para o sistema, fazendo com que a operação do sistema fique muito barata. Com isso, qualquer termelétrica contratada como mecanismo com um CVU acima de zero provocará aumento do custo para os consumidores, por meio de encargos.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A penetração de fontes renováveis variáveis no sistema, concomitantemente com a definição de preços tetos regulatórios incapazes de remunerar adequadamente novos entrantes, além da inelasticidade da demanda, podem provocar efeitos indesejados para mercados puramente energéticos, proporcionando aumento do risco para adequação do suprimento.

A partir dos resultados encontrados constatou-se que todas as alternativas de mecanismo de capacidade consideradas implicaram vantagens e desvantagens para o mercado, a depender da condição operativa do sistema. O mecanismo de reserva operativa mostrou redução de risco em casos mais adversos de hidrologia, possibilitando

ganho de armazenamento, sem alterar a ordem de despacho térmico. Porém, percebeu-se uma piora da exposição financeira para os agentes do MRE, além da cobrança de encargo dos consumidores em todos os casos, inclusive naqueles em que não há despacho das usinas contratadas sob essa modalidade.

Por sua vez, com o mecanismo de inflexibilidade térmica percebeu-se uma redução de risco nos casos com hidrologia desfavorável, associada ao aumento do despacho termelétrico, provocando uma menor regularização dos reservatórios. Ademais, notou-se redução do PLD, tendo em vista que diminui a carga disponível para ser atendida com termelétrica com CVU acima de zero, propiciando redução na volatilidade do preço horário. Além disso, o deslocamento hidrelétrico das usinas do MRE pode, em alguns casos, acarretar amortização da exposição financeira desses agentes, devido à redução do PLD indicado anteriormente.

Apesar do mecanismo implicar redução do custo total para os consumidores em alguns casos, na maioria dos testes o mecanismo provocou elevação dos custos, devido aos encargos para remuneração das usinas contratadas. No que diz respeito à implementação desses mecanismos, deve-se avaliar a condição estrutural do sistema, de forma a não onerar em demasia os consumidores, sem necessariamente reduzir o risco da adequação do suprimento. Ressalta-se que a tarifa média residencial do Brasil é 734 R\$/MWh (ANEEL, 2024) e, portanto, aumentos de 5 R\$/MWh e 25 R\$/MWh, percebidos na Figura 5, resultariam em variações de 0,7% e 3,4% na tarifa dos consumidores.

No entanto, o planejamento deve ser avaliado considerando critérios de aversão ao risco e, levando isso em conta, a implicação de mecanismos de capacidade se mostraram benéficos sistemicamente, cada um com sua particularidade. Portanto, não é possível concluir qual mecanismo é melhor para o sistema, tendo em vista que cada um possui uma singularidade, com o *trade-off* entre custo para o consumidor e ganho de segurança do fornecimento. De toda forma, a característica intrínseca de fontes renováveis variáveis requer que as demais usinas proporcionem a flexibilidade no suprimento e, assim, deve-se ter alguma forma de remuneração adequada ou regras de operação de forma a não comprometer investimentos nos demais tipos de fontes de geração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Ranking da Tarifa Residencial. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas>.

BATLLE, C.; VÁZQUEZ, C.; RIVIER, M.; PÉREZ-ARRIAGA, I. J. Enhancing power supply adequacy in Spain: Migrating from capacity payments to reliability options. *Energy Policy*, v. 35, p. 4545-4554, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421507001462>.

BRASIL. Decreto nº 10.707 de 28 de maio de 2021. Regulamenta a contratação de reserva de capacidade, na forma de potência, de que tratam os art. 3º e art. 3º-A da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, e altera o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, e o Decreto nº 5.177, de 12 de agosto de 2004. Planalto, 2021.

CCEE. Regras de comercialização de energia: Contratação de Energia de Reserva. 2022. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/documents/80415/919404/18\\_-\\_Contratacao\\_de\\_Energia\\_de\\_Reserva\\_2022.5.0.pdf/3ee06a3c-1ead-ffc5-2f8b-5d05ee44006d](https://www.ccee.org.br/documents/80415/919404/18_-_Contratacao_de_Energia_de_Reserva_2022.5.0.pdf/3ee06a3c-1ead-ffc5-2f8b-5d05ee44006d).

CRAMTON, P.; OCKENFELS, A.; STOFT, S. Capacity Market Fundamentals. *Economics of Energy & Environmental Policy*, v. 2, p. 27-46, 2013. Disponível em: <https://www.iaee.org/en/publications/new-init.aspx?id=0&ptype=pdf>.

DE VRIES, L. J. Generation Adequacy: Helping the market do its job. *Utilities Policy*, v. 15, p. 20-35, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957178706000488>.

EPE. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031: Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão, 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico591/Caderno%20de%20Par%C3%A2metros%20de%20Custos%20-%20PDE2031.pdf>.

EPE. Leilão de reserva de capacidade na forma de energia 2022: Informações sobre a Habilitação Técnica e Projetos Vencedores, 2022c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-680/Informe%20Vencedores%20LRCE.pdf>.

EPE. Plano Decenal de Energia 2031, 2022a. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-637/PDE%202031\\_RevisaoPosCP\\_rvFinal\\_v2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-637/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf).

GORE, O.; VANADZINA, E.; VILJAINEN, S. Linking the energy-only market and the energy-plus-capacity market. *Utilities Policy*, v. 38, p. 52-61, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957178715301041>.

HACH, D.; CHYONG, C. K.; SPINLER, S. Capacity market design options: A dynamic capacity investment model and a GB case study. *European Journal of Operational Research*, v. 249, p. 691-705, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221715007894>.

LAI, C. S.; MCCULLOCH, M. D. Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energystore. *Applied Energy*, v. 190, p.191-203, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191631933X>.

LEHMKUHL, M. Avaliação de mecanismos de capacidade no Sistema Interligado Nacional. Orientador: Murilo Reolon Scuzziato. 2023. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

MME. GT Modernização do Setor Elétrico Portaria nº 187/2019: Aprimoramento do MRE. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-executiva/modernizacao-do-setor-eletrico/arquivos/pasta-geral-publicada/mre.pdf>.

OLIVEIRA, F. J. A. O planejamento da operação energética no sistema: conceitos, modelagem matemática, previsão de geração e carga. São Paulo: Artliber, 2020.

ONS. Histórico da operação: Geração de energia. 2023. Disponível em: [https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao\\_energia.aspx](https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx).

ORANYE, N.; ALABI, A. Effectiveness of a Priced Based Mechanism: Comparative Analysis of Price Based and Quantity Based Mechanisms. *Affordable and Clean Energy*, Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals, 2020. Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-319-71057-0\\_24-1](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-319-71057-0_24-1).

SARAVANAN, B. et al. A solution to the unit commitment problem—a review. *Frontiers in Energy*, v. 7, n. 2, p. 223–236, 2 abr. 2013. Disponível em: <https://link-springer-com.ez130.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11708-013-0240-3>.

SENER, A. C.; KIMBALL, S. Reviewing progress in PJM's Capacity Market structure via for the new reliability pricing model. *The Electricity Journal*, v. 20, no. 10, p.40-53, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S104061900700139X>.

SOARES, S; CARNEIRO, A. A. F. M. Optimal operation of reservoirs for electric generation. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, no. 3, 1991. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/85854>.

ZUCARATO, A. N. Mecanismos de capacidade em sistemas de energia elétrica com predominância de geração hidrelétrica. 116f. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

## ESTUDO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DE INVERSORES COM DUAS TOPOLOGIAS DIFERENTES E ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM DISTINTOS FATORES DE DIMENSIONAMENTO

Max May<sup>1</sup>  
Giuliano Arns Rampinelli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina

DOI: 10.47168/rbe.v30i2.875

### RESUMO

O aumento da demanda de energia evidencia a necessidade cada vez mais presente na busca por novas fontes energéticas, sobretudo fontes renováveis e com menor impacto ambiental. A energia solar fotovoltaica, tecnologia confiável, eficiente e com uma fonte abundante, ganha papel de destaque entre as novas fontes de energia. Nos últimos anos, o microinversor fotovoltaico, uma tecnologia já conhecida, porém ainda pouco difundida devido ao seu alto custo, passou a ganhar uma parcela significativa do mercado, disputando o espaço com inversores *string*. Porém, a escolha do inversor pode afetar diretamente o desempenho global dos sistemas fotovoltaicos, incluindo a qualidade da energia elétrica gerada e o desempenho do sistema. Assim, este artigo analisa a qualidade da energia elétrica gerada e o desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão com inversores de distintas topologias e fatores de dimensionamento. Foram analisados três sistemas fotovoltaicos, localizados em diferentes localidades na região sul do Brasil. O Sistema FV 1 está instalado no telhado de uma edificação na cidade de Santa Rosa do Sul, Santa Catarina, o Sistema FV 2 está instalado no telhado de uma edificação na cidade de Alpestre, Rio Grande do Sul, e por fim o Sistema FV 3, que está instalado no telhado de uma planta piloto bioclimática no campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Foram coletados dados utilizando um analisador da qualidade da energia elétrica, em diferentes períodos entre 2022 e 2023, para a análise das distorções harmônicas, e também dados de produção diária de energia elétrica, entre 2023 e 2024, obtidos diretamente dos sistemas de monitoramento dos inversores, para a análise do desempenho energético dos diferentes sistemas. Os resultados indicam que, em geral, os sistemas com inversores *string* (SF 1, SF2 e SF 3 (subsistema C)), mantiveram os níveis de distorção harmônica dentro dos limites normativos, enquanto o sistema com microinversor (subsistema D)

apresentou maior variabilidade nos dados, especialmente em potências relativas baixas. Em termos de produtividade, os Sistemas FV 1, FV 2 e o subsistema C demonstraram índices de produtividade satisfatórios, com destaque para o subsistema C, que superou o subsistema D em 3,23%, considerando o mesmo período de análise. Conclui-se que a escolha da topologia do inversor e o fator de dimensionamento dos sistemas influenciam significativamente tanto a qualidade da energia elétrica quanto a produtividade do sistema, sendo, no estudo em análise, os inversores *string* mais estáveis em termos de qualidade de energia.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica; Inversor *string*; Microinversor; Qualidade de energia elétrica; Desempenho de sistemas fotovoltaicos.

### ABSTRACT

The increase in energy demand highlights the ever-growing need to seek new energy sources, especially renewable sources with lower environmental impact. Photovoltaic solar energy, a reliable and efficient technology with an abundant source, is gaining prominence among new energy sources. In recent years, the photovoltaic microinverter, a technology already known but still not widely adopted due to its high cost, has started to gain a significant share of the market, competing with string inverters. However, the choice of inverter can directly affect the overall performance of photovoltaic systems, including the quality of the generated electricity and system performance. Therefore, this article analyzes the quality of the generated electricity and the performance of photovoltaic systems connected to the low-voltage grid with inverters of different topologies and sizing factors. Three photovoltaic systems located in different locations in the southern region of Brazil were analyzed. Photovoltaic System 1 is installed on the roof of a building in Santa Rosa do Sul, Santa Catarina; Photovoltaic System 2 is installed on the roof of a building in Alpestre, Rio Grande do Sul; and finally, Photovoltaic System 3 is installed on the roof of a bioclimatic pilot plant on the Araranguá campus of the Federal University of Santa Catarina (UFSC). Data was collected using a power quality analyzer during different periods between 2022 and 2023 to analyze harmonic distortions. Additionally, daily electricity production data from 2023 to 2024, obtained directly from the inverters' monitoring systems, was used to analyze the energy performance of the different systems. The results indicate that, in general, systems with string inverters (PV 1, PV 2, and PV 3 (subsystem C)) maintained harmonic distortion levels within normative limits, while the system with a microinverter (subsystem D) showed greater variability in the data, especially at low relative power levels. In terms of productivity, PV Systems 1, 2, and subsystem C

demonstrated satisfactory productivity rates, with subsystem C outperforming subsystem D by 3.23%, considering the same analysis period. It is concluded that the choice of inverter topology and the sizing factor of the systems significantly influence both the quality of electricity and system productivity, with string inverters being more stable in terms of power quality in this study.

Keywords: Photovoltaic energy; String inverter; Microinverter; Power quality; Photovoltaic system performance.

## 1. INTRODUÇÃO

A forma atual com que o mundo produz energia ainda é fortemente dependente dos combustíveis fósseis, como gás natural, petróleo e carvão. Estas fontes acabam gerando problemas sociais e ambientais, como aquecimento global, poluição do ar e acidificação do ambiente. A escolha de uma estratégia energética inevitavelmente significa escolher uma estratégia ambiental. Sendo assim, a transição gradual para uma combinação mais ampla e sustentável de fontes de energia, com o avanço na tecnologia de fontes renováveis, contribuiria para um futuro mais sustentável (WCED, 1987).

Em 2021, devido à grande escassez hídrica ocorrida ao longo do ano, a matriz elétrica brasileira sofreu mudanças significativas. A redução nos níveis dos reservatórios provocou uma redução na oferta de hidroeletricidade, sendo essa compensada pelo aumento de outras fontes, como a energia solar fotovoltaica, que apresentou um aumento de 79,8% em 2022, em relação ao ano de 2021. A participação da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica nacional, considerando usinas de geração centralizada, passou de 2,5% em 2021, para 4,4% em 2022 (EPE, 2023).

Marco regulatório da energia fotovoltaica no Brasil, a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu condições para o acesso da microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de energia elétrica. No decorrer dos anos, a resolução sofreu atualizações, sendo a mais recente, a Resolução Normativa ANEEL nº 1059 de 07 de fevereiro de 2023. Sendo assim, desde 2012, é possibilitado aos usuários do sistema de energia elétrica produzirem sua própria energia, disponibilizar a mesma para a rede elétrica, e obter abatimentos futuros em suas faturas de energia. Em 2022, a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro, consolidou o marco legal da micro e minigeração distribuída, reforçando os direitos dos consumidores e criando um ambiente ainda mais propício para o investimento em energia solar fotovoltaica por parte dos usuários (BRASIL, 2022).

Ainda de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2023,

a microgeração e a minigeração distribuída apresentaram um aumento de 88% no ano de 2022, quando comparado com o ano de 2021. A energia solar fotovoltaica foi a principal responsável por esse aumento, com uma participação de 94,3%. No mês de julho de 2024, de acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a geração centralizada e geração distribuída com base em geração solar fotovoltaica atingiu 44.397 MW de potência instalada, tendo a geração distribuída uma porcentagem de 68% desse valor. Na geração centralizada, destacam-se os estados de Minas Gerais e Bahia, enquanto que na geração distribuída destacam-se São Paulo e Minas Gerais.

As melhorias técnicas apresentadas nos sistemas fotovoltaicos os tornam viáveis para uso em diversas aplicações. Devido ao desenvolvimento na tecnologia de semicondutores, o custo da tecnologia acaba diminuindo. Além disso, a melhoria na eletrônica de potência ajuda a melhorar a eficiência da energia gerada. O principal dispositivo para converter a energia gerada por módulos fotovoltaicos de Corrente Contínua (CC) para Corrente Alternada (CA) são os inversores, divididos basicamente em três topologias: inversor central, *string/multi-string* e microinversor (DESHPANDE; BHASME, 2017). O diferencial dos microinversores em relação aos inversores central e *string* é a sua modularidade, facilitando assim a expansão, menores perdas por condução, e capacidade de encontrar o ponto de máxima potência para cada módulo, eliminando perdas por *mismatch* (DE HAAN; OLDENKAMP; WILDENBEEST, 1994). O mercado global de microinversores registrou um crescimento exponencial nos últimos anos, com uma previsão de crescimento de 2,87 bilhões de dólares em 2023 para 3,5 bilhões de dólares em 2024, com uma taxa de crescimento de 21,8%. Até 2028, espera-se um crescimento até 7,27 bilhões de dólares (RESEARCHANDMARKETS, 2024).

Um ponto importante relacionado aos inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos diz respeito à qualidade da energia elétrica. Inversores acabam gerando distorções harmônicas, sendo essas fortemente dependentes da energia gerada. Em condições em que a energia gerada é baixa, o conteúdo de harmônicas geradas é alto (CHICCO, 2005). Essas harmônicas acabam tendo uma grande influência na eficiência operacional e confiabilidade do sistema (JAIN; SINGH, 2011). Ao contrário das centrais elétricas convencionais, os sistemas fotovoltaicos estão normalmente conectados a sistemas de baixa e média tensão. Isso leva a novos desafios para um funcionamento seguro e confiável do sistema de distribuição, visto que geralmente sistemas fotovoltaicos podem estar concentrados em algumas áreas, ao invés de estarem uniformemente distribuídos. Problemas técnicos típicos de sistemas de distribuição, como sobretensões locais e sobrecargas de equipamentos, podem ocorrer (BRAUN et al., 2012).

O crescente aumento na instalação e interesse em sistemas fotovoltaicos conectados à rede fez com que topologias até então consideradas não ideais de um ponto de vista econômico, como os microinversores, obtivessem uma maior inserção no mercado. Diferenças na topologia dos inversores e sua forma de conexão aos módulos fotovoltaicos podem influenciar aspectos como a qualidade da energia elétrica e desempenho (CHEPP; KRENZINGER, 2018; DELINE et al., 2012; FAMOSO et al., 2015; HARB et al., 2013; SCHENKEL, 2015).

Partindo desses pressupostos, este artigo tem como objetivo realizar uma avaliação comparativa entre duas topologias de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos, considerando também diferentes fatores de dimensionamento. Foram analisados indicadores da qualidade da energia elétrica e indicadores de desempenho.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados três sistemas fotovoltaicos conectados à rede, localizados em diferentes cidades brasileiras, e com diferentes configurações.

A Figura 1 apresenta um fluxograma da metodologia utilizada.

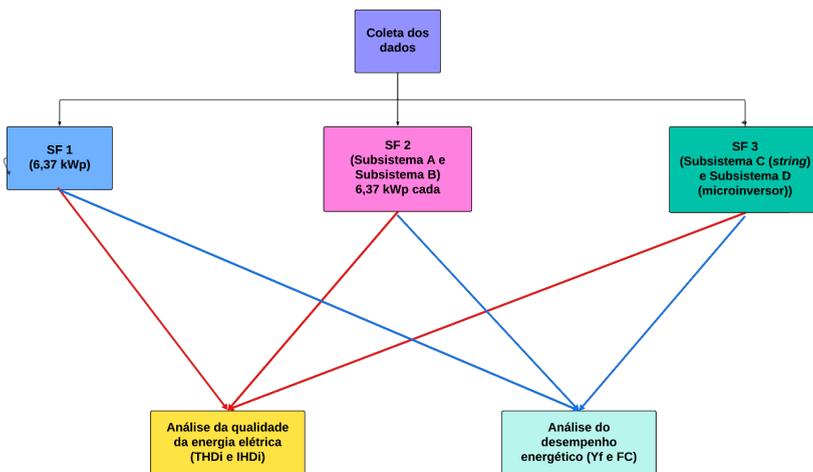


Figura 1 - Fluxograma da metodologia utilizada

O Sistema FV 1 está instalado no telhado de uma edificação na cidade de Santa Rosa do Sul, Santa Catarina (Latitude 29° 8' 15" S e Longitude 49° 42' 45" W), sendo composto por duas *strings* em paralelo, contando cada uma com sete módulos de 455 Wp conectados em série, totalizando 6,37 kWp, e um inversor *string* com potência nominal de 5 kW.

O Sistema FV 2 está instalado no telhado de uma edificação na cidade de Alpestre, Rio Grande do Sul (Latitude 27° 14' 42" S e Longitude 53° 1' 41" W), sendo composto por dois subsistemas idênticos, sendo esses denominados subsistemas A e B, cada um sendo constituído por duas *strings* em paralelo, contando cada uma com sete módulos de 455 Wp conectados em série, totalizando 6,37 kWp, e um inversor *string* com potência nominal de 5 kW.

O Sistema FV 3 está instalado no telhado de uma planta piloto bioclimática no campus Araranguá, da Universidade Federal de Santa Catarina (Latitude 28° 56' 54" S e Longitude 49° 29' 53" W), e é composto por dois subsistemas, denominados subsistemas C e D. O subsistema C, com inversor *string*, apresenta uma potência instalada de 0,99 kWp, sendo composto por três módulos, com potência de 330 Wp cada, conectados em série, e um inversor, com potência de 1,5 kW. O subsistema D, com microinversor, apresenta uma potência instalada de 0,92 kWp, sendo composto por dois módulos com potência de 460 Wp e um microinversor com potência de 2 kW.

Os sistemas FV 1 e 2 apresentam o mesmo modelo de módulo fotovoltaico, inversor, e configuração, sendo diferentes somente na potência total instalada. Sendo assim, os dois apresentam o mesmo valor de Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI), 0,78, e o mesmo valor de Fator de Carregamento do Inversor (FCI), 1,27. Os subsistemas C e D apresentam diferentes modelos de módulos fotovoltaicos, inversor e configuração, sendo diferente também o seu FDI. Para o subsistema C, esse valor é de 1,51, e para o subsistema D, o valor é de 2,17. Em relação ao FCI, o subsistema C apresenta um FCI de 0,66, e o subsistema D apresenta um FCI de 0,46.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre as características de cada sistema, a Tabela 2, apresenta as especificações dos módulos fotovoltaicos dos sistemas em estudo, e a Tabela 3 apresentam as especificações dos inversores utilizados.

Tabela 1 – Comparativo entre as características de cada sistema analisado

| Sistemas     |              | Módulos (Wp) | Potência total (kWp) | Potência nominal inversor (kW) | FDI  | FCI  |
|--------------|--------------|--------------|----------------------|--------------------------------|------|------|
| Sistema FV 1 |              | 455          | 6,37                 | 5,0                            | 0,78 | 1,27 |
| Sistema FV 2 | Subsistema A | 455          | 6,37                 | 5,0                            | 0,78 | 1,27 |
|              | Subsistema B | 455          | 6,37                 | 5,0                            | 0,78 | 1,27 |
| Sistema FV 3 | Subsistema C | 330          | 0,99                 | 1,5                            | 1,51 | 0,66 |
|              | Subsistema D | 460          | 0,92                 | 2,0                            | 2,17 | 0,46 |

Tabela 2 – Comparativo entre os módulos fotovoltaicos de cada sistema analisado

| Especificação     | Sistemas FV 1 e 2          | Subsistema C           | Subsistema D          |
|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|
| Fabricante        | Canadian Solar             | BYD                    | Jinko Solar           |
| Modelo            | CS3W-455MS                 | 330 P6C-36             | JKM460-60HL4          |
| P <sub>max</sub>  | 455 Wp                     | 330 Wp                 | 460 Wp                |
| V <sub>mp</sub>   | 41,30 V                    | 37,16 V                | 34,20 V               |
| I <sub>mp</sub>   | 11,02 A                    | 8,88 A                 | 13,45 A               |
| V <sub>oc</sub>   | 49,03 V                    | 46,98 V                | 41,48 V               |
| I <sub>sc</sub>   | 11,66 A                    | 9,31 A                 | 14,01 A               |
| Eficiência        | 20,60%                     | 17,00%                 | 21,32%                |
| Tipo de Células   | Silício monocristalino     | Silício policristalino | Tipo P Monocristalino |
| Número de Células | 144 [2x (12 x 6)] unidades | 72 (6 x 12) unidades   | 120 (6 x 20) unidades |
| Dimensões         | 2108 x 1048 x 40 mm        | 1962 x 992 x 35 mm     | 1903 x 1134 x 30 mm   |

Tabela 3 – Comparativo entre os inversores de cada sistema analisado

| Especificação             | Sistemas FV 1 e 2      | Subsistema C           | Subsistema D           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Fabricante                | Growatt                | PHB Solar              | Deye                   |
| Modelo                    | MIN 5000TL-X           | PHB1500-SS             | SUN-2000G              |
| Potência Nominal de Saída | 5000 W                 | 1500 W                 | 2000 W                 |
| Corrente Máxima de Saída  | 22,7 A                 | 8,00 A                 | 9,6 A                  |
| Tensão Nominal/Range      | 230 V/(180-280 V)      | 220 V/(176-242 V)      | 220 V/(176-242 V)      |
| Frequência Nominal        | 60 Hz                  | 60 Hz                  | 50/60 Hz               |
| Fator de Potência         | Unitário               | Unitário               | > 0,99                 |
| THD                       | < 3%                   | < 5%                   | < 3%                   |
| Eficiência Máxima         | 98,40%                 | 97%                    | 96,50%                 |
| Eficiência Europeia       | 97,50%                 | -                      | 95%                    |
| Eficiência MPPT           | 100%                   | > 99,5%                | 99%                    |
| Topologia                 | <i>Transformerless</i> | <i>Transformerless</i> | <i>Transformerless</i> |

## 2.1 Qualidade da energia elétrica

Em relação a qualidade da energia elétrica, foram utilizados analisadores da qualidade de energia elétrica do fabricante IMS, modelo PowerNET P-600 G4. O equipamento está em conformidade com as normas International Electrotechnical Commission (IEC 61000-4-7), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 14519) e ABNT NBR 14520, fornecendo, entre outros, dados de tensão, corrente, frequência, fator de potência, harmônicas de tensão e de corrente. Todas as medidas foram obtidas com intervalos de um minuto. Para o SF 1, foram coletados dados entre janeiro de 2023 e março de 2023. Para o

SF 2, foram coletados dados em novembro de 2022. Em relação ao SF 3, os dados coletados correspondem aos meses de janeiro de 2023, maio de 2023 e agosto de 2023. Em todos os casos, foram realizadas análises pontuais, com períodos compreendidos entre 8 e 18 horas, em dias com grande produção de energia elétrica, buscando comparar períodos em que a energia gerada pelos sistemas foi a máxima, com altas taxas de irradiação, com períodos em que a produção é baixa. Assim, foi possível analisar a produção de distorções harmônicas de corrente em diferentes condições de carregamento dos inversores.

No Brasil, a qualidade da energia elétrica é regulamentada pela Resolução Normativa ANEEL nº 956, de 7 de dezembro de 2021, que estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. No seu módulo 8, o PRODIST aborda os fenômenos associados à qualidade da energia elétrica, sendo divididos em fenômenos de regime permanente e fenômenos de regime transitório. Os fenômenos de regime permanente incluem variações de tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência. Os fenômenos de regime transitório incluem as variações de tensão de curta duração (ANEEL, 2021).

A Norma ABNT NBR 16149: 2013 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, estabelece os parâmetros que devem ser observados em relação à qualidade de energia elétrica, sendo eles a tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência. A mesma apresenta as faixas de valores em que o sistema pode operar.

À medida que a capacidade dos sistemas fotovoltaicos aumenta significativamente, o impacto desses módulos na rede elétrica se torna mais evidente. Com uma maior penetração da geração distribuída nas redes elétricas existentes, problemas como variação de tensão, instabilidade, interferências, cintilação e sobretudo harmônicos se tornam mais acentuados. Em condições de baixa radiação solar, os inversores operam com uma grande não linearidade, gerando assim uma saída com maior conteúdo harmônico (SUNNY; ANTO, 2013). É necessário que a tensão de saída seja sincronizada com o sinal de tensão da rede, de modo a gerar uma corrente o mais próxima possível de uma onda senoidal, com baixa distorção harmônica. Porém, isso acaba não ocorrendo de maneira ideal, e em baixas potências há o aparecimento de harmônicas (URBANETZ, 2010).

AABNT NBR 16149:2013 estabelece que a distorção harmônica total de corrente para sistemas fotovoltaicos deve ser inferior a 5% em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Logo, os valores das harmônicas individuais devem estar limitados aos valores da Tabela 4, conforme especificado na ABNT NBR 16149: 2013.

Tabela 4 – Limites de distorção harmônica de corrente

| Harmônicas Ímpares | Limite de Distorção |
|--------------------|---------------------|
| 3ª a 9ª            | < 4,0%              |
| 11ª a 15ª          | < 2,0%              |
| 17ª a 21ª          | < 1,5%              |
| 23ª a 33ª          | < 0,6%              |
| Harmônicas Pares   | Limite de Distorção |
| 2ª a 8ª            | < 1,0%              |
| 10ª a 32ª          | < 0,5%              |

A análise das distorções harmônicas foi realizada com o auxílio de indicadores, sendo utilizados neste trabalho a Distorção Harmônica Total de Corrente ( $THD_i$ ) e Distorção Harmônica de Corrente Individual ( $IHD_i$ ). As Equações 1 e 2 apresentam esses indicadores (ARRILLAGA; WATSON, 2003).

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$IHD_i = \frac{I_h}{I_i} \cdot 100\% \quad (2)$$

onde  $h$  é a ordem harmônica,  $h_{max}$  é a ordem harmônica máxima,  $V_h$  é o valor eficaz da tensão de ordem “ $h$ ”,  $I_h$  é o valor eficaz da corrente de ordem “ $h$ ”,  $V_1$  é o valor eficaz da tensão fundamental e  $I_1$  é o valor eficaz da corrente fundamental.

A  $THD_i$  é definida como a razão entre o valor eficaz das componentes harmônicas de corrente e o valor eficaz da componente fundamental da corrente (RAMPINELLI et al., 2015).

## 2.2 Desempenho dos sistemas fotovoltaicos

Para as análises referentes ao desempenho dos sistemas fotovoltaicos foram utilizados dados dos sistemas de monitoramento dos inversores, em que podem ser obtidos os dados relativos à geração-fotovoltaica de cada sistema. Para os sistemas FV 1 e 2, foram utilizados dados relativos à produção diária. Para o sistema FV 3, foram obtidos dados diários, com intervalos de cinco minutos, tanto para o subsistema C como para o subsistema D. Nos dois casos, os dados são apresentados através de planilhas no formato .xlsx. Para o subsistema C, foi possível obter dados de monitoramento durante 12 meses

completos (fevereiro de 2023 a janeiro de 2024), podendo assim verificar as variações na produção de energia elétrica ao longo do ano, e analisar possíveis influências, conforme as estações do ano. Para o subsistema D, devido à problemas na transmissão dos dados, foi possível obter a produção mensal de somente oito meses (março a agosto de 2023, dezembro de 2023 e janeiro de 2024). Sendo assim, foi realizada uma análise comparativa de desempenho entre o subsistema C e D para um período de oito meses.

Para análise e comparativo entre diferentes sistemas, com diferentes potências, foram utilizados indicadores de desempenho. A Norma IEC 61724-1 (1998) estabelece esses indicadores para quantificar o desempenho de sistemas fotovoltaicos. Para a análise de desempenho dos sistemas apresentados neste artigo, foi calculado o índice de produtividade ( $Y_f$ ).

O índice de produtividade ( $Y_f$ ) é calculado pela razão entre a potência total produzida pelo sistema pela potência instalada. Representa a geração de energia elétrica em um dado período, considerando cada kWh gerado para kWp instalado. Com o auxílio deste indicador, é possível comparar sistemas com diferentes tamanhos. A Equação 3 apresenta o índice de produtividade:

$$Y_f = \frac{E_{out}}{P_0} \quad (3)$$

onde  $E_{out}$  é a energia gerada, em kWh, e  $P_0$  é a potência instalada, em kWp.

Outro indicador calculado para as análises referentes ao desempenho foi o Fator de Capacidade ( $FC$ ), que é definido pela razão entre a produção atual de energia elétrica e a produção teórica se o sistema operasse 24 horas por dia em sua potência nominal na condição padrão (Irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C). O Fator de Capacidade é calculado pela Equação 4 (RAMPINELLI et al., 2023):

$$FC = \frac{E_{AC}}{E_{STD}} \quad (4)$$

onde  $E_{AC}$  é a energia elétrica entregue para a rede, e  $E_{STD}$  é a energia elétrica que seria entregue para a rede se o sistema operasse 24 horas por dia em sua potência nominal na condição padrão.

Um parâmetro importante relacionado ao desempenho de sistemas fotovoltaicos é o Fator de Dimensionamento de Inversores ( $FDI$ ), que representa a relação entre a potência nominal do inversor e a potência de pico do gerador fotovoltaico. Essa relação é dada pela Equação 5.

$$FDI = \frac{P_{Nca}(W)}{P_{FV}(W_p)} \quad (5)$$

onde  $P_{Nca}$  é a potência nominal em corrente alternada do inversor e  $P_{FV}$  é a potência de pico do gerador fotovoltaico.

De acordo com estudos realizados na década de 1990, inversores dimensionados com uma capacidade inferior à capacidade do gerador fotovoltaico geralmente levam a um melhor desempenho do sistema, principalmente em locais com pouca irradiação solar. Também, o dimensionamento correto do inversor influencia a eficiência e os níveis de distorção harmônica de corrente do inversor, sendo menos adequados quando esses operam abaixo de 50% da potência nominal (MACÊDO, 2006). Estudo realizado por Deschamps (2018), mostrou que para os carregamentos normalmente utilizados em sistemas fotovoltaicos, em torno de 1,2, as perdas por sobrecarregamento variam de 0,3 a 2,4%, dependendo da tecnologia. Para as tecnologias mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos, o  $FCI$  ótimo foi estimado em cerca de 1,26.

O  $FDI$  é dependente do inversor, da tecnologia do módulo, da orientação e inclinação do sistema, da temperatura e da radiação. Estudos mostram que valores recomendados de  $FDI$  variam de 0,75 a 0,85, sendo o limite superior 1,05 (PINHO; GALDINO, 2014).

Outro parâmetro importante para análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos é o Fator de Carregamento do Inversor ( $FCI$ ), definido como a relação entre a potência de pico do gerador fotovoltaico e a potência nominal do inversor. Essa relação é dada pela Equação 6.

$$FCI = \frac{P_{FV}(W_p)}{P_{Nca}(W)} \quad (6)$$

onde  $P_{Nca}$  é a potência nominal em corrente alternada do inversor e  $P_{FV}$  é a potência de pico do gerador fotovoltaico.

Ao realizar o dimensionamento de um sistema, o mesmo deve ser projetado para que o inversor não seja pouco utilizado, nem muito sobrecarregado. Logo, segundo Nascimento (2013), utilizando-se um inversor de menor capacidade do que o arranjo fotovoltaico, sem impactar na qualidade da energia e na energia gerada, o custo por kWh será menor.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção será apresentada uma análise referente à qualidade da energia elétrica dos sistemas em estudo, assim como uma

análise do desempenho energético dos mesmos. São apresentados dados da THDi e componentes harmônicas dos sistemas analisados, bem como dados do índice de produtividade e fator de capacidade, obtidos a partir de grandezas medidas com o analisador da qualidade de energia elétrica, e também grandezas obtidas dos sistemas de monitoramento dos inversores.

### 3.1 Análise da qualidade da energia elétrica

#### 3.1.1 Sistema fotovoltaico 1

A Figura 2 apresenta os valores médios de  $THD_i$  em função da potência relativa do inversor para o sistema FV 1 para o dia 8 de fevereiro de 2023. Para o sistema em questão, valores com potência relativa acima de 97,5% foram considerados como potência nominal, levando em consideração dados de especificação de potência do inversor. Para potências relativas superiores a 20%, os valores de  $THD_i$  ficaram abaixo de 4%, e para potências relativas superiores a 50% os valores de  $THD_i$  ficaram abaixo de 2%. Com o inversor operando em potência nominal, os valores de  $THD_i$  também ficaram abaixo de 2%. Todos os valores ficaram dentro do estabelecido pela norma técnica ABNT NBR 16149: 2013.

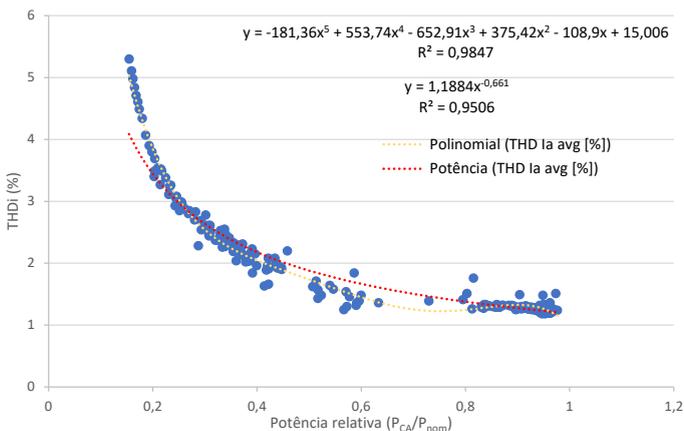


Figura 2 –  $THD_i$  em relação a potência relativa para o Sistema FV 1

Na Figura 2 foi utilizada uma linha de tendência polinomial de ordem 5, com objetivo de modelar com mais precisão as pequenas flutuações ao longo da curva e uma linha de tendência de potência, que fornece uma visão de geral de como a  $THD_i$  diminui com o aumento da potência relativa.

A Figura 3 apresenta as médias das componentes harmônicas

para potências relativas de 100%, 50% e 20%. As componentes harmônicas com maior influência na distorção total são as de ordem 3 e 5. Com o inversor operando em potência nominal, a principal componente harmônica que mais contribui para a distorção harmônica total é a de ordem 3, chegando a um valor de 0,85%, seguida pela de ordem 5, com um valor de 0,56%. Em potências relativas de 50%, o mesmo padrão é seguido, com a predominância da harmônica de ordem 3, seguida pela harmônica de ordem 5. Em potências relativas de 20%, ocorre uma inversão na predominância das componentes harmônicas com maior participação na distorção harmônica total. A harmônica com maior predominância passa a ser a de ordem 5, com um valor de 2,54%, seguida pela harmônica de ordem 3, com um valor de 1,44%. Todas as componentes, em todas as potências relativas analisadas, ficaram dentro dos limites estabelecidos em norma. Estudo realizado por Vinayagam et al. (2019) mostrou que, em baixas potências, as harmônicas predominantes foram as de ordem 3, 5, 7, 9, 11 e 13. No sistema em análise, como mencionado, as harmônicas predominantes foram as de ordem 3 e 5, seguidas pelas de ordem 2, 7, 9, 11 e 17. Em estudo realizado por Beliski et al. (2011), também foi demonstrado que, independentemente do carregamento do inversor, a componente harmônica que apresenta o maior valor é a de ordem 5, seguida pelas de ordem 2 e 3. Segundo Rampinelli et al. (2023), inversores atuais, com topologia *transformerless*, apresentam uma distorção harmônica total de corrente em potência nominal na faixa de 1%, diferentemente de inversores antigos, com transformadores de alta e baixa frequência, que apresentam valores entre 3 e 4%, em potência nominal (RAMPINELLI et al., 2023). Mesmo com todos os valores estando dentro dos limites estabelecidos pela norma técnica ABNT NBR 16149:2013, é importante frisar que os limites são estabelecidos para situações em que o inversor opera em potência nominal.

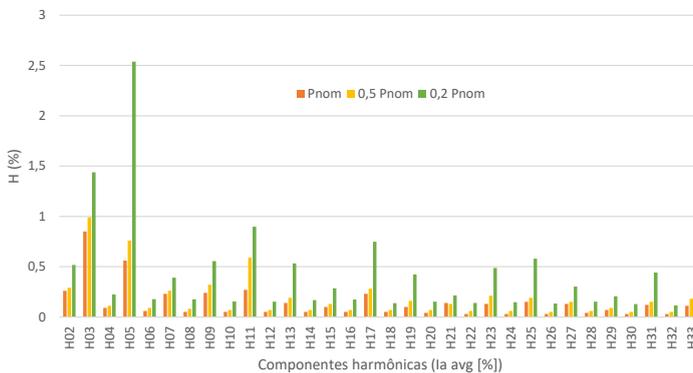


Figura 3 – Componentes harmônicas individuais em relação a potência relativa para o Sistema FV 1

### 3.1.2 Sistema fotovoltaico 2

O sistema FV 2 é dividido em dois sistemas idênticos e cada um foi analisado separadamente. Os dois subsistemas apresentam os mesmos valores de *FDI* e *FCI* do sistema FV 1. A Figura 4 apresenta a *THD<sub>i</sub>* em função da potência relativa para o dia 10 de novembro de 2022. Como no caso do Sistema FV 1, potências relativas acima de 97,5% também foram consideradas como potência nominal. De acordo com a Figura 4, para potências relativas superiores a 20% da potência nominal os valores de *THD<sub>i</sub>* ficaram abaixo de 4%, dentro dos limites estabelecidos em norma. Com potências relativas acima de 50%, os valores de *THD<sub>i</sub>* ficaram abaixo de 2%, com algumas exceções ultrapassando 2% com potência relativa próxima a nominal, porém ainda dentro dos limites estabelecidos pela norma técnica ABNT NBR 16149: 2013.

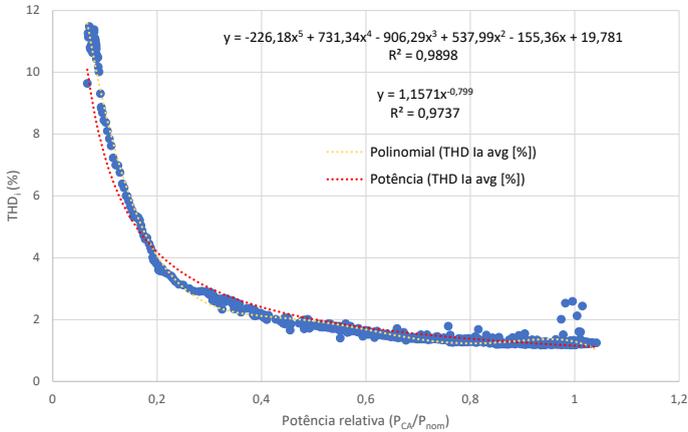


Figura 4 – *THD<sub>i</sub>* em relação a potência relativa para o subsistema A do Sistema FV 2

Assim como foi mostrado na Figura 2, na Figura 4 também foram utilizadas uma linha de tendência polinomial e uma de potência.

Com a Figura 5 é possível analisar as médias das componentes harmônicas para as potências relativas de 100%, 50% e 20%. Com o inversor operando em sua potência nominal, as harmônicas com maior participação na distorção total são as de ordem 3 e 9, com a harmônica 3 apresentando um valor de 0,80%, enquanto que a harmônica 9 apresenta um valor de 0,49%. Outras harmônicas com um valor considerável na distorção harmônica total em potência nominal são as de ordem 2, 9 e 19. Em potência relativa de 50%, a harmônica de ordem 3 aparece novamente com a maior participação, 0,99%, seguida pela de ordem 9, com 0,83%. Em potências relativas de 20%, é possível notar

o mesmo padrão apresentado no Sistema FV 1, com uma predominância da harmônica de ordem 5 na distorção harmônica total.

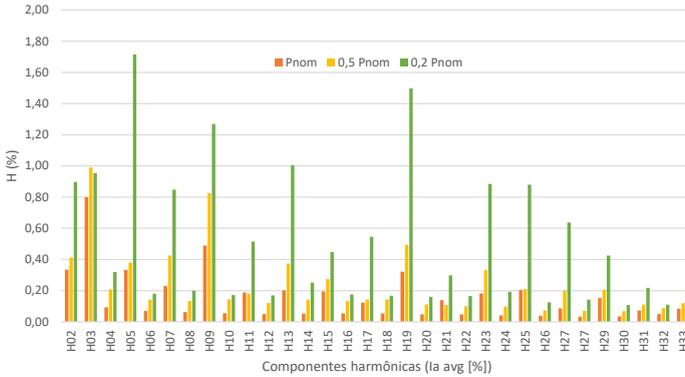


Figura 5 – Componentes harmônicas individuais em relação a potência relativa para o subsistema A do Sistema FV 2

O subsistema B tem exatamente as mesmas especificações que o subsistema A, e está instalado no mesmo local, com as mesmas condições de inclinação e orientação. A Figura 6 apresenta a sua curva  $THD_i$  em função da potência relativa também para o dia 10 de novembro de 2022, conforme realizado na análise anterior. Potências relativas acima de 0,975 foram consideradas como potência nominal. Analisando a figura, para potências relativas superiores a 20% da potência nominal, todos os valores de  $THD_i$  ficaram abaixo de 4%, dentro dos limites estabelecidos em norma. Para potências relativas superiores a 50%, os valores de  $THD_i$  ficam abaixo de 2%.

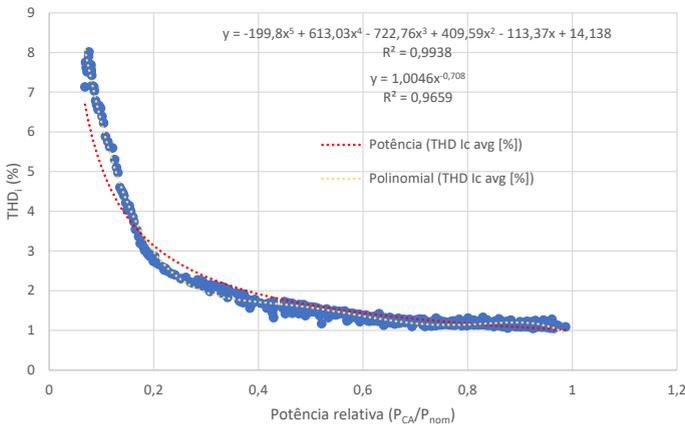


Figura 6 –  $THD_i$  em relação a potência relativa para o subsistema B do Sistema FV 2

Como mostrado na Figura 2, na Figura 6 também foram utilizadas uma linha de tendência polinomial e uma de potência.

A Figura 7 apresenta graficamente as médias das componentes harmônicas para potências relativas de 100%, 50% e 20%. As componentes harmônicas com maior influência na distorção total são as de ordem 3, 7 e 9, com o inversor trabalhando em potência nominal. A harmônica de ordem 3 apresenta um valor de 0,84%, e as de ordem 7 e 9 apresentam um valor de 0,28%. Em potência relativa de 50%, a harmônica de ordem 3 aparece novamente com a maior participação, de 0,95%, seguida pela de ordem 9, com 0,53%. Em baixas potências, de 20%, pode-se notar novamente que a componente harmônica com maior participação na distorção total é a de ordem 5.

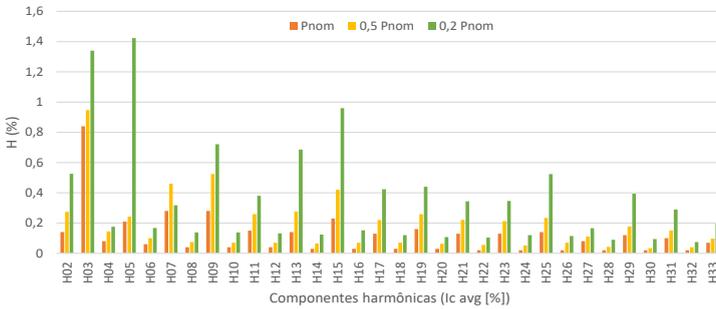


Figura 7 – Componentes harmônicas em relação a potência relativa para o subsistema B do Sistema FV 2

### 3.1.3 Sistema fotovoltaico 3

O sistema FV 3 é dividido em dois subsistemas com diferentes características, denominados subsistema C e subsistema D, sendo cada um analisado separadamente. A Figura 8 apresenta a  $THD_i$  em função da potência relativa para o subsistema C para o período de 20 a 22 de maio de 2023. O subsistema C apresenta um alto FDI (1,51) e um baixo FCI (0,66). O máximo valor de potência registrado foi de 798,6 W, correspondendo a 53,2% da potência nominal. De acordo com o a Figura 8, pode-se perceber que a potência gerada fica na faixa de 20 a 50% da potência nominal do inversor. De acordo com estudos anteriores (BOGILA et al., 2018; RAMPINELLI, KRENZINGER, 2011; SCHENKEL, 2015; LEITE et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2016; CHICCO et al., 2005), inversores operando em baixa potência, acabam gerando maiores distorções harmônicas por dificuldades de encontrar o ponto de máxima potência. O valor de  $R^2$  obtido com a curva de tendência exponencial foi de 0,8054. Com a curva de tendência de potência o va-

lor de  $R^2$  foi bem próximo, sendo este 0,8006. Com o inversor operando na máxima potência obtida, citada anteriormente, o valor de  $THD_i$  apresentado foi de 7,38%. Novamente, é importante frisar que este valor de  $THD_i$  foi registrado com o inversor operando com 53,2% da sua potência nominal, e a norma ABNT NBR 16149:2013 estabelece limites de 5% para  $THD_i$  com inversores operando em potência nominal. Através da curva de tendência exponencial traçada, foi possível extrapolar valores de  $THD_i$  para diferentes potências relativas. Para o sistema operando em 20% da potência nominal, o valor de  $THD_i$  seria de 13,75%. Já para o sistema operando com 100% da sua potência nominal, este valor seria de 2,01%, dentro dos limites estabelecidos em norma.

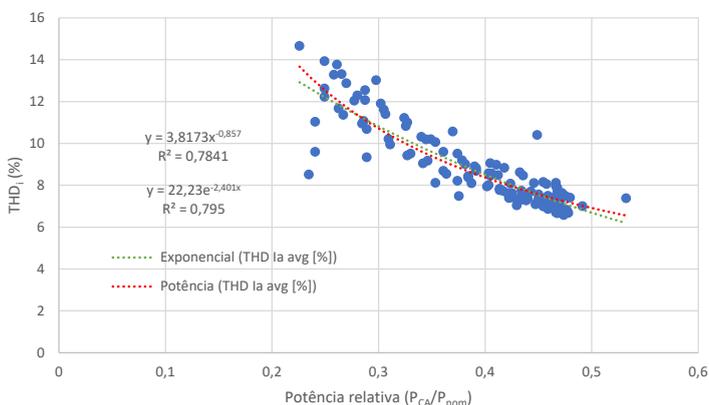


Figura 8 – THDi em relação a potência relativa para o subsistema C do Sistema FV 3

Na Figura 8, a adoção de duas linhas de tendência permite uma análise comparativa, ajudando a identificar qual modelo descreve melhor o comportamento da  $THD_i$  em diferentes faixas de potência relativa.

A Figura 9 apresenta as médias das componentes harmônicas para a máxima potência obtida, e para as potências relativas de 50 e 30%. Com o inversor operando em a máxima potência encontrada (798,6 W), as componentes harmônicas com maior participação na distorção total foram as de ordem 3, 5, 7 e 9, com valores respectivos de 2,15%, 4,32%, 4,93% e 1,52%. Com o inversor operando com 50% da potência nominal, as componentes harmônicas com maior participação na distorção total foram as de ordem 3, 5 e 7, com valores respectivos de 1,99%, 4,12% e 4,65%. Já com o inversor operando com 30% da

sua potência nominal, as componentes harmônicas com maior participação na distorção total foram as de ordem 3, 5, e 7, com valores respectivos de 3,79%, 6,67% e 8,81%. Nas três condições de potência analisadas, a harmônica de grau 3 ainda ficou dentro dos limites estabelecidos, mesmo com o inversor não operando na sua potência nominal.

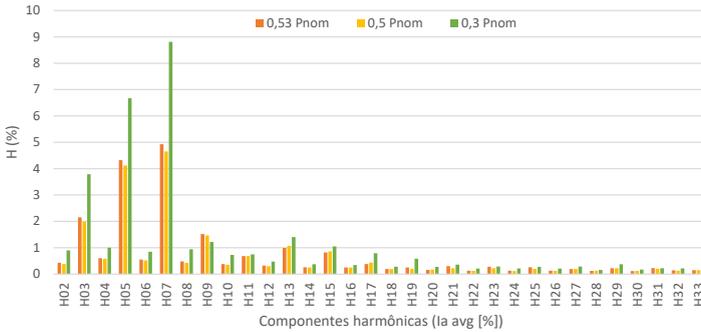


Figura 9 – Componentes harmônicas em relação a potência relativa para o subsistema C do Sistema FV 3

O subsistema D apresenta o maior *FDI* (2,17) e o menor *FCI* (0,46) entre os sistemas analisados. Foram realizadas medidas de *THD<sub>i</sub>* em diferentes períodos do ano, e em todos eles não foi possível encontrar uma tendência entre os valores de distorção harmônica medidos. A Figura 10 mostra os valores de *THD<sub>i</sub>* relativos ao período de 03 de janeiro de 2023 a 06 de janeiro de 2023. Pela Figura 10 é possível perceber que os valores são bem dispersos, mostrando inclusive uma tendência de aumento nos valores de *THD<sub>i</sub>* com o aumento da potência relativa. Segundo Chicco (2009), inversores trabalhando em baixa potência, com a potência gerada sendo aproximadamente 20% da nominal, acabam gerando maiores distorções harmônicas devido ao MPPT do inversor não conseguir encontrar o ponto de máxima eficiência para produzir uma forma de onda de saída senoidal. Também segundo Macêdo (2006), a eficiência e os níveis de distorção harmônica de corrente de um inversor variam com o carregamento, sendo menos adequados quando os mesmos operam abaixo de 50% da potência nominal.

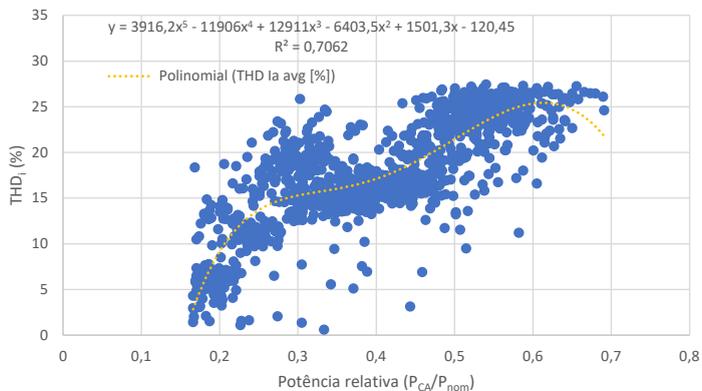


Figura 10 – THDi em relação a potência relativa para o subsistema D do Sistema FV 3 para o período de 03 à 06 de janeiro de 2023

Por fim, a Figura 11 apresenta um gráfico de barras comparando a  $THD_i$  para todos os sistemas em análise em relação a potência nominal, e potências relativas de 50%, 30% e 20%. No caso do Sistema FV 3, a análise foi realizada somente em relação ao subsistema C, visto a falta de padrão encontrada nos valores de  $THD_i$  do subsistema D. Os dados relativos a potência nominal e potência relativa de 20% para o subsistema C foram extrapolados utilizando as curvas de tendência obtidas na Figura 7. Nos sistemas FV 1 e 2, mesmo em baixas potências relativas, os valores de  $THD_i$  não ultrapassaram 4%. Já para o Sistema FV 3, neste caso analisando especificamente o subsistema C, que apresenta um baixo  $FCI$  e alto  $FDI$ , os valores de  $THD_i$  se mostraram mais elevados. Para o valor extrapolado, com o sistema operando em potência nominal, o valor de  $THD_i$  ficou dentro do estabelecido em norma. Em potências relativas mais baixas, os valores de  $THD_i$  acabaram sendo superiores aos limites tolerados. Conforme mencionado anteriormente, isso pode ocorrer devido à dificuldade dos inversores encontrarem o MPPT quando operam em baixa potência, principalmente em potências relativas abaixo de 50% (CHICCO, 2009).

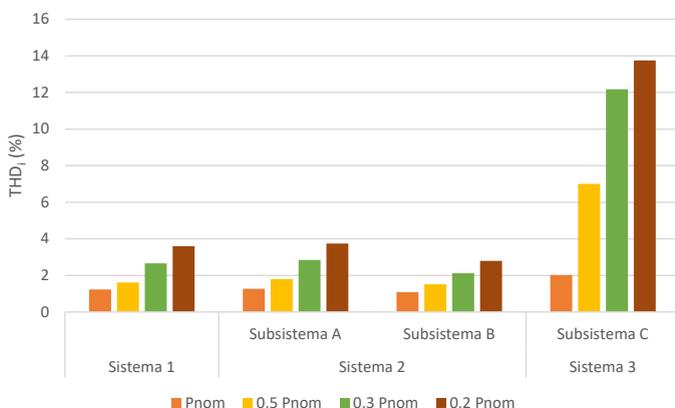


Figura 11 – Comparação entre a THDi dos sistemas analisados (SF 1, SF 2 (A e B) e SF 3 (C))

### 3.2 Análise do desempenho energético

Além das análises já realizadas, cada sistema foi analisado individualmente também em relação ao desempenho energético. A Tabela 5 apresenta os valores mensais de energia gerada, índice de produtividade, geração média diária mensal e fator de capacidade para o Sistema FV 1. A maior geração de energia elétrica ocorre nos meses de verão, no caso, sendo registrados os maiores valores no mês de fevereiro de 2023, no qual os níveis de irradiação são maiores, com uma geração total de 740,90 kWh, e uma média de 26,46 kWh/dia. O mês de menor geração de energia elétrica foi outubro de 2023, um mês chuvoso, e com menores valores de irradiação, registrando uma geração de 449,10 kWh, e uma média de 14,49 kWh/dia. Isso representa uma queda de 39,38% na energia elétrica gerada entre os dois meses. O mês de agosto, apesar de ser um mês de inverno, apresentou um valor superior de geração de energia elétrica, com 637,1 kWh. Considerando todo o período analisado, a geração total de energia elétrica foi de 7199,70 kWh, com uma média de 19,76 kWh/dia. Em relação ao Índice de Produtividade ( $Y_f$ ), o mês que apresentou o maior valor foi o mês de fevereiro de 2023, com um valor de 116,31 kWh/kWp, e o mês com o menor valor foi o mês de outubro de 2023, com um valor de 70,50 kWh/kWp. Considerando todo o período analisado, de fevereiro de 2023 a janeiro de 2024, o índice de produtividade total foi de 1130,25 kWh/kWp. O Fator de Capacidade (FC) médio de todo o período analisado foi de 12,93%.

Tabela 5 – Energia gerada, índice de produtividade, geração mensal média diária e fator de capacidade para o Sistema FV 1

| Mês           | Energia gerada (kWh) | Y <sub>f</sub> (kWh/kWp) | Geração Média Diária Mensal (kWh/dia) | CF (%) |
|---------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------|
| fev/23        | 740,90               | 116,31                   | 26,46                                 | 17,31  |
| mar/23        | 707,70               | 111,10                   | 22,83                                 | 14,93  |
| abr/23        | 627,20               | 98,46                    | 20,91                                 | 13,68  |
| mai/23        | 622,00               | 97,65                    | 20,06                                 | 13,12  |
| jun/23        | 520,40               | 81,70                    | 17,35                                 | 11,35  |
| jul/23        | 535,70               | 84,10                    | 17,28                                 | 11,30  |
| ago/23        | 637,10               | 100,02                   | 20,55                                 | 13,44  |
| set/23        | 457,70               | 71,85                    | 15,26                                 | 9,98   |
| out/23        | 449,10               | 70,50                    | 14,49                                 | 9,48   |
| nov/23        | 565,80               | 88,82                    | 18,86                                 | 12,34  |
| dez/23        | 710,60               | 111,55                   | 22,92                                 | 14,99  |
| jan/24        | 625,50               | 98,19                    | 20,18                                 | 13,20  |
| Total         | 7199,70              | 1130,25                  | -                                     | -      |
| Média         | 599,98               | 94,19                    | 19,76                                 | 12,93  |
| Desvio Padrão | 96,10                | 15,09                    | 3,40                                  | 2,23   |

Como já mencionado, o Sistema FV 2 é composto por dois subsistemas, denominados A e B. Os dados de geração de energia e índice de produtividade foram calculados considerando a totalidade dos dois sistemas. Logo, a Tabela 6 apresenta os valores de energia gerada mensal, índice de produtividade, geração média diária mensal e fator de capacidade para o Sistema FV 2. O mês com maior geração de energia elétrica foi o mês de março de 2023, com uma geração total de 1673,10 kWh e uma média de 53,97 kWh/dia. O mês com menor geração de energia elétrica foi o mês de junho de 2023, com 915,80 kWh gerados, e uma média de 30,53 kWh/dia. Isso representa uma queda de 45,26% na energia elétrica gerada. Os meses de maior produção também foram os meses de verão, e menor produção nos meses de inverno. Como no sistema anterior, vale destacar o mês de agosto, que apesar de estar no período de inverno, registrou também um valor superior de geração de energia elétrica, com 1258,90 kWh. Considerando todo o período analisado, a geração total de energia elétrica foi de 15041,50 kWh, com uma média de 41,21 kWh/dia. Também foi calculado o índice de produtividade para o sistema. O maior índice de produtividade foi no mês de março de 2023, com um valor de 131,33 kWh/kWp. Já o mês de junho apresentou o menor valor, 71,88 kWh/kWp. O índice de produtividade total, considerando todo o período analisado, foi de 1180,65 kWh/kWp. O Fator de Capaci-

dade médio de todo o período analisado foi de 13,48%.

Tabela 6 – Energia gerada, índice de produtividade, geração média diária mensal e fator de capacidade para o Sistema FV 2

| Mês           | Energia gerada (kWh) | Y <sub>r</sub> (kWh/kWp) | Geração Média Diária Mensal (kWh/dia) | CF (%) |
|---------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------|
| fev/23        | 1388,90              | 109,02                   | 49,60                                 | 16,22  |
| mar/23        | 1673,10              | 131,33                   | 53,97                                 | 17,65  |
| abr/23        | 1266,20              | 99,39                    | 42,21                                 | 13,80  |
| mai/23        | 1098,30              | 86,21                    | 35,43                                 | 11,59  |
| jun/23        | 915,80               | 71,88                    | 30,53                                 | 9,98   |
| jul/23        | 963,10               | 75,60                    | 31,07                                 | 10,16  |
| ago/23        | 1258,90              | 98,81                    | 40,61                                 | 13,28  |
| set/23        | 969,30               | 76,08                    | 32,31                                 | 10,57  |
| out/23        | 1198,90              | 94,11                    | 38,67                                 | 12,65  |
| nov/23        | 1201,90              | 94,34                    | 40,06                                 | 13,10  |
| dez/23        | 1601,00              | 125,67                   | 51,65                                 | 16,89  |
| jan/24        | 1506,10              | 118,22                   | 48,58                                 | 15,89  |
| Total         | 15041,50             | 1180,65                  | -                                     |        |
| Média         | 1253,46              | 98,39                    | 41,22                                 | 13,48  |
| Desvio Padrão | 250,10               | 19,63                    | 8,18                                  | 2,67   |

A Tabela 7 apresenta os valores de energia mensal gerada, índice de produtividade, geração mensal média diária e fator de capacidade para o subsistema C. O mês de maior geração de energia elétrica foi março de 2023, com uma geração total de 137,32 kWh, e uma geração média de 4,43 kWh/dia. Já o mês com menor geração de energia elétrica foi o mês de julho de 2023, com uma geração total de 78,34 kWh, e uma média de 2,53 kWh/dia. Isso representa uma queda de 42,96% na energia elétrica gerada entre os dois meses. Considerando todo o período analisado, a geração média foi de 3,33 kWh/dia, com uma geração total de 1213,44 kWh. Para o subsistema C, vale ressaltar que para os meses de fevereiro e março de 2023, e janeiro de 2024, não foi possível obter os valores diários de geração para o mês completo. Para alguns dias, os valores de geração tiveram que ser extrapolados. Para isso, foram utilizados os dados de geração dos dias disponíveis, com dados de radiação global obtidos da plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram traçadas linhas de tendência, e então obtidos os dados de geração para os dias faltantes. Todas as curvas de tendência traçadas apresentaram um valor de R<sup>2</sup> acima de 0,9.

Também foram realizadas análises relativas ao índice de produtividade do subsistema C. O maior índice de produtividade foi no mês

de março de 2023, com um valor de 138,71 kWh/kWp. Já o mês de julho apresentou o menor valor, sendo este de 79,13 kWh/kWp. O índice de produtividade total, considerando todo o período analisado, foi de 1225,69 kWh/kWp. O Fator de Capacidade médio de todo o período analisado foi de 14,02%.

Tabela 7 – Energia gerada, índice de produtividade, geração média diária mensal e fator de capacidade para o subsistema C

| Mês           | Energia gerada (kWh) | Y <sub>f</sub> (kWh/kWp) | Geração Média Diária Mensal (kWh/dia) | CF (%) |
|---------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------|
| fev/23        | 121,45               | 122,68                   | 4,34                                  | 18,26  |
| mar/23        | 137,32               | 138,71                   | 4,43                                  | 18,64  |
| abr/23        | 110,30               | 111,41                   | 3,68                                  | 15,47  |
| mai/23        | 95,90                | 96,87                    | 3,09                                  | 13,02  |
| jun/23        | 84,81                | 85,67                    | 2,83                                  | 11,90  |
| jul/23        | 78,34                | 79,13                    | 2,53                                  | 10,64  |
| ago/23        | 113,70               | 114,85                   | 3,67                                  | 15,44  |
| set/23        | 82,40                | 83,23                    | 2,75                                  | 11,56  |
| out/23        | 80,70                | 81,52                    | 2,60                                  | 10,96  |
| nov/23        | 96,70                | 97,68                    | 3,22                                  | 13,57  |
| dez/23        | 119,00               | 120,20                   | 3,84                                  | 16,16  |
| jan/24        | 92,81                | 93,75                    | 2,99                                  | 12,60  |
| Total         | 1213,44              | 1225,69                  | -                                     | -      |
| Média         | 101,12               | 102,14                   | 3,33                                  | 14,02  |
| Desvio Padrão | 18,96                | 19,15                    | 0,65                                  | 2,74   |

A Tabela 8 apresenta os valores de energia gerada mensal, índice de produtividade, geração média diária mensal e fator de capacidade para o subsistema D, compreendendo os meses de março de 2023, abril de 2023 à agosto de 2023, dezembro de 2023, e janeiro de 2024. Conforme já mencionado, devido à problemas na transmissão dos dados da plataforma do inversor, não foi possível coletar dados de todos os meses do ano. Para o subsistema em questão, também é importante frisar que para os meses de março de 2023, dezembro de 2023 e janeiro de 2024, não foi possível obter os valores diários de geração para o mês completo. Sendo assim, os valores de geração para alguns dias desses meses tiveram que ser extrapolados. Foram utilizados os dados de geração dos dias disponíveis, juntamente com dados de radiação global obtidos da plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo então traçadas linhas de tendência, e obtidos os dados de geração para os dias faltantes. Todas as curvas de tendência traçadas apresentaram um valor de R<sup>2</sup> acima de 0,9.

Tabela 8 – Energia gerada, índice de produtividade, geração média diária mensal e fator de capacidade para o subsistema D

| Mês           | Energia gerada (kWh) | Y <sub>f</sub> (kWh/kWp) | Geração Média Diária Mensal (kWh/dia) | CF (%)   |
|---------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------|
| mar/23        | 119,14               | 129,50                   | 3,84                                  | 17,40632 |
| abr/23        | 96,20                | 104,57                   | 3,21                                  | 14,52    |
| mai/23        | 86,40                | 93,91                    | 2,79                                  | 12,62    |
| jun/23        | 79,50                | 86,41                    | 2,65                                  | 12,00    |
| jul/23        | 71,70                | 77,93                    | 2,31                                  | 10,48    |
| ago/23        | 99,20                | 107,83                   | 3,20                                  | 14,49    |
| dez/23        | 103,50               | 112,50                   | 3,34                                  | 15,12    |
| jan/24        | 93,52                | 101,65                   | 3,02                                  | 13,66    |
| Total         | 749,16               | 814,30                   | -                                     |          |
| Média         | 93,64                | 101,79                   | 3,04                                  | 13,79    |
| Desvio Padrão | 14,73                | 16,01                    | 0,47                                  | 2,12     |

Como mostrado na Tabela 8, dentre os meses analisados, o de maior geração de energia elétrica foi o mês de março de 2023, com uma geração total de 119,14 kWh, e uma média de 3,84 kWh/dia. O mês que apresentou a menor geração de energia elétrica foi o mês de julho de 2023, com um total de 71,70 kWh, e uma média de 2,31 kWh/dia. Considerando todo o período analisado, a geração mensal média diária foi de 3,04 kWh, com uma geração total de energia elétrica 749,16 kWh. Também foram realizadas análises relativas ao índice de produtividade do subsistema D. O maior índice de produtividade registrado ocorreu no mês de março de 2023, com um valor de 129,50 kWh/kWp. O mês de julho apresentou o menor valor, sendo este de 77,93 kWh/kWp. Considerando todo o período analisado, o índice de produtividade total foi de 814,30 kWh/kWp. O Fator de Capacidade médio do período analisado foi de 13,79%.

Os subsistemas C e D, como comentado anteriormente, fazem parte do Sistema 3, estando portanto instalados lado a lado, com as mesmas condições de inclinação e orientação, recebendo a mesma quantidade de radiação. Sendo assim, foi possível realizar um comparativo de performance entre os dois. A Figura 12 apresenta o comparativo graficamente, e a Tabela 9 apresenta os valores do índice de produtividade entre os meses de março a dezembro de 2023 e janeiro de 2024 dos dois subsistemas. Pelos resultados, é possível perceber que o subsistema C teve uma produtividade superior ao subsistema D em seis dos oito meses analisados, sendo inferior somente nos meses de junho de 2023 e janeiro de 2024. No total, o subsistema C foi 3,13% mais eficiente na produção de energia em relação ao subsistema D.

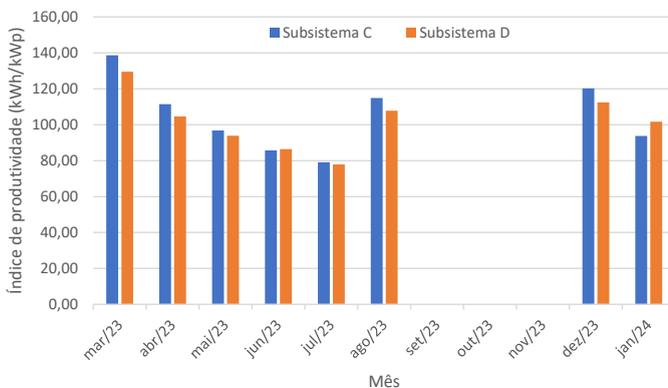


Figura 12 – Comparativo entre o índice de produtividade dos subsistemas C e D do Sistema FV 3

Inversores trabalhando com carregamento parcial, acabam apresentando menor eficiência. Nos dois subsistemas, o *FCI* é baixo. O subsistema C apresenta um *FCI* de 0,66, e o subsistema D apresenta um *FCI* de 0,46. Em casos assim, nos quais não há sombreamento, a diferença na produção de energia depende basicamente na eficiência de conversão do inversor utilizado (ZHENG, 2014).

Tabela 9 – Comparativo entre o índice de produtividade dos subsistemas C e D do Sistema FV 3

| Mês    | Subsistema C | Subsistema D | Diferença Percentual |
|--------|--------------|--------------|----------------------|
|        | Yf (kWh/kWp) | Yf (kWh/kWp) |                      |
| mar/23 | 138,71       | 129,50       | 6,64                 |
| abr/23 | 111,41       | 104,57       | 6,15                 |
| mai/23 | 96,87        | 93,91        | 3,05                 |
| jun/23 | 85,67        | 86,41        | -0,87                |
| jul/23 | 79,13        | 77,93        | 1,51                 |
| ago/23 | 114,85       | 107,83       | 6,11                 |
| dez/23 | 120,20       | 112,50       | 6,41                 |
| jan/24 | 93,75        | 101,65       | -8,42                |
| Total  | 840,59       | 814,30       | 3,13                 |

#### 4. CONCLUSÃO

O presente artigo teve como objetivo analisar dados de distorção harmônica e desempenho energético de três sistemas fotovoltaicos

conectados à rede, em diferentes cidades brasileiras, localizadas na região Sul do país. Os sistemas analisados incluem tanto inversores *string* como microinversores, proporcionando uma comparação entre essas tecnologias.

Os resultados mostraram que os sistemas com inversores *string* (SF 1 e SF 2) mantiveram níveis de distorção harmônica dentro dos limites estabelecidos pela norma técnica ABNT NBR 16149: 2013 em diferentes faixas de potência, com as componentes harmônicas de ordem 3, 5, 7 e 9 apresentando maior participação na distorção harmônica total. Observou-se uma correlação direta entre a irradiação solar e os valores de distorção harmônica, com os sistemas operando de forma eficiente em diversas condições de carregamento.

O subsistema C, que também utiliza um inversor *string*, embora apresentando um alto FDI, conseguiu manter a distorção harmônica dentro dos limites estabelecidos em norma quando operando próximo a sua potência nominal, ao se utilizar a equação da curva de tendência exponencial traçada. A operação em baixas potências pode influenciar negativamente os níveis de distorção harmônica. Em contraste, o subsistema D, com microinversor, mostrou maior variabilidade na distorção harmônica devido à operação frequente em baixas potências relativas, dificultando a otimização do ponto de máxima potência (MPPT).

Em termos de produtividade, os sistemas com inversores *string* mostraram índices de produtividade anuais satisfatórios, com o subsistema C superando o subsistema D em 3,23%, mesmo estando ambos localizados lado a lado. Esses resultados sugerem que, apesar das vantagens dos microinversores em condições de sombreamento, a eficiência de conversão e o carregamento do inversor são fatores críticos para o desempenho energético. A análise do fator de capacidade mostrou que os sistemas com inversor *string* tiveram um desempenho ligeiramente superior em comparação ao subsistema com microinversor, mostrando que os microinversores nem sempre podem ser a melhor opção em todas as condições de operação.

Conclui-se que a topologia do inversor e o dimensionamento adequado são fundamentais para otimizar a qualidade da energia e a produtividade dos sistemas fotovoltaicos. Fatores como a eficiência de conversão do inversor e as condições climáticas locais devem ser cuidadosamente considerados na fase de projeto. Este estudo contribui para uma melhor compreensão das implicações das diferentes tecnologias de inversores em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, fornecendo informações valiosas para futuros projetos e pesquisas na área.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012. Brasil, 2012. Disponível em <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em 25 de abril de 2023.

ANEEL. Resolução Normativa Nº 956, de 07 de dezembro de 2021. Brasil, 2021. Disponível em <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>>. Acesso em 26 de abril de 2023.

ANEEL. Resolução Normativa Nº 1059 de 07 de fevereiro de 2023. Brasil, 2023. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>>. Acesso em 25 de abril de 2023.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. Power System Harmonics 2th Edition. John Wiley & Sons, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. 2024. Disponível em <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em 04 de agosto de 2024.

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

BELISKI, L. M.; SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A. Análise da Qualidade de Energia Elétrica de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída em Unidades Prosumidoras Residenciais. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, p. 10, abr. 2018.

BOGILA, A.; PINTO, J. R.; FRANCHI, T. P. Análise Harmônica Nos Inversores Fotovoltaicos De Uma Microgeração Fotovoltaica. Energia solar e eólica, v. 2, p. 103–119, 2019. Disponível em <<https://anais-cbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/77>>. Acesso em 15 de maio de 2023.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, DF, 7 jan. 2022.

BRAUN, M. et al. Is the distribution grid ready to accept large-scale photovoltaic deployment? State of the art, progress, and future prospects. Prog. Photovoltaics Res. Appl. 2012. Disponível em <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.1204>>. Acesso em 29 de julho de 2024.

CHEPP, E. D.; KRENZINGER, A. Estudo comparativo do uso de inversor string e micro inversores na geração de energia elétrica de uma instalação fotovoltaica com sombreamento parcial. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Associação Brasileira de Energia Solar. Gramado, Brasil. 2018. Disponível em <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/111>>. Acesso em 15 de maio de 2023.

CHICCO, G.; SCHLABBACH, J.; SPERTINO, F. Characterisation and Assessment of the Harmonic Emission of Grid-Connected Photovoltaic Systems. Russia: 2005 IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg 2005. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4524744>>. Acesso em 02 de março de 2024.

CHICCO, G.; SCHLABBACH, J.; SPERTINO, F. Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations. Solar Energy Journal, New York, v. 83, n. 12, p. 1026-1039, fev. 2009. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09000036>>. Acesso em 15 de maio de 2023.

DE HAAN, S., OLDENKAMP, H., WILDENBEEST, E. Test results of a 130 W AC module; a modular solar AC power station. In: Proceedings of the IEEE first world conference on photovoltaic energy conversion, conference record of the twenty fourth, IEEE photovoltaic specialists conference; 1994. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/520113>>. Acesso em 30 de julho de 2024.

DELINÉ, C. et al. Photovoltaic Shading Testbed for Module-Level Power Electronics: 2016 Performance Data Update. United States, 2016. Disponível em <<https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54876.pdf>>. Acesso em 15 de maio de 2023.

DESCHAMPS, E. M. Otimização do fator de carregamento de inversores para sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. 2018. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/205040>>. Acesso em 20 de janeiro de 2024.

DESHPANDE, S.; BHASME, N. R. B. A review of topologies of inverter for grid connected PV systems. Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). Vellore, India. pp. 1-6. 2017. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8245191>>. Acesso em 30 de abril de 2023

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2023: Relatório síntese, ano base 2022. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, EPE. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em 02 de abril de 2024.

FAMOSO, F. et al. Performance Comparison between Micro-inverter and String-inverter Photovoltaic Systems. *Energy Procedia*. Vol. 81. Pp. 526-539. 2015. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215027757>>. Acesso em 24 de abril de 2023.

HARB, S. et al. Microinverter and string inverter grid-connected photovoltaic system — A comprehensive study. 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Tampa, FL, USA. Pp 2885-2890. 2013. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6745072>>. Acesso em 24 de abril de 2023.

IEC 61724, International Electrotechnical Commission. IEC 61724-1: Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring. 2021.

JAIN, S. K., SINGH, S. N. Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges. *Electric Power Systems Research*. 2011. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779611001088>>. Acesso em 29 de julho de 2024.

LEITE, M. C. C., et al. Harmonic Analysis of a Photovoltaic Systems Connected to Low Voltage Grid. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 112-117, Jan. 2018. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8291462>>. Acesso em 06 de fevereiro de 2024.

MACÊDO, W. N. Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2006. 201f. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-29112006-153307/publico/TeseWilson1.pdf>>. Acesso em 24 de julho de 2023.

NASCIMENTO, L. R. A. Avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública. Dissertação (mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/130919>>. Acesso em 20 de janeiro de 2024.

OLIVEIRA, L. G. M. et al. Assessment of Harmonic Distortion in small grid-connected photovoltaic systems. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 810-816. Belo Horizonte, Brazil, 2016. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7783481>>. Acesso em 02 de março de 2024.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CRESESB, 2014. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)> Acesso em 26 de abril de 2023.

RAMPINELLI, G. A. et al. Assessment and mathematical modeling of energy quality parameters of grid connected photovoltaic inverters. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 52, Pages 133-141. 2015. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115007340>>. Acesso em 20 de janeiro de 2024.

RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A. Estudo da qualidade da energia elétrica injetada à rede por inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos. Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 15, n. January 2011, p. 9, 2011. Disponível em <<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/101596>>. Acesso em 15 de maio de 2023.

RAMPINELLI, G. A.; MARCELINO, R.; GRUBER, V. Power quality analysis of PV inverters in agrivoltaics systems applied to smart greenhouses. 2023. Disponível em <<https://www.techrxiv.org/doi/full/10.36227/techrxiv.24135348.v1>>. Acesso em 29 de dezembro de 2023.

RESEARCHANDMARKETS LTD. 2024. Micro inverter global Market Report 2024. Researchandmarkets.com (online). Disponível em: <<https://www.researchandmarkets.com/reports/5744266/micro-inverter-global-market-report>>. Acesso em 31 de julho de 2024.

SCHENKEL, G. Monitoramento e análise de um sistema fotovoltaico conectado à rede com uso de microinversor. 2015. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015. Disponível em <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/4909?show=full>>. Acesso em 23 de maio de 2023.

SUNNY, R; ANTO, R. Control of harmonics and performance analysis of a grid connected photovoltaic system. International Conference on Advanced Computing and Communication Systems. 2013. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6938706>>. Acesso em 04 de agosto de 2024.

URBANETZ, J. Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbana: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. 2010. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94284?show=full>>. Acesso em 11 de maio de 2023.

VINAYAGAM, A. et al. Harmonics assessment and mitigation in a photovoltaic integrated network. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. Vol. 2. 2019. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467719302516>>. Acesso em 24 de julho de 2023.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

ZHENG, H. et al. Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configurations. *Renewable Energy*. Vol. 68. Pp. 58-66. 2014. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148114000548>>. Acesso em 15 de maio de 2023.

## FUNDAMENTOS JURÍDICO-CONSTITUCIONAIS PARA O ENFRENTAMENTO DA POBREZA ENERGÉTICA NO BRASIL

Vitor Silva Alencar<sup>1</sup>  
João Paulo Madruga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade de Coimbra*

<sup>2</sup>*Advogado*

DOI: 10.47168/rbe.v30i2.897

### RESUMO

A pobreza energética afeta duramente a dignidade e o desenvolvimento das pessoas, colocando em risco o meio ambiente e atingindo com consequências mais graves os segmentos populacionais historicamente vulnerabilizados. Por essa razão, o número sete dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) consiste em: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos. No Brasil, a literatura recente tem chamado a atenção para contextos alarmantes de pobreza energética e como seus impactos violam de forma mais contundente mulheres, crianças e adolescentes, em flagrante violação a seus direitos assegurados na legislação. Dessa forma, o presente estudo busca apontar fundamentos jurídico-constitucionais que embasam políticas de enfrentamento da pobreza energética com especial atenção aos mais expostos a suas graves consequências, dando efetividade à Carta Constitucional de 1988 e a compromissos internacionais incorporados ao ordenamento jurídico brasileiro, fornecendo contribuições às perspectivas globais de sustentabilidade.

Palavras-chave: Pobreza energética; Dignidade humana; Constituição; Sustentabilidade.

### ABSTRACT

Energy poverty severely affects people's dignity and development, putting the environment at risk and having the most serious consequences on historically vulnerable population segments. For this reason, number seven of the United Nations Sustainable Development Goals (UN, 2015) consists of: Ensuring access to reliable, sustainable, modern and affordable energy for all. In Brazil, recent literature has drawn attention to alarming contexts of energy poverty and how its impacts most severely violate women, children and adolescents, in flagrant violation of their rights guaranteed by law. Thus, this study seeks

to identify legal and constitutional foundations that support policies to combat energy poverty with special attention to those most exposed to its serious consequences, giving effect to the 1988 Constitution and international commitments incorporated into the Brazilian legal system, providing contributions to global sustainability perspectives.

Keywords: Energy poverty; Human dignity; Constitution; Sustainability.

## **1. INTRODUÇÃO**

O presente artigo se propõe a abordar o tema da pobreza energética com foco na realidade brasileira, a partir de reflexões jurídicas que envolvem a dignidade humana, a efetivação de direitos fundamentais e a sustentabilidade.

Na primeira parte busca-se trazer elementos conceituais relevantes na literatura sobre a pobreza energética, tendo em conta a complexidade que envolve a construção de conceitos e a diversidade de dimensões consideradas para sua medição nas realidades de diversos países. Para tanto, destacam-se contribuições de autores sobre aspectos sociais, econômicos, culturais, ambientais, climáticos, geográficos, arquitetônicos e tecnológicos.

Serão apresentados, no segundo momento, substratos teóricos do constitucionalismo democrático que fundamentam a discussão que se pretende realizar, bem como serão apontados contextos de pobreza energética presentes na realidade brasileira que violam o ordenamento jurídico, em especial a dignidade de mulheres, crianças e adolescentes.

Parte-se da compreensão de que o arcabouço jurídico-constitucional da Constituição Federal de 1988 possibilita exercício interpretativo com opção prioritária pelos segmentos mais vulnerabilizados da população brasileira, exigindo a adoção de posição estatal proativa. Destaca-se, portanto, em seguida, os fundamentos jurídico-constitucionais que embasam políticas de enfrentamento da pobreza energética pelo Estado brasileiro, com especial atenção aos mais expostos a suas graves consequências.

## **2. POBREZA ENERGÉTICA**

O objetivo número sete dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) é: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos. A referida meta de desenvolvimento sustentável tem como horizonte de realização o ano de 2030 e busca enfrentar uma grave realidade global para a integridade e a sobrevivência das pessoas e do meio ambiente: a pobreza energética.

O tema da pobreza energética foi objeto de considerações do principal dirigente das Nações Unidas, no seu discurso de abertura do Diálogo de Alto Nível sobre Energia durante a 76ª sessão da Assembleia Geral, ocorrida em 2021. Na ocasião, o Secretário Geral, o português António Guterres, afirmou que “quase 760 milhões de pessoas ainda não têm acesso à eletricidade. Cerca de 2,6 bilhões de pessoas não têm acesso a meios limpos de cozinhar. E a forma como produzimos e usamos energia é a principal causa da crise climática”.

O discurso proferido no âmbito das Nações Unidas reafirmou a compreensão de que a privação ou restrição do uso de meios modernos de acesso à energia, como a energia elétrica ou o gás liquefeito de petróleo, acaba por produzir a busca por alternativas rudimentares e mais poluentes, que degradam o meio ambiente, a saúde e a qualidade de vida das pessoas (educação, trabalho, acesso meios tecnológicos, dentre outros).

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE, 2000), a pobreza energética pode ser definida como a ausência de escolha suficiente no acesso a serviços energéticos adequados, acessíveis, confiáveis, de alta qualidade, seguros e ambientalmente benignos para apoiar o desenvolvimento econômico e humano.

Ao tratar do tema, o *website* da Comissão Europeia considera que a pobreza energética ocorre quando as faturas de energia representam uma elevada percentagem do rendimento dos consumidores, ou quando estes precisam reduzir o consumo de energia das suas famílias a um nível que tenha um impacto negativo na sua saúde e bem-estar.

Dessa forma, a pobreza energética está associada a consequências que afetam significativamente a dignidade humana e o meio ambiente. Todavia, as peculiaridades dos diversos Estados nacionais condicionam como a pobreza energética se manifesta em cada um deles, a depender principalmente dos níveis de desenvolvimento e pobreza.

Em países com maior nível de desenvolvimento, a pobreza energética está normalmente associada a dificuldades de pagamento dos custos com eletricidade e combustíveis<sup>1</sup>. Já nos países mais pobres, ou com maiores níveis de desigualdade, nos quais as infraestruturas energéticas são mais precárias ou mais mal distribuídas, os segmentos mais desfavorecidos da população são privados de condições mínimas de existência e recorrem a biomassa tradicional<sup>2</sup> ou a outros meios perigosos de cocção (como o álcool).

Assim, são fundamentais os estudos e pesquisas que conside-

1 O termo pobreza energética surge em decorrência do livro “Fuel Poverty” (BOARDMAN, 1991).

2 Para Karekezi et al. (2004), “o uso tradicional de energia de biomassa (...) refere-se à combustão direta (frequentemente em dispositivos muito ineficientes) de madeira, carvão vegetal, folhas, resíduos agrícolas, resíduos animais/humanos e resíduos urbanos, para cozinhar, secar e produzir carvão vegetal”.

rem as realidades locais e as formas como a pobreza energética se manifesta nos países e nas suas diversas regiões e segmentos populacionais, tendo em conta as suas múltiplas dimensões.

Nesse sentido, vale registrar que a medição multidimensional da pobreza vem sendo adotada desde as décadas de 1990 e 2000 em documentos produzidos pelas Nações Unidas e pelo Banco Mundial (ALKIRE e FOSTER, 2011)<sup>1</sup>.

Ao tratar da multidimensionalidade da pobreza no Brasil, Mazzone et al. (2021) consideram que “uma visão multidimensional da pobreza energética associada às capacidades humanas desenvolvidas por Nuss & Sen (1993), oferece um prisma completo para analisar as relações entre pobreza, qualidade de vida e serviços energéticos”. Os autores também ressaltam a importância de incluir o elemento transporte na aferição de uma pobreza energética multidimensional, nos termos ilustrados na Figura 1.

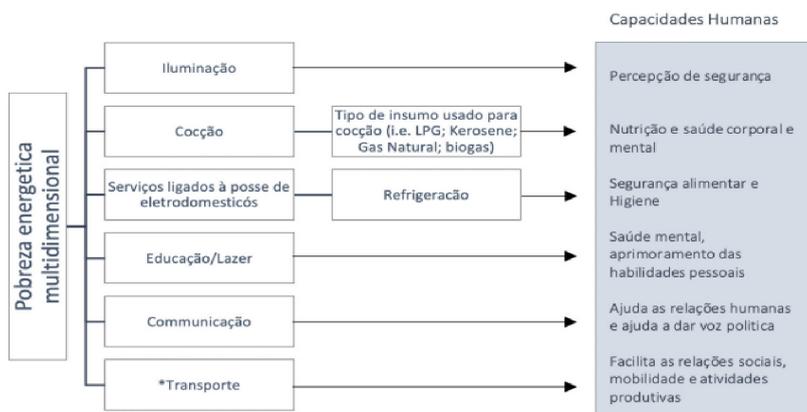


Figura 1 - Diagrama desenvolvido pelos autores com base em Multidimensional Energy Poverty Index – MEPI de Nussbaumer et al. (2011) com a adição de \*Transporte

Buscando contribuir com uma aferição mais detalhada da pobreza multidimensional, Barros et al. (2006) desenvolveram índice para estimar o grau de carência de cada família (e não apenas bairros, municípios ou países), permitindo ainda recortes que tenham em conta grupos populacionais particularmente vulneráveis, como crianças, idosos, negros, famílias chefiadas por mulheres e habitantes de áreas rurais. No modelo desenvolvido pelos autores, o indicador de condições habitacionais contempla o acesso à energia elétrica e a equipamentos

<sup>1</sup> As autoras citam O Relatório de Desenvolvimento Humano, de 1997, o Relatório de Desenvolvimento Mundial, de 2000/1, a Declaração do Milênio e os Objetivos do Desenvolvimento do Milênio.

como fogão, geladeira, televisão, rádio, telefone ou computador.

Ou seja, os parâmetros e metodologias utilizadas para medição da pobreza energética também acabam por condicionar a própria extensão do conceito. Para Villalobos et al. (2019), o bem-estar relacionado ao acesso à energia varia entre e dentro das sociedades e a definição de pobreza energética depende de maneira muito significativa do contexto da avaliação.

Na conceituação de pobreza energética construída por González-Eguino (2015), são essenciais três dimensões complementares: a tecnológica (acesso a serviços modernos de energia), a física (consumo mínimo de energia relacionado às necessidades básicas) e econômica (percentual máximo da renda que seria razoável despendar com gasto energético). Nessa perspectiva, são considerados aspectos de acessibilidade, de um mínimo existencial energético e dos impactos da energia nos orçamentos familiares.

Ao tratar da realidade mexicana, Ochoa e Sierra (2019) advertem que a utilização dos serviços energéticos<sup>1</sup> varia em função do nível socioeconômico das famílias, de viver em zonas urbanas ou rurais e da capacidade de consumo de energia. Para os autores, as condições e modos de vida condicionam a diferentes formas nos usos finais da energia<sup>2</sup>. Por tal motivo, defendem políticas energéticas que tenham em conta esta diferenciação social, adotando uma abordagem transversal de sustentabilidade econômica, social e ambiental, que considere a dimensão tecnológica.

Bouzarovski e Simcock (2017), por sua vez, afirmam que a pobreza energética é um fenômeno profundamente geográfico, que deve ter em conta “desigualdades espaciais que operam em todo o sistema energético e que estão envolvidas na geração e manifestação da privação de energia doméstica”. Assim, os autores sugerem políticas de enfrentamento à pobreza energética focadas em áreas<sup>3</sup>, esforços para superação de injustiças que tornam as famílias incapazes de satisfazer as suas necessidades energéticas, e o aperfeiçoamento das estruturas de detecção e monitoramento da pobreza energética.

Ao propor índice para medição da pobreza energética na Europa, Gouveia et al. (2019) focam no aquecimento e resfriamento de ambientes, combinando indicadores socioeconômicos, variáveis climáticas, níveis de consumo de energia, demanda para aquecimento e resfriamento de ambientes, detalhes das tecnologias de climatização e características de construção de várias tipologias de edifícios

A pobreza energética como uma das manifestações da pobre-

1 Por exemplo, iluminação, entretenimento, aquecimento de água, refrigeração, cozimento de alimentos, preparação de alimentos, limpeza do domicílio (eletrodomésticos), e conforto térmico.

2 Por exemplo, lâmpadas (incandescentes e fluorescentes), televisão, computador, aquecedor de água, estufas, forno, liquidificador, aspirador, ar-condicionado, ventilador, etc.

3 Advertem, todavia, que a atuação local não deve apenas enfrentar injustiças anteriores, mas também abordar as causas subjacentes dessas injustiças

za em sentido mais amplo<sup>1</sup> requer, portanto, o enfrentamento de desigualdades estruturais que submetem as pessoas a contextos de graves vulnerabilidades (ARAÚJO, 2021), tendo em conta complexidades sociais, econômicas, culturais, ambientais, climáticas, geográficas, arquitetônicas e tecnológicas, considerando ainda níveis de demanda por energia, despesas com energia em relação ao rendimento, eficiência dos equipamentos e níveis de conforto térmico.

Sabe-se que o ambiente no qual o núcleo familiar vivencia as consequências mais dramáticas da pobreza energética é a habitação/moradia<sup>2</sup>, que é o local em que as necessidades mais básicas da vida cotidiana se concretizam. O direito ao mínimo de existência condigna pressupõe, portanto, uma habitação/moradia condigna, conforme proclamado pela Declaração Universal dos Direitos Humanos, de 1948<sup>3</sup>, posteriormente desdobrado no Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais, de 1966<sup>4</sup>.

Nesse sentido, as dimensões de uma habitação/moradia adequada fixadas pelas Nações Unidas deve ter, dentre outros aspectos, a infraestrutura necessária para o acesso a energia para cozinhar, para a garantia de aquecimento e para iluminação, bem como os meios necessários de acessibilidade e a priorização de grupos considerados vulneráveis<sup>5</sup>. Isso porque a pobreza energética, a exemplo de outras graves violações de direitos humanos reproduzidas em contextos de desigualdades, impacta de forma mais ampla e com maior frequência e gravidade segmentos sociais historicamente vulnerabilizados, como é o caso de mulheres, crianças e adolescentes<sup>6</sup>.

1 O Índice de Pobreza Multidimensional (PNUD/ONU e Universidade de Oxford) leva em consideração três dimensões: saúde (nutrição e mortalidade infantil), educação (anos de estudo e frequência escolar) e padrões de vida (combustível para cozinhar, saneamento, água potável, eletricidade, condições de habitação, e acesso a eletrodomésticos e meios de locomoção). Estudo realizado por Alkire et al. (2021), com dados de mais de cem países, evidenciou que a pobreza energética é um dos elementos constitutivos de maior peso da pobreza multidimensional.

2 A Constituição da República Portuguesa, de 1976, reconhece o direito social a habitação (art. 65), e a Constituição da República Federativa do Brasil, de 1988, incluiu a moradia como direito social (art. 6º).

3 Artigo 25

1. Todo ser humano tem direito a um padrão de vida capaz de assegurar a si e à sua família saúde, bem-estar, inclusive alimentação, vestuário, habitação, cuidados médicos e os serviços sociais indispensáveis e direito à segurança em caso de desemprego, doença invalidez, viuvez, velhice ou outros casos de perda dos meios de subsistência em circunstâncias fora de seu controle.

4 Artigo 11.

1. Os Estados Partes do presente Pacto reconhecem o direito de toda pessoa a um nível de vida adequado para si próprio e sua família, inclusive à alimentação, vestimenta e moradia adequadas, assim como a uma melhoria contínua de suas condições de vida. Os Estados Partes tomarão medidas apropriadas para assegurar a consecução desse direito, reconhecendo, nesse sentido, a importância essencial da cooperação internacional fundada no livre consentimento.

5 O Comentário Geral nº 4 do Comitê de Direitos Econômicos, Sociais e Culturais fixou sete dimensões da habitação/moradia adequada: Segurança legal da ocupação; Disponibilidade de serviços, materiais, equipamentos e infraestruturas; Acessibilidade; Habitabilidade; Facilidade de acesso; Localização; Respeito pelo meio cultural.

6 Opta-se pelo conceito da legislação brasileira (Estatuto da Criança e do Adolescente): criança é a pessoa até doze anos de idade incompletos, e adolescente aquela entre doze e dezoito anos de idade. Para efeitos da Convenção das Nações Unidas sobre os Direitos da Criança (1989), considera-se como criança todo ser humano com menos de dezoito anos de idade.

Em consonância ao exposto, a página eletrônica do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD apontou que a pobreza energética afeta desproporcionalmente mulheres e meninas, e a publicação sobre a perspectiva de gênero na pobreza energética feita no âmbito do Parlamento Europeu (2023) indicou que, como as mulheres recebem em média salários menores que os homens, estão mais expostas ao risco de pobreza energética quando as condições salariais são baixas.

Crianças e adolescentes em contextos de pobreza energética podem estar submetidas, ainda, às graves consequências do trabalho infantil<sup>1</sup>, especialmente quando realizam a extração e corte de madeira, a produção de carvão vegetal, e a realização de serviços domésticos, que estão incluídas na Lista das Piores Formas de Trabalho Infantil (Lista TIP)<sup>2</sup>, decorrente da Convenção da Organização Internacional do Trabalho – OIT sobre Proibição das Piores Formas de Trabalho Infantil e Ação Imediata para sua Eliminação<sup>3</sup>.

A Organização Mundial de Saúde (OMS, 2016), ao defender energia doméstica limpa com foco na saúde, o desenvolvimento sustentável e o bem-estar de mulheres, crianças e adolescentes, chamou a atenção, também, para danos pouco evidentes provocados pela pobreza energética, mas que trazem altos custos à qualidade de vida: o tempo que lhes é roubado. A busca, coleta e preparação de biomassa tradicional na atividade de cocção ocupa tempo excessivo na vida de mulheres e meninas, privando-as de momentos fundamentais para o seu desenvolvimento e qualidade de vida.

Estamos diante, portanto, de questão de proporções globais que viola os direitos humanos e põe em risco a sobrevivência do planeta. Estão evidenciadas também graves violações a normas jurídicas nacionais e internacionais, como veremos em seguida em relação ao Estado brasileiro.

### **3. A POBREZA ENERGÉTICA VIOLA O ORDENAMENTO JURÍDICO BRASILEIRO, EM ESPECIAL A DIGNIDADE DE MULHERES, CRIANÇAS E ADOLESCENTES**

A dignidade da pessoa humana, reconhecida como elemento primordial na seara internacional<sup>4</sup> e nas cartas constitucionais mundo

---

1 Segundo a OIT, o trabalho infantil é aquele que é perigoso e prejudicial para a saúde e desenvolvimento mental, físico, social ou moral das crianças, e que interfere com a sua escolarização.

2 Decreto nº 6.481, de 12 de junho de 2008.

3 Convenção 182 da OIT.

4 Artigo 1 da Declaração Universal dos Direitos Humanos: “Todos os seres humanos nascem livres e iguais em dignidade e direitos. São dotados de razão e consciência e devem agir em relação uns aos outros com espírito de fraternidade”.

afora<sup>1</sup>, amparou, sobretudo a partir da segunda metade do século XX, a constitucionalização de direitos fundamentais, especialmente de direitos sociais.

A existência formal de direitos fundamentais no texto constitucional levou ao debate a efetividade da Constituição ou a sua força normativa (HESSE, 1991), ou seja, acerca da sua capacidade de conformação da realidade (LOUREIRO, 2021).

Ao mesmo tempo, desenvolveram-se ambientes plurais de interpretação da Constituição que vem amparando múltiplas pretensões sociais pelo reconhecimento e implementação de direitos, o que foi denominado como uma sociedade aberta de intérpretes (HÄBERLE, 1997).

Nesse sentido, Carvalho Netto e Scotti (2011) afirmam que autores de vertentes diversas da Filosofia<sup>2</sup> têm feito reflexões sobre o significado da “herança jurídico-constitucional e a sua centralidade para a preservação e o desenvolvimento de uma sociedade cada vez mais complexa, plural e inclusiva (...)”.

Dessa forma, o Estado constitucional tem como um dos grandes desafios de nosso tempo promover a garantia de direitos fundamentais tendo em conta os limites da capacidade estatal de promover um conjunto de prestações sociais.

As decisões políticas (legislativas e administrativas) dos diversos Estados são produto, portanto, das tensões que envolvem as demandas por direitos e a escassez, notadamente econômico-financeiros, sociais e ambientais (LOUREIRO, 2021). Ou seja, a realização de direitos fundamentais passou a ser conformada pelas perspectivas de sustentabilidade (social, ambiental, econômico-financeira, etc.), que se tornou tema da agenda política do século XXI.

A sustentabilidade passou, inclusive, a ter centralidade nas discussões de natureza constitucional (CANOTILHO, 2010), configurando-se como elemento estrutural típico do Estado que hoje designamos Estado Constitucional (HÄBERLE, 2008).

Logo, contextos limitados de implementação de prestações estatais para a garantia de direitos fundamentais, especialmente os direitos sociais, exigem decisões que tenham em conta as vulnerabilidades de determinados segmentos da população.

A centralidade do princípio constitucional da dignidade da pessoa humana impõe o reconhecimento do direito ao mínimo de existência condigna (ANDRADE, 2004) ou de direitos fundamentais sociais

1 São dois exemplos: a Constituição da República Portuguesa de 1976 (Artigo 1º Portugal é uma República soberana, baseada na dignidade da pessoa humana e na vontade popular e empenhada na construção de uma sociedade livre, justa e solidária) e a Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 (Artigo 1º A República Federativa do Brasil, formada pela união indissolúvel dos Estados e Municípios e do Distrito Federal, constitui-se em Estado Democrático de Direito e tem como fundamentos: III - a dignidade da pessoa humana).

2 Os autores citam como exemplos Jacques Derrida, Jürgen Habermas e Paul Ricoeur.

mínimos (ALEXY, 2009), que para além dos direitos à vida e à sobrevivência reivindicam possibilidades concretas de desenvolvimento.

Um dos objetivos fundamentais da República Federativa do Brasil, segundo a Constituição Federal de 1988, consiste em erradicar a pobreza e a marginalização e reduzir as desigualdades sociais e regionais (artigo 3º, III).

A concretização desse objetivo constitucional passa certamente pelo enfrentamento da pobreza energética, na medida em que o acesso à energia está intimamente ligado à garantia de direitos sociais<sup>1</sup>, da proteção aos direitos de mulheres, crianças e adolescentes, e do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado<sup>2</sup>, que são direitos fundamentais constitucionalmente assegurados.

Embora o Estado brasileiro também vivencie ativamente um processo de transição energética<sup>3</sup>, especialmente por meio da substituição de fontes de energia que produzem gases causadores do efeito estufa (como os derivados de petróleo e o gás natural) por fontes consideradas limpas (hidráulica, eólica, solar, biocombustíveis, etc.), constatou-se recentemente retrocessos que explicitam graves manifestações de pobreza energética, o que vem sendo apontado por autores que se dedicam ao tema.

Conforme apontam Neiva e Lazaro (2023), a utilização de biomassa tradicional na atividade de cocção, como o consumo de lenha, cresceu entre os anos de 2016 e 2019 no Brasil (dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE), em razão do crescimento dos preços do GLP e a diminuição de políticas sociais, produzindo uma reversão na transição energética na atividade de cocção. Os autores alertam, ainda, que “são as mulheres e crianças que sofrem em sua maioria, dentro das cozinhas, seja pela ineficiência dos equipamentos destinados à cocção, seja pelo uso inadequado de combustíveis”.

Ainda com base nos mesmos dados do IBGE, Mazzone et al. (2021) apontam que “um aumento do uso da lenha para cocção poderia afetar o índice de mortalidade da população (com risco acentuado principalmente para as mulheres)”, indicando a urgência de políticas energéticas que considerem as vulnerabilidades associadas a questão de gênero.

No mesmo sentido, Poveda et al. (2021), ao apresentar proposta de metodologia de medição da pobreza energética com foco na realidade brasileira, constata que “o uso de combustíveis sólidos não

1 Art. 6º São direitos sociais a educação, a saúde, a alimentação, o trabalho, a moradia, o transporte, o lazer, a segurança, a previdência social, a proteção à maternidade e à infância, a assistência aos desamparados, na forma desta Constituição.

2 Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

3 Processo gradual de alteração da matriz energética baseada em combustíveis fósseis para fontes ambientalmente sustentáveis.

é o mais recomendável, pois existe evidência dos importantes efeitos diretos na saúde e na desigualdade de gênero (...). Além disso, as mulheres e crianças são os principais responsáveis por catar lenha nas regiões rurais”.

Para ilustrar a amplitude do impacto da pobreza energética na vida dos segmentos mais vulnerabilizados no Brasil, segundo dados divulgados pelo Ministério do Meio Ambiente (2013), “uma mulher precisa dedicar em torno de 18 horas semanais na busca de lenha para o preparo dos alimentos, expostas a algumas situações que trazem riscos de vida por acidentes”, reafirmando a compreensão de que a pobreza energética rouba o tempo e o potencial de desenvolvimento das mulheres.

Ao discorrer sobre graves consequências à integridade e à saúde das pessoas em situação de pobreza energética no Brasil, Ribeiro (2022) destaca que “as pessoas mais expostas às queimaduras decorrentes do uso de álcool para cozinhar em função das altas nos preços são mulheres”. Outra pesquisa, feita em 2022 pelo Instituto Polis sobre consumo e qualidade do fornecimento de energia elétrica em três capitais brasileiras, evidenciou “como o acesso à energia ocorre de forma territorialmente desigual, impactando, desproporcionalmente, pessoas negras, famílias de menor poder aquisitivo e domicílios chefiados por mulheres com renda de até um salário mínimo”.

Dessa forma, além da pobreza energética representar um flagrante desrespeito ao fundamento constitucional da dignidade da pessoa humana e do direito de toda pessoa a um nível de vida adequado para si próprio e sua família previsto no Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais de 1966 (incorporado pelo Estado brasileiro em 1992<sup>1</sup>), estão configuradas, ainda, violações a segmentos historicamente vulnerabilizados, que adquiriram especial estatuto protetivo nas normativas brasileiras, bem como às normativas de proteção ao meio ambiente.

Além do mais, é possível apontar a violação ao elevado dever de proteção (absoluta prioridade) aos direitos de crianças e adolescentes assegurado pela Constituição Federal de 1988<sup>2</sup>, ao dever do Estado brasileiro de promover ao máximo a vida, a sobrevivência e o desenvolvimento<sup>3</sup> previsto na Convenção das Nações Unidas sobre os Direitos da Criança de 1989<sup>4</sup>, do direito às medidas de proteção que

1 Decreto no 591, de 6 de julho de 1992.

2 Art. 227. É dever da família, da sociedade e do Estado assegurar à criança, ao adolescente e ao jovem, com absoluta prioridade, o direito à vida, à saúde, à alimentação, à educação, ao lazer, à profissionalização, à cultura, à dignidade, ao respeito, à liberdade e à convivência familiar e comunitária, além de colocá-los a salvo de toda forma de negligência, discriminação, exploração, violência, crueldade e opressão.

3 Artigo 6

1. Os Estados Partes reconhecem que toda criança tem o direito inerente à vida.

2. Os Estados Partes assegurarão ao máximo a sobrevivência e o desenvolvimento da criança

4 Decreto no 99.710, de 21 de novembro de 1990.

a sua condição requer insculpido na Convenção Americana sobre Direitos Humanos (Pacto de São José da Costa Rica)<sup>1</sup> e ao direito a proteção integral de que dispõe o Estatuto da Criança e do Adolescente (Lei nº 8.069/1990)<sup>2</sup>.

Da mesma forma, estão sendo desrespeitados os direitos fundamentais à isonomia e à igualdade de direitos entre homens e mulheres<sup>3</sup> e o compromisso internacional do Estado brasileiro de assegurar o pleno desenvolvimento e progresso da mulher, com o objetivo de garantir-lhe o exercício e gozo dos direitos humanos e liberdades fundamentais<sup>4</sup>, conforme a Convenção das Nações Unidas sobre a Eliminação de Todas as Formas de Discriminação contra a Mulher de 1979<sup>5</sup>.

No mesmo sentido, desrespeita os compromissos internacionais assumidos pelo Estado brasileiro, especialmente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o Acordo de Paris sobre Mudança do Clima<sup>6</sup>, ambos do ano de 2015, negociados e amplamente aprovados pelos Estados no âmbito das Nações Unidas. Viola também o direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e o dever constitucional do Estado de defender e preservar o meio ambiente para as presentes e futuras gerações.

Constata-se, portanto, que as diversas manifestações de pobreza energética na realidade brasileira produzem violações ao ordenamento jurídico e aos compromissos assumidos pelo Estado perante a comunidade internacional, com maior gravidade pelo desrespeito aos direitos básicos de segmentos especialmente protegidos em razão de sua condição de vulnerabilidade, demandando medidas concretas para sua erradicação.

---

1 Artigo 19 - Direitos da Criança

Toda criança tem direito às medidas de proteção que a sua condição de menor requer por parte da sua família, da sociedade e do Estado.

2 Art. 3º A criança e o adolescente gozam de todos os direitos fundamentais inerentes à pessoa humana, sem prejuízo da proteção integral de que trata esta Lei, assegurando-se-lhes, por lei ou por outros meios, todas as oportunidades e facilidades, a fim de lhes facultar o desenvolvimento físico, mental, moral, espiritual e social, em condições de liberdade e de dignidade.

3 Art. 5º Todos são iguais perante a lei, sem distinção de qualquer natureza, garantindo-se aos brasileiros e aos estrangeiros residentes no País a inviolabilidade do direito à vida, à liberdade, à igualdade, à segurança e à propriedade, nos termos seguintes:

I - homens e mulheres são iguais em direitos e obrigações, nos termos desta Constituição.

4 Artigo 3º

Os Estados Partes tomarão, em todas as esferas e, em particular, nas esferas política, social, econômica e cultural, todas as medidas apropriadas, inclusive de caráter legislativo, para assegurar o pleno desenvolvimento e progresso da mulher, com o objetivo de garantir-lhe o exercício e gozo dos direitos humanos e liberdades fundamentais em igualdade de condições com o homem.

5 Decreto no 89.460 de 20 de março de 1984 e Decreto nº 4.377, de 13 de setembro de 2002.

6 Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017.

#### **4. FUNDAMENTOS JURÍDICO-CONSTITUCIONAIS PARA O ENFRENTAMENTO DA POBREZA ENERGÉTICA COM ESPECIAL ATENÇÃO AOS MAIS EXPOSTOS A SUAS GRAVES CONSEQUÊNCIAS**

Na edição comemorativa do 25º aniversário da Constituição Espanhola de 1978, Enterría (2003) elabora que a Constituição é um instrumento para garantir a liberdade e para estabelecer uma nova ordem jurídica baseada na liberdade. As palavras do autor também poderiam se aplicar à Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, que é parte central do processo de redemocratização do Estado brasileiro e permitiu a ampla incorporação de tratados e convenções internacionais de direitos humanos ao ordenamento jurídico<sup>1</sup>.

Cabe indicar que, no Brasil, já se buscou inserir no artigo 6º da Constituição Federal de 1988 o acesso à “energia elétrica” no rol dos direitos sociais<sup>2</sup>, mas a Proposta de Emenda Constitucional – PEC no 44/2017 restou arquivada ao final da legislatura de 2022<sup>3</sup>.

Ainda que não esteja expressamente no texto constitucional, a partir do arcabouço jurídico-constitucional da Carta de 1988, e tendo em conta as tensões que envolvem a disputa pelo orçamento público e as exigências de preservação do meio ambiente, deve-se buscar realizar exercício interpretativo do texto constitucional com opção prioritária pelos segmentos mais vulnerabilizados da população brasileira, o que implicaria o enfrentamento da pobreza energética com especial atenção aos mais expostos a suas graves consequências.

Nas palavras de Loureiro (2021), inspirado no pensamento de Amartya Sen em A ideia de justiça, “visa-se encontrar soluções para problemas no acesso a bens fundamentais por pessoas que sofrem na carne privações que não rimam com as exigências da dignidade da pessoa humana”. Dessa forma, a garantia de condições dignas de existência a mulheres, crianças e adolescentes em situação de pobreza energética denota opção pelos segmentos mais vulnerabilizados da população brasileira, exigindo a adoção de posição estatal proativa<sup>4</sup>.

Para tanto, deve-se constatar a existência de um verdadeiro direito fundamental implícito de acesso à energia, por meio de uma inter-

1 Para Piovesan (2010), a Constituição Federal de 1988 é o “marco jurídico da transição democrática e da institucionalização dos direitos humanos no País”.

2 A iniciativa legislativa, que focava exclusivamente na energia elétrica, acabava por não contemplar outros meios energéticos disponíveis, como por exemplo o acesso ao gás liquefeito de petróleo, amplamente utilizado no Brasil para cocção de alimentos (cerca de 90% da população). Dessa forma, tendo em vista as peculiaridades da realidade brasileira e as múltiplas possibilidades que envolvem o processo de transição energética em curso, uma eventual outra tentativa de inclusão no texto constitucional de novo direito social deverá assegurar, a nosso ver, o direito de “acesso à energia”.

3 Löfquist (2019) promoveu importantes reflexões sobre a existência ou não de um direito humano universal à eletricidade. Embora considere razoável conceber o acesso à eletricidade como uma espécie de direito, conclui se tratar de um direito derivado de outros direitos humanos, como moradia adequada, assistência médica e educação.

4 Para Mendes (1999), “os direitos fundamentais não contêm apenas uma proibição de intervenção (Eingriffsverbote), expressando também um postulado de proteção (Schutzgebote)”.

pretação sistemática<sup>1</sup> do texto da Constituição Federal de 1988 e do regime e dos princípios por ela adotados<sup>2</sup>. Assim, a interpretação conjugada de diversos elementos do texto constitucional de 1988 (dignidade da pessoa humana, cidadania, erradicação da pobreza e redução das desigualdades, isonomia, igualdade de direitos entre homens e mulheres, prioridade absoluta da criança e do adolescente, meio ambiente ecologicamente equilibrado, etc.), permite o reconhecimento, ainda que implicitamente, de um direito fundamental de acesso à energia como elemento essencial à viabilização de uma existência digna, na medida em que possibilita a cocção de alimentos, propicia a iluminação e o conforto térmico, contribui para a preservação da saúde, assegura infraestrutura para a educação, a comunicação, o lazer e o transporte, possibilitando meios concretos de desenvolvimento.

Portanto, a implementação de políticas públicas direcionadas, de forma deliberada, para mulheres, crianças e adolescentes em situação de pobreza energética guarda coerência com os fundamentos da Carta de 1988. Da mesma forma, está em consonância com as interpretações do texto constitucional que vem sendo feitas pela mais alta instância do Poder Judiciário brasileiro, na medida em que a construção jurisprudencial do Supremo Tribunal Federal<sup>3</sup>, notadamente no século XXI, vem reconhecendo, de forma reiterada, a constitucionalidade de ações afirmativas de gênero, o especial dever de proteção a criança e ao adolescente e, mais recentemente, a inconstitucionalidade da não destinação de recursos públicos voltados à mitigação das mudanças climáticas<sup>4</sup>.

## 5. CONCLUSÕES

A pobreza energética afeta duramente a dignidade e o desenvolvimento das pessoas e põe em risco o meio ambiente, atingindo com consequências mais graves os segmentos historicamente vulnerabilizados. No Brasil, a literatura recente tem chamado a atenção para contextos alarmantes de pobreza energética e como seus impactos violam de forma mais contundente mulheres, crianças e adolescentes, o que viola o ordenamento jurídico interno e os compromissos internacionais assumidos pelo Estado brasileiro.

1 Para Sarmento (2008): "A noção de sistema traduz-se num importantíssimo princípio de hermenêutica constitucional, que é o da unidade da Constituição".

2 Art. 5º

(...)

§ 2º Os direitos e garantias expressos na Constituição não excluem outros decorrentes do regime e dos princípios por ela adotados, ou dos tratados internacionais em que a República Federativa do Brasil seja parte.

3 Segundo o site institucional da Corte, o Supremo Tribunal Federal é o órgão de cúpula do Poder Judiciário, e a ele compete, precipuamente, a guarda da Constituição, conforme definido no artigo 102 da Constituição da República.

4 Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental - ADPF 708/DF.

Para tanto, são fundamentais políticas de enfrentamento à pobreza energética que considerem as dimensões da acessibilidade e da qualidade da energia, tendo em conta aspectos sociais, econômicos, culturais, ambientais, climáticos, geográficos, arquitetônicos e tecnológicos. Estudos acerca de como a pobreza energética incide de forma desigual nas populações mais vulneráveis e tendo em conta as peculiaridades territoriais e seus aspectos culturais podem contribuir para o delineamento de ações estatais concretas.

Compreende-se, portanto, que existe um verdadeiro direito fundamental implícito de acesso à energia no texto da Constituição Federal de 1988, que embasa políticas de enfrentamento da pobreza energética com especial atenção aos mais expostos a suas graves consequências.

A concretização de ações efetivas de enfrentamento da pobreza energética pelo Estado brasileiro, com foco nos segmentos mais vulnerabilizados de sua população, tem o potencial de influenciar, também, as iniciativas e decisões da comunidade internacional em relação à sustentabilidade do planeta<sup>1</sup>.

As expectativas de protagonismo se baseiam no fato de que o Estado brasileiro tem condições concretas para se consolidar como uma verdadeira potência ambiental ao longo do século XXI<sup>2</sup>. Além de possuir a maior floresta tropical do mundo e grandes reservas de água e biodiversidade, ter um papel de liderança na América do Sul, a matriz energética brasileira é mais limpa e renovável em relação à média mundial<sup>3</sup>.

Nesse sentido, o processo em curso de transição energética, para além de substituir fontes de energia que degradam o meio ambiente por meios mais limpos e de buscar aperfeiçoar<sup>4</sup> os meios energéticos existentes, representa uma oportunidade concreta de mudança na relação dos seres humanos com o seu habitat, com potencial de influir decisivamente no exercício de uma vida digna em equilíbrio com os recursos naturais<sup>5</sup>.

Deve-se buscar reforçar, portanto, a ideia de uma “transição

---

1 Para Guattari (2009), “não haverá verdadeira resposta à crise ecológica a não ser em escala planetária e com a condição de que se opere uma autêntica revolução política, social e cultural reorientando os objetivos da produção de bens materiais e imateriais”.

2 Para o Observatório do Clima (2022), “aproveitando suas vantagens comparativas, o Brasil pode se tornar a primeira grande economia do mundo a sequestrar mais gases de efeito estufa do que emite, tornando-se negativo em carbono já em 2045”.

3 De acordo com o Balanço Energético Nacional 2022 (BEN), a matriz elétrica brasileira é composta aproximadamente por 78% de fontes renováveis, contra uma média mundial que beira os 29%, segundo a Agência Internacional de Energia.

4 A “eficiência energética” consiste em reduzir o consumo de energia provendo o mesmo nível de serviço energético ou manter o consumo e aumentar o oferecimento do serviço energético, conforme os Professores André Gimenes e Marco Saidel da Universidade de São Paulo.

5 O Professor Fernando de Lima Caneppele explica que a transição energética precisa contemplar o conceito dos cinco D’s: Descarbonização, Descentralização, Digitalização, Democratização e Decréscimo de Consumo.

energética justa”<sup>1</sup>, que deve levar em consideração o impacto sobre os trabalhadores<sup>2</sup> e as comunidades afetadas (com especial atenção aos segmentos vulnerabilizados, como mulheres, crianças e adolescentes), buscando evitar a reprodução de desigualdades, como reivindicado recentemente no relatório da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (2023).

No espírito do que foi apontado no presente artigo, destaca-se a recente aprovação do novo marco normativo da política de habitação/moradia do governo federal, que traz importantes elementos regulatórios para o enfrentamento da pobreza energética pelo Estado brasileiro com foco nos segmentos mais vulnerabilizados da população e que está em consonância com a ideia de uma transição energética justa. A norma estabelece como requisitos técnicos dos projetos a sustentabilidade social, econômica, ambiental e climática da solução implantada, dando preferência a soluções para acesso a fontes de energias renováveis, equipamentos de maior eficiência energética e materiais de construção de baixo carbono, incluídos aqueles oriundos de reciclagem (artigo 16, II, da Lei nº 14.620, de 13 de julho de 2023). Além do mais, fixa como público prioritário para a destinação de recursos públicos, dentre outros, as famílias que tenham a mulher como responsável pela unidade familiar e aquelas que possuam crianças e adolescentes (artigo 8º).

Trata-se de importante exemplo de mecanismo de enfrentamento da pobreza energética pelo Estado brasileiro com deliberada proteção dos segmentos mais vulnerabilizados da população, dando efetividade à Carta Constitucional de 1988 e a compromissos internacionais incorporados ao seu ordenamento jurídico, contribuindo ainda para as perspectivas globais de sustentabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKIRE, S.; KANAGARATNAM, U.; VOLLMER, F. Interlinkages Between Multidimensional Poverty and Electricity: A study using the global Multidimensional, 2021.

ANDRADE, J. C. V. O Direito ao Mínimo de Existência Condigna como Direito Fundamental a Prestações Estaduais Positivas – Uma Decisão Singular do Tribunal Constitucional. Jurisprudência Constitucional. Coimbra, nº 01, p. 04-29, jan./mar, 2004.

---

1 Para Guzowski et al., (2021), a transição energética justa consiste no “caminho no qual há uma conciliação entre as necessidades materiais dos setores mais pobres e a meta de atingir os objetivos de mitigação das mudanças climáticas”.

2 Ver documento da Organização Internacional do Trabalho de 2015, denominado: Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all.

ARAÚJO, S. Nota Editorial da Rediteia. Revista de Política Social, no 53, 2021. Disponível em: [https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/52289/1/ICS\\_Horta%2CA\\_Schmidt\\_L\\_Pobreza%20Energ%C3%A9tica.pdf](https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/52289/1/ICS_Horta%2CA_Schmidt_L_Pobreza%20Energ%C3%A9tica.pdf). Acesso em: 15 mai. 2023.

BARROS, R. P.; CARVALHO, M. I.; FRANCO, S. Pobreza Multidimensional no Brasil. Texto para Discussão no. 1227. Rio de Janeiro: IPEA, 40 p., 2006.

BOARDMAN, B. Fuel Poverty: From Cold Homes to Affordable Warmth. Belhaven Press, 1991.

BOUZAROVSKI, S.; SIMCOCK, N. Spatializing energy justice. Energy Policy, v.107, pp. 640-648, 2017.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Constituicao/Constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm). Acesso em 15 mai. 2023.

BRASIL. Decreto no 89.460 de 20 de março de 1984. Promulga a convenção sobre a eliminação de todas as formas de discriminação contra a mulher, 1979. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=89460&ano=1984&ato=d4bgXTq1UeBpW-Ta03>. Acesso em 15 mai. 2023.

BRASIL. Decreto no 99.710, de 21 de novembro de 1990. Promulga a Convenção sobre os Direitos da Criança. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1990-1994/d99710.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/d99710.htm). Acesso em 15 mai. 2023.

BRASIL. Decreto no 591, de 6 de julho de 1992. Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1990-1994/d0591.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/d0591.htm). Acesso em 15 mai. 2023.

BRASIL. Decreto nº 4.377, de 13 de setembro de 2002. Promulga a Convenção sobre a Eliminação de Todas as Formas de Discriminação contra a Mulher. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2002/d4377.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4377.htm). Acesso em 15 mai. 2023.

BRASIL. Decreto nº 6.481, de 12 de junho de 2008. Regulamenta os artigos 3º, alínea “d”, e 4º da Convenção 182 da Organização Internacional do Trabalho (OIT) que trata da proibição das piores formas de trabalho infantil e ação imediata para sua eliminação. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2008/decreto/d6481.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6481.htm). Acesso em 15 mai. 2023.

BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, celebrado em Paris, em 12 de dezembro de 2015, e firmado em Nova Iorque, em 22 de abril de 2016. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/decreto/d9073.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9073.htm). Acesso em 15 mai. 2023.

BRASIL, Lei Federal nº 8.069, de 13 de julho de 1990. Dispõe sobre o Estatuto da Criança e do Adolescente e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L8069.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L8069.htm). Acesso em 15 mai. 2023.

BRASIL, Lei Federal nº 14.620, de 13 de julho de 2023. Dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida, altera o Decreto-Lei nº 3.365, de 21 de junho de 1941 (Lei da Desapropriação), a Lei nº 4.591, de 16 de dezembro de 1964, a Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei dos Registros Públicos), a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, a Lei nº 8.036, de 11 de maio de 1990 (Lei do FGTS), a Lei nº 8.677, de 13 de julho de 1993, a Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997, a Lei nº 9.514, de 20 de novembro de 1997, a Lei nº 10.188, de 12 de fevereiro de 2001, a Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002 (Código Civil), a Lei nº 10.931, de 2 de agosto de 2004, a Lei nº 11.977, de 7 de julho de 2009, a Lei nº 12.462, de 4 de agosto de 2011, a Lei nº 13.105, de 16 de março de 2015 (Código de Processo Civil), a Lei nº 13.465, de 11 de julho de 2017, a Lei nº 14.063, de 23 de setembro de 2020, a Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021 (Lei de Licitações e Contratos Administrativos), a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, e a Lei nº 14.382, de 27 de junho de 2022, e revoga dispositivos da Lei nº 14.118, de 12 de janeiro de 2021. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2023/Lei/L14620.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Lei/L14620.htm). Acesso em 15 mai. 2023.

CANOTILHO, J. J. G. O Princípio da sustentabilidade como Princípio estruturante do Direito Constitucional. *Revista de Estudos Politécnicos Polytechnical Studies Review* 2010, Vol. VIII, nº 13. Disponível em: <https://scielo.pt/pdf/tek/n13/n13a02.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2023.

CARVALHO NETTO, M.; SCOTTI, G. Os direitos fundamentais e a (in) certeza do direito: a produtividade das tensões principiológicas e a superação do sistema de regras. Belo Horizonte: Fórum, 2011.

CNJ. “Direitos das mulheres”. 2023. Disponível em: [https://www.stf.jus.br/arquivo/cms/publicacaoPublicacaoTematica/anexo/2\\_Cadernos\\_STF\\_Genero\\_Direito\\_das\\_Mulheres.pdf](https://www.stf.jus.br/arquivo/cms/publicacaoPublicacaoTematica/anexo/2_Cadernos_STF_Genero_Direito_das_Mulheres.pdf). Acesso em: 15 mai. 2023.

ECOM. “Matriz energética mundial e brasileira: potenciais de geração de energia renovável”. 2023. Disponível em: <https://ecomenergia.com.br/blog/matriz-energetica-mundial-e-brasileira-potenciais-de-geracao-de-energia-renovavel/>. Acesso em: 15 mai. 2023.

ENTERRÍA, E. G. *La Constitución Española de 1978 como pacto social y como norma jurídica*. Madrid: 2003.

EU. "Energy poverty: The EU is committed to tackling energy poverty and ensuring that vulnerable consumers have access to essential energy services and products". Disponível em: [https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumer-rights/energy-poverty-eu\\_pt](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumer-rights/energy-poverty-eu_pt). Acesso em: 15 mai. 2023.

GONZÁLEZ-EGUINO, M. Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.47, p. 377-385, 2015.

GOUBEIA, J. P.; Palma, P.; Simões, S. G. Energy poverty vulnerability index: A multidimensional tool to identify hotspots for local action. *Energy Reports* v.5, pp. 187-201, 2019.

GUATTARI, F. *As três ecologias*. Tradução de Maria Cristina F. Bittencourt. 20. ed. Campinas/SP: Papirus, 2009.

GUZOWSKI, C.; MARTIN, M. M.; ZABALOY, M. F. Energy Poverty: conceptualization and its link to exclusion. Brief review for Latin America. *Revista Ambiente & Sociedade*. São Paulo, Vol. 24, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/ZBHWmN3FZCxVXvHQTmbJC-nh/?lang=en>. Acesso em: 15 mai. 2023.

HÄBERLE, P. *Hermenêutica constitucional: a sociedade aberta dos intérpretes da Constituição - contribuição para a interpretação pluralista e "procedimental" da Constituição*. Tradução de Gilmar F. Mendes. Porto Alegre: Sérgio Fabris, 1997.

HÄBERLE, P. *Nachhaltigkeit und Gemeineuropäisches Verfassungsrecht*, in WOLFGANG KAHL (org.), *\_achhaltigkeit als Verbundbegriff*, Tübingen, 2008.

HESSE, K. *A força normativa da Constituição*. Trad. Gilmar Ferreira Mendes. Porto Alegre: Sérgio Antônio Fabris, 1991.

ILO. *Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all*. 2015. Disponível em: [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_emp/---emp\\_ent/documents/publication/wcms\\_432859.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_ent/documents/publication/wcms_432859.pdf). Acesso em: 15 mai. 2023.

INSTITUTO PÓLIS. "Justiça energética nas cidades brasileiras, o que se reivindica?". 2022. Disponível em: <https://polis.org.br/publicacoes/justica-energetica-nas-cidades-brasileiras-o-que-se-reivindica/>. Acesso em: 15 mai. 2023.

KAREKESI, S.; COELHO, S. T.; LATA, K. Traditional Biomass Energy: Improving its Use and Moving to Modern Energy Use. In: International Conference for Renewable Energies, Bonn. Thematic Background Paper, 2004. Disponível em: <https://www.renewables2004.de/pdf/tbp/TBP11-biomass.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2023.

LÖFQUIST, L. Is there a universal human right to electricity? International Journal of Human Rights, 24(6), pp. 711–723, 2020.

MAZZONE, A. et al. A multidimensionalidade da pobreza no brasil: um olhar sobre as políticas públicas e desafios da pobreza energética. Revista Brasileira de Energia, Vol. 27, nº 3, Edição Especial I, 3º Trimestre de 2021. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/644/472>. Acesso em: 15 mai. 2023.

MENDES, G. F. Os Direitos Fundamentais e seus múltiplos significados na ordem constitucional. Revista Jurídica Virtual. Brasília, vol. 2, n. 13, junho, 1999.

MMA. “A eficiência dos fogões ecológicos”. 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/a-eficiencia-dos-fogoes-ecologicos>. Acesso em: 15 mai. 2023.

NEIVA, S. A.; LAZARO, L. L. B. Pobreza energética: os desafios da inclusão social e igualdade de gênero. Nexo Políticas Públicas. Disponível em: <https://pp.nexojournal.com.br/opiniao/2023/Pobreza-energica-C3%A9tica-os-desafios-da-incluso-C3%A3o-social-e-igualdade-de-g-C3%AAnero>. Acesso em 15 mai. 2023.

NUSSBAUMER, P.; BAZILIAN, M.; MODI, V.; YUMKELLA, K. K. Measuring Energy Poverty: Focusing on What Matters. Ophi working paper, 42. 2011. Disponível em: <http://ophi.qeh.ox.ac.uk/> Acesso em 15 mai. 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. “Construindo uma potência ambiental”, 2022. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2022/05/2045%E2%80%9494VF.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2023.

OCHOA, R. G.; SIERRA, A. B. Acceso a los servicios de energía: Una crítica a la Agenda 2030 de México. Región y Sociedad, v.31, e1146, 2019.

ONU “Energia limpa é chave para combater pobreza energética e mudanças climáticas, destaca ONU”. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/145932-energia-limpa-%C3%A9-chave-para-combater-pobreza-energica-e-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas-destaca-onu>. Acesso em: 15 mai. 2023.

ONU. “Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil”. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15 mai. 2023.

PARLAMENTO EUROPEU. “Dia Internacional da Mulher: a perspectiva de género na pobreza energética”. 2023. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/2/story/20230224S-T076403/20230224STO76403\\_pt.pdf](https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/2/story/20230224S-T076403/20230224STO76403_pt.pdf). Acesso em: 15 mai. 2023.

PIOVESAN, Flávia. Direitos humanos e o Direito Constitucional Internacional. 11.ed rev. e atual. São Paulo: Saraiva, 2010.

POVEDA, Y. E. M.; LOSEKANN, L. D.; SILVA, N. R. Medindo a pobreza energética no Brasil: uma proposta fundamentada no Índice de Pobreza Energética Multidimensional (MEPI). In: 49 Encontro Nacional de Economia, on line, 2021. Disponível em: [https://www.anpec.org.br/encontro/2021/submissao/files\\_/i12-c15c6e2ebe361586df6f56d-963fb3f54.pdf](https://www.anpec.org.br/encontro/2021/submissao/files_/i12-c15c6e2ebe361586df6f56d-963fb3f54.pdf). Acesso em: 15 mai. 2023.

RIBEIRO, R. A. Guerra na Ucrânia e pobreza energética no sul geopolítico: o caso do Brasil. Diálogos Soberania e Clima, V1, nº 9, 2022. Disponível em: <https://soberaniaeclima.org.br/wp-content/uploads/2022/12/v1-n9-2022.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2023.

SARMENTO, D. Casamento e União Estável entre Pessoas do mesmo Sexo: Perspectivas Constitucionais” in: “Igualdade, Diferença e Direitos Humanos”, Lumen Juris, 2008.

SENADO FEDERAL. “Proposta de Emenda à Constituição nº 44, de 2017”. 2017. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/131846>. Acesso em: 15 mai. 2023.

SEN, A. A Ideia de Justiça. Tradução: Denise Bottmann e Ricardo Dinelli Mendes. São Paulo: Companhia das Letras, 2011.

SEN, A. Desenvolvimento como liberdade. Tradução: Laura Teixeira Motta. São Paulo: Companhia das Letras, 2010.

STF. “ADPF 708”. 2022. Disponível em: <https://portal.stf.jus.br/processos/detalhe.asp?incidente=5951856>. Acesso em: 15 mai. 2023.

STF. “Direitos da criança e do adolescente”. 2017. Disponível em: <https://www.stf.jus.br/arquivo/cms/publicacaoPublicacaoTematica/aneexo/dca.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2023.

STF. “Institucional”. Disponível em: <https://portal.stf.jus.br/textos/ver-Texto.asp?servico=sobreStfConhecaStfInstitucional>. Acesso em: 15 mai. 2023.

UNDP. “Energy and the challenge of sustainability”. 2000. Disponível em: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/World%20Energy%20Assessment-2000.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2023.

UNDP. “Energy and Gender Equality”. Disponível em: <https://www.undp.org/energy/our-work-areas/energy-and-gender-equality>. Acesso em: 15 mai. 2023.

UN SUSTAINABLE DEVELOPMENT GROUP. “Leave No One Behind”. Disponível em: <https://unsdg.un.org/2030-agenda/universal-values/leave-no-one-behind>. Acesso em: 15 mai. 2023.

USP. “Conceitos em Eficiência Energética”. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2142438>. Acesso em: 15 mai. 2023.

USP. “Série Energia: A transição energética precisa contemplar o conceito dos cinco D’s”. 2022. Disponível em: <https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/serie-energia-a-transicao-energetica-precisa-contemplar-o-conceito-dos-cinco-ds/>. Acesso em: 15 mai. 2023.

VILLALOBOS, C.; CHÁVEZ, C.; URIBE, A. Energy poverty measures and the identification of the energy poor: A comparison between the utilitarian and multidimensional approaches in Chile. Working paper series n. 243. Goettingen, Germany, 30 p., 2019.

WHO. “Burning opportunity: clean household energy for health, sustainable development, and wellbeing of women and children”. 2016. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/204717>. Acesso em: 15 mai. 2023.



## Informações para Autores

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

