

revista brasileira de  
**ENERGIA**



Sociedade Brasileira de  
Planejamento Energético

Volume 29, Nº 2, 2º Trimestre de 2023

**Diagramação**

Kelly Fernanda dos Reis

**Revisão**

Arnaldo Walter e Kelly Fernanda dos Reis

**Revista Brasileira de Energia  
Vol. 29 - nº 2**

Itajubá, 2023 - SBPE

Editor: Arnaldo Walter  
203 p.

1 - Energia - artigos

2 - Publicação científica

ISSN: 2317-6652

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

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

### **Editor Responsável**

Arnaldo Walter

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

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

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

### **Comitê Editorial**

Alexandre Salem Szklo

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Annemarlen Gehrke Castagna

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Edmilson Moutinho dos Santos

Universidade de São Paulo - USP

Helder Queiroz Pinto Junior

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Joaquim Eugênio Abel Seabra

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Kamyla Borges da Cunha

Instituto Clima e Sociedade - iCS

Luiz Augusto Horta Nogueira

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Mônica Cavalcanti Sá de Abreu

Universidade Federal do Ceará - UFC

Sergio Valdir Bajay

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Virgínia Parente

Universidade de São Paulo - USP

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

### **Diretoria da SBPE**

Presidente: Rubem César Rodrigues Souza

Vice-Presidente: Juliana Klas

Diretora de Eventos: Paula Meyer Soares

Diretor de Publicações: Arnaldo Walter

Diretor Administrativo: Edson da Costa Bortoni

### **Conselho Fiscal**

Eduardo Mirko Valenzuela Tundera

Ivo Leandro Dorileo

Jamil Haddad

### **Conselho Consultivo**

Afonso Henriques Moreira Santos

Célio Bermann

Edmilson Moutinho dos Santos

Ivan Marques de Toledo Camargo

Jamil Haddad

José Roberto Moreira

Luiz Pinguelli Rosa

Maurício Tiommo Tolmasquim

Oswaldo Lívio Soliano Pereira

Sergio Valdir Bajay

### **Secretaria Executiva da SBPE**

Kelly Fernanda dos Reis

Endereço: Av. BPS, 1303 – Pinheirinho

Itajubá – MG – CEP:37.500-903

E-mail: [exec@sbpe.org.br](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, a partir de outubro de 2020 foi possível reduzir o tempo para a avaliação dos artigos e tomada de decisões.

Entretanto, por conta das pendências então existentes, para o conjunto de submissões analisadas desde outubro de 2020 o tempo médio de tomada de decisão ainda é longo – 239 dias –, sendo apenas um pouco menor – 230 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 na 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 149 dias, sendo de 171 dias para os artigos aceitos. Para os oito artigos publicados neste número, o tempo médio entre a submissão e a decisão editorial final foi de 206 dias.

O compromisso anteriormente assumido é de alcançar e manter o tempo de tomada de decisão abaixo de 150 dias e, com os resultados deste número, apenas mantivemos o indicador temporal em relação ao que foi apresentado anteriormente. Óbvio, ainda há trabalho a ser feito para que a RBE melhore seus procedimentos.

## Artigos mais acessados e os mais citados

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

Em pouco mais de cinco anos houve mais de 171 mil *downloads* de artigos publicados; o levantamento aqui apresentado foi feito na última semana de junho de 2023. Entre todos os artigos já publicados,

os cinco mais acessados são apresentados na Tabela 1. Por outro lado, entre os artigos publicados a partir de 2020 (inclusive), os cinco mais acessados são apresentados na Tabela 2.

Por outro lado, utilizando a plataforma Google Acadêmico, no fim de março de 2023 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	9.382
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	7.561
Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de Tubarão - SC	Osvaldo L. S. Pereira e Felipe F. Gonçalves	2008	v. 14 n. 01	7.179
<i>Investment analysis for wind energy projects</i>	Wagner Sousa de Oliveira e Antônio Jorge Fernandes	2013	v. 19 n.02	5.821
Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos	Alessandra Magrini	2011	v. 08 n. 01	3.847

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

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de downloads
Emissões de gases de efeito estufa no setor de energia, no Brasil	Arnaldo Walter	2021	v. 27, n. 3	1.220
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	704
Fundamentos do planejamento energético centralizado e do descentralizado	Arthur Mendonça Quinhones Siqueira e Célio Bermann	2020	v. 26 n. 01	639

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	634
RenovaBio, uma análise sobre o programa e sua influência no desenvolvimento do mercado do biometano	Maxiane Cardoso e Hirdan Katarina de Medeiros Costa	2020	v. 26 n. 03	632

Tabela 3 - Artigos com mais citações acadêmicas; levantamento feito pelo Google Acadêmico na última semana de junho de 2023

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	139
Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos	Alessandra Magrini	2001	v. 08 n. 01	109
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	37
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	37
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	32
Mudança institucional e inovação na indústria brasileira de petróleo	André Tosi Furtado	2002	v. 09 n. 01	32
Planejamento energético: Necessidade, objetivo e metodologia	Sérgio Valdir Bajay	1989	v. 01 n. 01	27

Tabela 3 - Artigos com mais citações acadêmicas; levantamento feito pelo Google Acadêmico na última semana de Março de 2023 (cont.)

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Volume e número</b>	<b>Número de citações</b>
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 offshore	Adriana Gomes de Freitas, André Tosi Furtado	2001	v. 08 n. 01	24

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

**Arnaldo Walter**

Editor Responsável – Revista Brasileira de Energia

## EDITORIAL

Este é o segundo número publicado em 2023 pela Revista Brasileira de Energia (RBE). Desde o primeiro fascículo de 2022 (Vol. 28, nº 1) estão sendo apresentadas estatísticas dos tempos de processamento das submissões e 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, bem como os mais acessados entre os artigos publicados após 2020 (inclusive). Também estão sendo apresentados os resultados do levantamento feito quanto aos artigos publicados com mais citações acadêmicas.

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

Stefania Gomes Relva e coautores contribuíram com uma análise do potencial de geração fotovoltaica em três localidades do estado Acre, inclusive definindo anos meteorológicos típicos em cada caso.

O artigo de Andrieza de Aquino Eslobão e Reginaldo Geremias teve foco na produção de biogás a partir de dejetos da pecuária, com análise específica para o estado de Santa Catarina. Foram feitas considerações sobre o ordenamento jurídico existente e sobre o processo de licenciamento ambiental.

Já a contribuição de Hilson H. M. Canal e coautores versou sobre o estudo cinético associado à co-pirólise do lodo da indústria de celulose e papel, bem como da casca de café. O uso combinado de ambos resíduos foi considerado.

Por sua vez, o artigo de Cláudio A. Frate e coautores analisou as visões de múltiplos agentes envolvidos na implantação de sistemas fotovoltaicos em condomínios residenciais verticais, em Brasília. Foi feita pesquisa junto a esses agentes.

Tendo por base informações da literatura científica, Frederico E. Wu e Thadeu N. Conti analisaram as tecnologias de resfriamento de reatores nucleares, refrigerados a água, considerando o estado da arte dos reatores de segunda e quarta gerações.

Carla A. D'Aquino e coautores apresentaram resultados do estudo em que foram desenvolvidos e aplicados indicadores para a avaliação da sustentabilidade, em associação ao serviço elétrico antes e após a implantação de sistemas solares fotovoltaicos, em uma comunidade isolada de Santa Catarina.

Já o artigo de Rafael L. Sacco e Murilo M. Frigo analisou o mercado de veículos leves no Brasil – o passado e o futuro –, também considerando perspectivas de penetração em maior escala de veículos elétricos.

Finalmente, Sabrina Macedo e coautores analisaram o potencial e as perspectivas da produção de hidrogênio verde no Brasil.

Agradeço aos colaboradores, e desejo bom proveito a todos os leitores da RBE.

**Arnaldo Walter**

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

# SUMÁRIO

## **CARACTERIZAÇÃO DO RECURSO SOLAR DE LONGO PRAZO PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA REGIÃO AMAZÔNICA: UMA ANÁLISE DE TRÊS LOCALIDADES NO ESTADO DO ACRE.....11**

Stefania Gomes Relva, Vinicius Oliveira da Silva, Thigo Melo de Lima, Lucas Matheus de Sousa Lima, Rafael Meirelles David

## **BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS DA PECUÁRIA: IMPACTOS AMBIENTAIS E ORDENAMENTO JURÍDICO EM SANTA CATARINA.....38**

Andrieza de Aquino Eslobão, Reginaldo Geremias

## **ESTUDO CINÉTICO DA CO-PIRÓLISE DO LODO DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL E CASCA DE CAFÉ.....62**

Hilson Henrique Massucatti Canal, Cláudia Rodrigues Teles, Taisa Shimosakai de Lira, Thiago Padovani Xavier

## **BARREIRAS PARA ADOÇÃO DE SISTEMAS FV EM CONDOMÍNIOS RESIDENCIAIS: VOZES DE ESPECIALISTAS DO PLANALTO CENTRAL DO BRASIL.....87**

Cláudio Albuquerque Frate, Paulo Cesar Marques de Carvalho, Rafael Amaral Shayani

## **BLECAUTES EM REATORES NUCLEARES REFRIGERADOS A ÁGUA: 2A E 4A GERAÇÕES.....113**

Frederico Emidio Wu, Thadeu das Neves Conti

## **DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES ELÉTRICOS PARA A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE LOCAL.....129**

Carla de Abreu D'Aquino, Fernando Réus da Rosa, Giuliano Arns Rampinelli, Luciano Lopes Pfistcher, Carlyle Bezerra de Menezes

## **THE FUTURE OF LIGHT-DUTY VEHICLES IN BRAZIL: TENDENCIES AND CHALLENGES FOR A GREENER FLEET.....160**

Rafael Luis Sacco, Murilo Miceno Frigo

## **BRAZILIAN HYDROGEN ECONOMY DEVELOPMENT.....181**

Sabrina Macedo, Drielli Peyerl, Donato da Silva Filho

## CARACTERIZAÇÃO DO RECURSO SOLAR DE LONGO PRAZO PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA REGIÃO AMAZÔNICA: UMA ANÁLISE DE TRÊS LOCALIDADES NO ESTADO DO ACRE

Stefania Gomes Relva<sup>1,2</sup>  
Vinicius Oliveira da Silva<sup>2,3</sup>  
Thiago Melo de Lima<sup>2</sup>  
Lucas Matheus de Sousa Lima<sup>4</sup>  
Rafael Meirelles David<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>*Instituto E+ Transição Energética*

<sup>2</sup>*Universidade de São Paulo*

<sup>3</sup>*Instituto de Energia e Meio Ambiente - IEMA*

<sup>4</sup>*eAmazônia – Energia Sustentável e Inovação*

<sup>5</sup>*Eletrobras*

DOI: 10.47168/rbe.v29i2.714

### RESUMO

A energia solar fotovoltaica é uma das soluções para melhoria e barateamento do abastecimento elétrico nos sistemas isolados brasileiros. Mas, para que os projetos fotovoltaicos sejam dimensionados de maneira correta é importante conhecer o perfil da irradiação solar. Este trabalho discute a variabilidade temporal e regional do recurso solar no Estado do Acre, por meio do cálculo do ano típico meteorológico (TMY) para três localidades: nas cidades de Rio Branco (RB), Cruzeiro do Sul (CS) e Brasiléia (BR). Assim, este trabalho preenche uma lacuna na disponibilidade de dados de longo prazo de irradiação para a região Norte, fornecendo dados e discussões sobre as médias diárias mensais e anuais de irradiação e demais variáveis meteorológicas, e sobre a formatação de TMY para geração fotovoltaica. O TMY foi calculado a partir de séries sintéticas das três localidades em um período de 21 anos (1999–2019). A metodologia utilizada foi derivada do Método do *Sandia National Laboratories*, porém, com foco na geração fotovoltaica. As três localidades apresentaram formações diferentes do TMY, contudo a média anual de irradiação global horizontal (IGH) das três localidades foi bastante semelhante: 5,1 kWh/m<sup>2</sup>/dia em Rio Branco e 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia em Cruzeiro do Sul e Brasiléia. A média desses valores é superior à estabelecida no Atlas de Energia Solar do Brasil para a região Norte em 0,37 kWh/m<sup>2</sup>/dia. Com relação a variação do recurso, a maior variação do P50 (valor da mediana de uma distribuição ordenada de dados, ou seja, o valor para o qual metade dos dados estão acima e a outra metade abaixo) de IGH

foi encontrada em janeiro (0,53 kWh/m<sup>2</sup>/dia) e a menor em setembro (0,11 kWh/m<sup>2</sup>/dia), mostrando baixa variabilidade mensal. A irradiação total em plano inclinado não reduziu a variabilidade interanual do recurso na região, dadas as baixas latitudes. Conclui-se que TMY é específico para cada localidade, ainda que as médias mensais do montante diário de irradiação tenham sido semelhantes.

Palavras-chave: Energia solar; Fotovoltaica (FV); Séries de dados; Análise de dados; Amazônia.

## ABSTRACT

Photovoltaic solar energy is one of the solutions for improving and make cheaper electricity supply in isolated Brazilian systems. However, for photovoltaic projects to be dimensioned correctly, it is important to know the profile of solar irradiation. This work discusses the temporal and regional variability of the solar resource in the State of Acre, through the calculation of the typical meteorological year (TMY) for three locations, in the cities of: Rio Branco (RB); Cruzeiro do Sul (CS); and Brasiléia (BR). Thus, this work fills a gap in the availability of long-term irradiation data for the North region, providing data and discussions on monthly and annual daily irradiance averages and other meteorological variables, besides on TMY formatting for photovoltaic generation. The TMY was calculated from synthetic series of the three locations in a period of 21 years (1999 – 2019). The methodology used was derived from the Sandia National Laboratories Method, however, with a focus on photovoltaic generation. The three locations presented different formations of the TMY, however the annual average of horizontal global irradiation (IGH) of the three locations was quite similar: 5.1 kWh/m<sup>2</sup>/day in Rio Branco and 5.0 kWh/m<sup>2</sup>/day in Cruzeiro do Sul and Brasiléia. The average of these values is higher than that established in the Solar Energy Atlas of Brazil for the North region by 0.37 kWh/m<sup>2</sup>/day. Regarding the variation of the resource, the highest variation of the P50 (the median of a sorted distribution of data, which means the value that equally divides the distribution in half) of IGH was found in January (0.53 kWh/m<sup>2</sup>/day) and the lowest in September (0.11 kWh/m<sup>2</sup>/day), showing low monthly variability. The total irradiation on an inclined plane did not reduce the interannual variability of the resource in the region, given the low latitudes. It is concluded that TMY is specific for each location, even though the monthly averages of the daily amount of irradiation were similar.

Keywords: Solar energy; Photovoltaic (PV); Data series; Data analysis; Amazon.

## 1. INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira tem sido foco de grandes investimentos estruturais, o que inclui o desenvolvimento de hidrelétricas (MORETTO et al., 2012; SILVA, 2022). Contudo, isso não tem sido acompanhado por melhorias nos níveis de desenvolvimento da região (CUNHA, SOARES and SILVA, 2018). Se, por um lado, a Amazônia configura um grande exportador de energia para o resto do país, por outro, o fornecimento de eletricidade para a sua população é precário, principalmente nos sistemas isolados (CUNHA, SOARES and SILVA, 2018; MARTINEZ-BOLAÑOS et al., 2021; FERREIRA et al., 2023). Segundo Ferreira e Silva (2021), há 990 mil pessoas sem acesso a serviço público de energia elétrica, das quais 32% residem em terras indígenas, territórios quilombolas homologados, unidades de conservação ou assentamentos rurais.

Hoje, os sistemas isolados representam um consumo inferior a 1% do de energia elétrica no Brasil, abastecendo cerca de 3 milhões de habitantes ( $\approx 1,4\%$  do total da população brasileira), em 258 localidades, por meio de minirredes (EPE, 2021b). A maioria dessas minirredes está implantada nos estados do Amazonas (AM), Pará (PA), Rondônia (RO), Roraima (RR), Acre (AC) e Amapá (AP), que correspondem a cerca de 42% do Território Nacional (DE FREITAS MOSCARDINI JÚNIOR and RÜTHER, 2020).

O problema é que a energia produzida e consumida nesses sistemas representa um considerável impacto nas contas do setor elétrico (COSTA et al., 2022), dado que a geração é subsidiada pela Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) (EPE, 2021b). Cerca de 94% da energia dos sistemas isolados é produzida por usinas termelétricas a diesel (ONS, 2020). O fornecimento do diesel tem custo elevado e tem obstáculos logísticos, geográficos naturais (vegetação e hidrografia) e de uma infraestrutura de transporte precária (DE FREITAS MOSCARDINI JÚNIOR and RÜTHER, 2020; EPE, 2021b). O orçamento previsto da CCC para 2022 era em torno de R\$ 10,3 bilhões de reais (ONS, 2022).

No Estado do Acre existem sete sistemas isolados que atendem uma população de mais de 262.000 pessoas (EPE, 2021b). Alguns desses sistemas apresentam custos de produção de energia ainda mais elevados, principalmente quando comparados à sistemas semelhantes, e isso se deve às dificuldades de acesso às localidades, principalmente em Jordão e Santa Rosa do Purus (EPE, 2014). Assim, já em 2014 a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) vinha discutindo a necessidade de implantar sistemas ao menos híbridos (solar + diesel) na região, a fim de reduzir os custos com combustível e baratear a energia elétrica (EPE, 2014). Mas, para isso, é importante dimensionar corretamente esses sistemas híbridos, e isso depende da avaliação

precisa do recurso solar disponível (DE FREITAS MOSCARDINI JÚNIOR and RÜTHER, 2020).

A região Norte possui elevados índices de radiação solar, apesar de serem atenuados pelo alto índice pluviométrico decorrente da evapotranspiração da floresta tropical (MOSCARDINI JÚNIOR, 2020). O recurso solar disponível na região carece de investigações (LUIZ et al., 2018). Poucos estudos foram encontrados na bibliografia recente sobre essa temática. Haag e Krenzinger (2010), por exemplo, utilizaram dados fornecidos por satélites e radiossondas para estimar características espectrais típicas da irradiância solar na região amazônica. Neves et al., (2021) avaliaram a irradiação solar na região de Castanhal no Pará, utilizando 10 anos de dados horários de radiação. Moscardini Júnior e Rütther (2020) investigaram influência do banco de dados de radiação solar e do simulador fotovoltaico (FV) no dimensionamento e economia de geradores FV-diesel em diferentes regiões do Brasil, incluindo a região Norte.

Mais especificamente sobre o Estado do Acre, Sousa (2020b) avaliou a variabilidade meteorológica do município Cruzeiro do Sul, utilizando 21 anos de série histórica. Com relação ao recurso solar, o autor utilizou dados de insolação (número de horas que o Sol se encontra descoberto) disponíveis nas bases de dados do INMET. O mesmo autor também avaliou, em Sousa (2020a), as características climáticas do município de Rio Branco, utilizando 30 anos de série histórica, também utilizando dados de insolação para o recurso solar. No entanto, não foram avaliados dados de irradiação, que está associada à energia emitida pelo Sol (ARRUDA et al., 2012). Por fim, Nascimento et al., (2021) analisaram os parâmetros para geração de energia solar FV no Estado do Acre e, para isso, os autores utilizaram um ano de série histórica de radiação (2017) para duas localidades do Estado. Esses são os dados disponibilizados pelo CRESCEB.

Verifica-se, portanto, que o acesso a longas séries históricas de radiação para a região é um desafio. A amplificação do acesso à tecnologia de medição de radiação é recente e, além disso, radiômetros são equipamentos caros e de difícil manutenção, o que dificulta a geração de longas séries históricas de diversas localidades (RELVA, 2017). Assim como na geração hidrelétrica, em que o histórico de vazões é essencial para o projeto e operação da usina, o conhecimento do comportamento temporal e espacial do fluxo de irradiação solar é essencial para o bom aproveitamento de parque solares (MOSCARDINI JÚNIOR, 2020). É por isso que, dentre os diversos dados e documentos pedidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) na Nota Técnica N. EPE-DEE-RE-065/2013-R8 (de instruções para cadastramento de projetos FVs nos Leilões de Energia Elétrica) (EPE, 2021a), está incluso o cálculo do ano típico meteorológico TMY.

A construção do TMY é uma etapa importante para a estimativa de longo prazo da geração solar, pois ele resulta em quantidades médias mensais do recurso, admitindo diversos anos de série histórica, o que reduz a influência das variações interanuais nos valores estimados. De maneira geral, o objetivo da construção do TMY é encontrar, dentre todos os meses de uma longa série histórica, aqueles que melhor representam a condição climática do local.

Neste sentido, o objetivo desse artigo é apresentar os anos típicos meteorológicos para três localidades do Estado do Acre: Rio Branco, Cruzeiro do Sul e Brasiléia, calculados a partir de 21 anos de série sintética de irradiação da região. E, a partir disso, discutir a variabilidade temporal e regional do recurso solar no Estado. Desse modo, este estudo preenche uma lacuna que existe hoje no Brasil sobre a disponibilidade de dados de longo prazo de irradiação para a região Norte e, mais especificamente, para o Acre, fornecendo dados e discussões não apenas sobre a formatação de TMY para geração FV, como também apresentando as médias diárias mensais de irradiação e demais variáveis meteorológicas para a região. Assim, busca-se melhorar o conhecimento do recurso solar na região, a fim de facilitar o desenvolvimento FV, e contribuir com a redução do custo da energia e sustentabilidade na região. Os resultados deste trabalho são de interesse de profissionais do setor elétrico e de energia solar, bem como de especialistas em clima, meteorologia e energia.

Este trabalho é dividido em cinco seções. A seção 2 contextualiza o projeto no qual este trabalho foi desenvolvido e apresenta a importância e origem metodológica das séries sintéticas de irradiação utilizadas. A seção 3 apresenta a caracterização dos dados e a metodologia de construção dos anos típicos meteorológicos. A seção 4 mostra os resultados e discussões. E, finalmente, a seção 5 apresenta as conclusões.

## **2. DADOS DE IRRADIAÇÃO, SÉRIES SINTÉTICAS E FORMAÇÃO DE ANO TÍPICO METEOROLÓGICO**

O conhecimento do comportamento de longo prazo do recurso solar é essencial para o bom aproveitamento de parque solares. O ciclo solar, cuja duração é em torno de 11 anos, afeta a atividade na superfície do Sol, e conseqüentemente altera a quantidade de radiação que alcança o topo da atmosfera terrestre (GUEYMARD and MYERS, 2008). Além disso, as condições climáticas locais variam de um ano para outro (nível de precipitação, umidade relativa, ventos, nebulosidade, etc). Por isso, a estimativa de geração de energia por uma planta solar deve contar com a análise de longas séries históricas de irradiação, de modo a prever e reduzir o impacto decorrente das variações

anuais do recurso.

Conforme já comentado na introdução deste trabalho, existe uma grande dificuldade em se obter essas longas séries históricas. Uma das principais soluções para esse problema é recorrer às séries sintéticas de dados, que normalmente são formuladas a partir de imagens obtidas por satélites geoestacionários para a estimativa da nebulosidade, em conjunto com modelos que estimam a irradiação em dias de céu claro, com base em outras variáveis climáticas e atmosféricas, para as quais possuímos históricos de medições ou melhores modelos de estimativa. O uso de modelos de satélite para estimar o potencial do recurso solar é muito útil especialmente em países com grandes extensões territoriais, podendo ser empregados no dimensionamento de usinas FVs, especialmente em locais sem estações de medição de radiação solar e histórico de medições de irradiação solar a longo prazo (MOSCARDINI JÚNIOR, 2020).

Contudo, é importante observar que as medições em solo trazem um melhor detalhamento dos dados, principalmente em relação a variabilidade do recurso no curtíssimo prazo, ou seja, aquela causada principalmente pela nebulosidade (RELVA, 2017). Assim, visando o melhor conhecimento do potencial de geração FV nos *campi* da Universidade Federal do Acre (UFAC) e, conseqüentemente no Estado do Acre, foi desenvolvido o Projeto de Eficiência Energética e Uso Racional de Energia Elétrica na UFAC, que é resultado de uma iniciativa da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, através da Chamada de Projetos de EE Prioritário e P&D Estratégico nº 01/2016 (COSTA et al., 2020). Dentre os desenvolvimentos do projeto, foram instaladas três estações solarimétricas em três diferentes localidades do Acre (municípios de Cruzeiro do Sul, Rio Branco e Brasiléia) (COSTA et al., 2020) e, para cada localidade de implantação das estações solarimétricas foi adquirida uma série sintética de dados de irradiação de longo prazo. Deste modo, é possível desenvolver o conhecimento científico tanto em relação ao comportamento do recurso no longo prazo, quanto em relação as variações de curto e curtíssimo prazo.

Assim, este trabalho é parte dos resultados desse projeto, e trata especificamente da construção de anos típicos das três localidades a partir da série sintética de dados. As séries sintéticas foram adquiridas do banco de dados da Solargis®. A Solargis® foi selecionada pelo Banco Mundial para fornecer dados de irradiação solar para o Atlas Solar Global (MOSCARDINI JÚNIOR, 2020).

## 2.1 Séries sintéticas da Solargis

A Solargis® utiliza um modelo semiempírico para a produção das séries sintéticas. Os modelos semiempíricos são aqueles que utili-

zam um modelo de transferência radiativa em conjunto com a validação dos valores obtidos com medições em solo.

Especificamente no modelo utilizado pela Solargis®, dados de satélites são usados para identificação do grau de nebulosidade e das propriedades das formações de nuvens. A maioria dos processos físicos de atenuação atmosférica da radiação solar também é considerada e alguns parâmetros físicos de entrada também são usados. A estimativa da radiação solar no modelo da Solargis® é basicamente dividida em três etapas (SOLARGIS, 2020). A Figura 1, adaptada de (SOLARGIS, 2020), mostra o esquema do modelo utilizado.

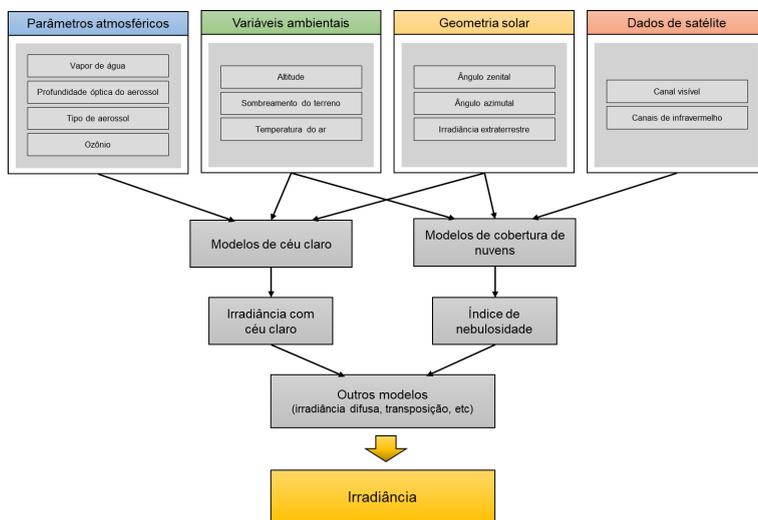


Figura 1 - Esquema do modelo de construção de série sintética de irradiação pela Solargis

Na primeira etapa a irradiância de céu claro - aquela que atinge o solo com suposição de ausência de nuvens - é calculada utilizando um modelo de céu claro. O modelo de céu claro considera as condições de transmitância atmosférica estimadas por meio: (i) da concentração de vapor d'água; (ii) da profundidade óptica de aerossol, que constitui um parâmetro adimensional utilizado para avaliar o quanto o feixe de radiação é atenuado pelos aerossóis à medida que o feixe se propaga em uma determinada camada da atmosfera (PRADO and DA COSTA COELHO, 2017); (iii) do tipo de aerossol distribuído na atmosfera, como neblina, poeira, poluentes particulados do ar, fumaça, dentre outros; e (iv) da concentração de ozônio. Além desses parâmetros também são considerados variáveis ambientais, principalmente a

altitude, já que esta influencia no percurso percorrido pela irradiação para alcançar o solo. Por fim, também são considerados os parâmetros da geometria solar para cálculo da irradiação extraterrestre, que é um dos principais dados de entrada de modelos de céu claro.

Na segunda etapa os dados de satélite - informações de vários satélites geoestacionários - são usados para quantificar o efeito de atenuação das nuvens por meio do cálculo do índice de nebulosidade. A irradiância do céu claro é combinada com o índice de nebulosidade para estimar a irradiância total. No modelo de nebulosidade são utilizados principalmente os dados obtidos via satélite de canais visíveis e de infravermelho. Os canais de infravermelho medem a energia de onda longa emitida pela Terra. Essas medições são obtidas no período noturno. Já os canais visíveis são aqueles que medem a energia solar refletida pelas nuvens (NOAA, 2020). Os resultados do procedimento são os valores de irradiância direta normal e global horizontal.

Na terceira etapa a irradiância direta normal e global horizontal são usadas para calcular a irradiância difusa e a irradiância total em plano inclinado.

## 2.2 Construção do ano típico meteorológico

As metodologias para cálculo de TMY são diversas. Uma análise comparativa entre as principais delas, inclusive as utilizadas pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) dos EUA, pode ser encontrada em (CEBECAUER and SURI, 2015). Um dos métodos mais utilizados foi desenvolvido em 1978, conhecido como Método de *Sandia National Laboratories* (LUIZ and SCHUCH, 2012). Diversas outras metodologias foram derivadas deste método (CEBECAUER and SURI, 2015; ALMEIDA and VASCONCELLOS, 2019).

O método Sandia envolve a escolha de um mês característico para a composição de um ano climatológico típico. Esses 12 meses devem ser selecionados a partir de 30 anos de dados coletados de forma consecutiva. Isto é feito comparando a Função de Distribuição Acumulada (FDA) de quatro variáveis meteorológicas para o mês de cada ano com a FDA do mesmo mês em todo o período de coleta dos dados. As variáveis meteorológicas utilizadas são a temperatura de bulbo seco, a temperatura de ponto de orvalho, a radiação global total diária e a velocidade do vento (LUIZ and SCHUCH, 2012).

A metodologia utilizada neste trabalho se baseia no método Sandia e utiliza premissas de ponderação da metodologia de construção de TMY desenvolvida pela Solargis® (CEBECAUER and SURI, 2015). Portanto, o objetivo do método é encontrar, dentre todos os meses da série histórica, aqueles que melhor representam a condição de deiação do local para fim específico de geração solar FV.

### 3. DADOS DE IRRADIAÇÃO, SÉRIES SINTÉTICAS E FORMAÇÃO DE ANO TÍPICO METEOROLÓGICO

#### 3.1 Caracterização dos dados

Foram adquiridas três séries sintéticas, uma para cada localidade conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de georreferenciamento das localidades das séries sintéticas

	Brasília	Cruzeiro do Sul	Rio Branco
Latitude	-10,961262°	-7,558402°	-9,954298°
Longitude	-68.813346°	-72,717034°	-67.866816°
Fuso Horário (UTC)	-5	-5	-5

A Figura 2 apresenta as três localizações e a distância entre elas.

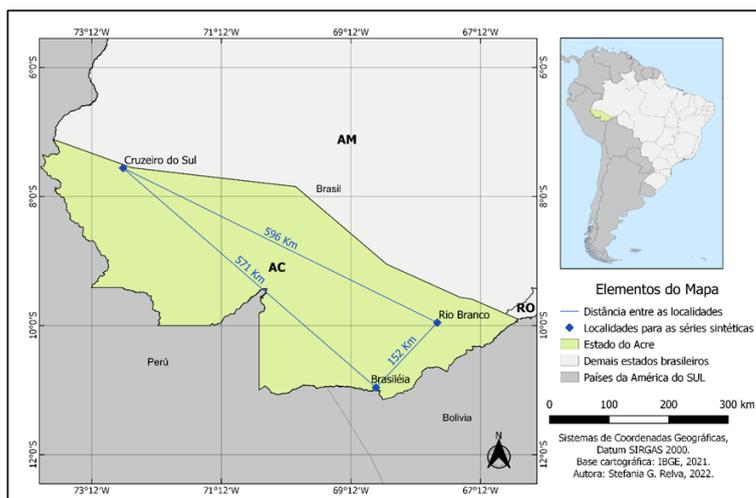


Figura 2 - Localização e distância entre as estações

As três séries sintéticas apresentam os mesmos formatos, dados e períodos, conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização das séries sintéticas

Parâmetros		Caracterização
Variáveis Radiométricas		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irradiação Global Horizontal (IGH) [W/m<sup>2</sup>]</li> <li>• Irradiação Difusa Horizontal (IDH) [W/m<sup>2</sup>]</li> <li>• Irradiação Direta Normal (IDN) [W/m<sup>2</sup>]</li> <li>• Irradiação em plano inclinado (ITI) [W/m<sup>2</sup>]</li> </ul>
Variáveis meteorológicas		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura do ar [°C]</li> <li>• Pressão atmosférica [hPa]</li> <li>• Umidade relativa [%]</li> <li>• Velocidade do vento à 10 m altura [m/s]</li> <li>• Direção do vento à 10 m de altura [°]</li> <li>• Água precipitável [kg/m<sup>2</sup>]</li> </ul>
Período		01/01/1999 – 31/03/2020
Integração		10 min
Resolução espacial	Dados de irradiação	250 m
	Dados de temperatura	1 km
	Demais dados meteorológicos	De 33 a 55 km
Inclinação de ITI		10°
Azimute de ITI		0°

### 3.2 Cálculo do ano típico meteorológico

Inicialmente foram calculados os valores diários de cada variável. O período de dados utilizados foi de 1999 a 2019 e as variáveis utilizadas para o cálculo do TMY foram: temperatura do ar a 2 m; irradiação global horizontal (IGH); e irradiação direta normal (IDN). O valor diário dos dados de IGH e IDN e as médias diárias de temperatura foram calculadas para todos os dias da série histórica utilizando os dados de 10 em 10 minutos.

Na sequência foi realizado o cálculo das funções de distribuição acumulada (FDA) de longo prazo das médias diárias. A FDA de longo prazo é calculada com todos os valores das médias diárias de um mesmo mês, utilizando todos os anos da série histórica. Por exemplo, considerando o mês de janeiro, que possui 31 dias, e considerando a série histórica de 1999 a 2019, a FDA de longo prazo deste mês possuirá 651 valores (21 anos \* 31 dias). O primeiro passo para o cál-

culo da FDA é organizar esses 651 valores das médias diárias de cada variável em ordem crescente. O FDA é calculado conforme a Equação 1.

$$FDA_j = \frac{(j-0,5)}{N}, \text{ com } j = 1, 2, 3 \dots N. \quad (1)$$

Onde FDA é o valor da função acumulada, N é o número total de elementos e j é o índice do elemento dentro do conjunto de elementos ordenados.

Retomando o exemplo acima, que considera os 651 valores de médias diárias para janeiro, e agora assumindo os dados de temperatura do ar, após ordenar os 651 valores de médias diárias de temperatura do ar, do menor para o maior, a posição ocupada pela média diária do dia mais frio do período será a primeira (1) e a posição ocupada pela média diária do dia mais quente será a última (651).

Deste modo, a etapa de cálculo de FDA de longo prazo produz um conjunto de dados para cada mês, contendo os valores de FDA. Cada valor de FDA possuirá um valor respectivo de temperatura ambiente, IGH e IDN. A Figura 3 apresenta as cinco primeiras e últimas linhas da planilha de FDA de longo prazo para o mês de janeiro da série sintética de Rio Branco.

	FDA	Global	Direct	Temperature
1	0.0007680492	8122	172	22.99653
2	0.0023041475	8204	232	23.17708
3	0.0038402458	8344	271	23.53194
4	0.0053763441	8393	280	23.57222
5	0.0069124424	8729	373	23.67083
647	0.9930876	44669	47184	28.30278
648	0.9946237	45403	50056	28.43264
649	0.9961598	45852	50394	28.85347
650	0.9976959	46082	50813	28.88750
651	0.9992320	46539	51783	29.03681

Figura 3 - FDA de longo prazo de janeiro para o período de 1999 a 2019

O próximo passo foi o cálculo das FDA de curto prazo das médias diárias. O cálculo das FDAs de curto prazo é bastante semelhante ao cálculo das FDAs de longo prazo; a diferença é que as FDAs de curto prazo são calculadas para cada mês de cada ano, e não para cada mês com todos os anos. Ou seja, enquanto o resultado do cálculo da FDA de longo prazo para o mês de janeiro, por exemplo, é uma única tabela com 651 valores de FDA, a FDA de curto prazo resulta em 21 tabelas (uma para cada janeiro de cada ano) com 31 valores de FDA em cada uma.

Finalizada a construção das FDAs de longo prazo e de curto prazo, o passo seguinte é o cálculo das diferenças absolutas das duas FDAs de cada mês para cada variável, por meio do método estatístico de Finkelsteir-Schafer (FS), conforme a Equação 2.

$$FS_x(y, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |FDA_m(x_i) - FDA_{y,m}(x_i)| \quad (2)$$

Onde:  $FDA_m(x_i)$  é a função de distribuição acumulada de longo prazo (considerando todos os anos) do mês  $m$  e da variável  $x$ ;  $FDA_{y,m}(x_i)$  é a função de distribuição acumulada de curto prazo do mês  $m$ , do ano  $y$  da mesma variável  $x$ ; e  $N$  é o número de pontos da  $FDA_{y,m}$ .

De maneira simplificada, para o cálculo da estatística de FS os valores das médias diárias das tabelas de FDA de curto prazo devem ser encontrados na planilha de FDA de longo prazo, e deve ser calculada a diferença entre os seus respectivos valores de FDA (ALMEIDA and VASCONCELLOS, 2019).

Esse cálculo deve ser realizado para todos os valores de cada variável. A média desses valores gerará o FS daquela variável para aquele mês daquele ano ( $FS_x(y, m)$ ). O mesmo cálculo deve ser produzido para todas as variáveis consideradas na construção do ano típico – nesse caso, temperatura, IGH e IDN.

Portanto, a etapa de cálculo da estatística de FS resulta em três valores médios (um para cada variável) para cada mês de cada ano da série histórica. Os meses que possuírem a menor média ponderada de FS são os selecionados para constituição do TMY. Assim, para cada mês de cada ano é calculada a média ponderada de FS, conforme a Equação 3.

$$WS(y, m) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W_x * FS_x(y, m) \quad (3)$$

Onde:  $WS(y,m)$  é a média ponderada de FS do mês  $m$  do ano  $y$ ;  $M$  é a quantidade de variáveis utilizadas (nesse caso 3);  $W_x$  é o peso de cada variável; e  $FS_x(y,m)$  é o FS da variável  $x$  para aquele mês daquele ano.

Assim, farão parte do TMY os dados de janeiro do ano que apresentar o menor WS, os dados de fevereiro do ano que apresentar o menor WS e assim sucessivamente.

Os pesos de cada uma das três variáveis foram definidos conforme a metodologia de TMY da Solargis® para formatação de ano típico com foco em aproveitamentos FVs (CEBECAUER and SURI, 2015). O peso para a variável de temperatura ( $W_T$ ) é 0,05, para a variável de IGH ( $W_{IGH}$ ) é 0,75 e para a variável de IDN ( $W_{IDN}$ ) é 0,20.

O TMY foi produzido para as três localidades por meio do uso da linguagem de programação R, a partir dos 21 anos de série histórica (1999-2019). Para o mês de fevereiro, os dias 29 dos anos bissextos foram descartados, já que um dia a mais na série histórica muda os intervalos de FDA, o que poderia gerar distorções nos cálculos das estatísticas de FS para esse mês. A nota técnica da EPE (EPE, 2021a) determina que o ano meteorológico típico deve ser construído a partir de uma série sintética calibrada com dados medidos em solo por um período mínimo de um ano. Neste trabalho a série sintética não foi calibrada com dados medidos em solo. A calibração com dados medidos em solo garante uma maior aderência da série sintética às condições climáticas específicas do local. Contudo, é importante observar que, ainda que essa calibração não tenha sido realizada, o modelo utilizado pela Solargis foi calibrado com dados medidos em solo, mas de outras regiões.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Comparações entre as três localidades

A Tabela 3 mostra os valores médios mensais para Brasília (BR), Cruzeiro do Sul (CS) e Rio Branco (RB) fornecidos no trabalho de entrega das séries sintéticas pela Solargis®, considerando os 21 anos de série histórica.

Tabela 3 – Valores médios anuais de longo prazo das séries sintéticas

Variáveis	RB	CS	BR
IGH [kWh/m <sup>2</sup> ]	1.846,0	1.801,0	1.851,0
IDN [kWh/m <sup>2</sup> ]	1.404,0	1.292,0	1.448,0
IDN [kWh/m <sup>2</sup> ]	873,0	901,0	858,0
ITI [kWh/m <sup>2</sup> ]	1.885,0	1.828,0	1.895,0
Temperatura do ar (2 m) [°C]	25,8	25,7	25,3

A variação do parâmetro entre as três localidades, em termos médios anuais, é pouco significativa. O valor médio para as três localidades de IGH é de 1.832,67 kWh/m<sup>2</sup>, com desvio padrão de apenas 22,48 kWh/m<sup>2</sup>. Com relação à temperatura, o desvio padrão é de 0,2°C. Essa análise inicial mostra que, para estimativa média anual de longo prazo os valores de uma localidade podem ser utilizados para extrapolação dos valores das demais localidades.

Com relação à metodologia de formação de TMY, a metodologia mais comum (Método Sandia) utiliza como variáveis de análise a temperatura de bulbo seco, a temperatura de ponto de orvalho, a IGH total diária e a velocidade do vento. A metodologia considera não só as médias diárias desses valores, mas também os máximos e mínimos diários. Contudo, com o avanço e desenvolvimento das metodologias, hoje há novas metodologias que adaptam as variáveis de entrada conforme o objetivo de formação do TMY (CEBECAUER and SURI, 2015).

Por exemplo, a Solargis® utiliza os dados de IGH, IDN e temperatura do ar (de bulbo seco) para a formação de TMY com foco em aproveitamentos FVs. Em contraposição, se o foco da utilização do ano típico é para usinas termosolares, as variáveis utilizadas pela Solargis® são: temperatura do ar, IDN, IDH e IGH. Por isso, a utilização de metodologias diferentes gerará diferentes formatações de TMY para a mesma localidade. A Tabela 4 mostra os anos que compuseram o TMY das três localidades.

Tabela 4 – Ano típico meteorológico das três localidades

Mês	RB	CS	BR
Janeiro	2009	2013	2010
Fevereiro	2003	2014	2005
Março	2002	2003	2001
Abril	2001	2007	2012
Mai	2003	2000	2016
Junho	2012	2001	2002
Julho	2007	2009	2015
Agosto	2003	2006	2011
Setembro	2011	2002	2016
Outubro	2014	2001	2000
Novembro	2014	2005	2012
Dezembro	1999	2001	2005

Nenhum ano foi utilizado no mesmo mês para localidades diferentes. Portanto, ainda que se tenha afirmado que para estimativa média anual de longo prazo os valores de uma localidade podem ser

utilizados para extrapolação dos valores das demais localidades, a formação do TMY não deve ser extrapolada, já que ele é construído com base na variação mensal e não anual. A Tabela 5 mostra o P25<sup>1</sup>, P50<sup>2</sup> e P75<sup>3</sup> de IGH do TMY das três localidades.

Tabela 5 – IGH do ano típico para as três localidades

Mês	RB			CS			BR		
	P25	P50	P75	P25	P50	P75	P25	P50	P75
Janeiro	4,89	4,95	5,04	4,74	4,88	4,96	5,38	5,41	5,48
Fevereiro	5,11	5,19	5,21	4,93	4,97	5,06	5,25	5,29	5,31
Março	5,08	5,14	5,19	4,89	4,95	4,99	4,88	4,99	5,11
Abril	5,05	5,11	5,26	4,90	5,01	5,07	4,85	4,94	5,11
Mai	5,18	5,22	5,35	5,01	5,05	5,11	4,78	4,87	5,02
Junho	4,95	5,01	5,11	4,63	4,72	4,81	4,71	4,82	4,93
Julho	5,31	5,38	5,46	4,93	5,05	5,14	4,92	5,00	5,05
Agosto	4,86	4,97	5,02	5,21	5,28	5,33	4,94	5,09	5,20
Setembro	4,71	4,94	4,98	4,79	4,83	4,96	4,88	4,94	5,00
Outubro	4,74	4,80	4,93	5,10	5,19	5,23	4,85	4,86	4,90
Novembro	5,08	5,12	5,13	4,74	4,89	5,03	4,59	4,78	4,85
Dezembro	5,17	5,23	5,28	4,96	5,02	5,10	4,89	5,03	5,15

A variação de cada mês das três localidades é bastante reduzida: a maior variação do P50 foi encontrada em janeiro (0,53 kWh/m<sup>2</sup>/dia) e a menor em setembro (0,11 kWh/m<sup>2</sup>/dia). Em termos de médias diárias mensais de longo prazo, a irradiação possui baixíssima variabilidade, tanto interanual quanto em relação às diferentes localidades analisadas.

A Tabela 6 mostra o valor médio anual do total diário de irradiação para as três localidades, calculado pelo TMY da série sintética.

1 P25, ou percentil 25, representa o quartil inferior de uma distribuição ordenada de dados; é a mediana da metade inferior da distribuição (WAGNER, 1998).

2 P50, ou percentil 50, é a mediana ou valor do meio de uma distribuição ordenada de dados (WAGNER, 1998).

3 P75, ou percentil 75, representa o quartil superior de uma distribuição ordenada de dados; é a mediana da metade superior da distribuição (WAGNER, 1998).

Tabela 6 – Montante anual médio em kWh/m<sup>2</sup>.dia

<b>RB</b>	IGH	5,1
	ITI	5,2
	IDN	3,9
<b>CS</b>	IGH	5,0
	ITI	5,0
	IDN	3,6
<b>BR</b>	IGH	5,0
	ITI	5,1
	IDN	3,8

Os valores calculados pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017) para a região Norte do país foram: 4,46kWh/m<sup>2</sup>/dia (IGH); 4,66 kWh/m<sup>2</sup>/dia (ITI); e 3,26 kWh/m<sup>2</sup>/dia (IDN). As três regiões apresentaram, portanto, médias anuais do montante diário de irradiação superiores às definidas pelo Atlas de Energia Solar do Brasil. É importante observar que a metodologia do Atlas difere da estabelecida neste trabalho. O Atlas também trabalha com séries sintéticas de longo prazo a partir de imagens de satélite e validadas com dados em solo, mas não aplica a metodologia de TMY.

Além da análise comparativa entre as três localidades, foram calculadas as médias diárias dos dados dos meses que compõem o TMY e foram analisadas as variabilidades diárias e ao longo do ano dos dados de irradiação de cada localidade. As seções seguintes detalham essas análises.

#### 4.2 Rio Branco

A Tabela 7, mostra o valor médio diário característico de cada mês de IGH, IDH, IDN e ITI em kWh/m<sup>2</sup>. A tabela também mostra as médias de temperatura (T) em °C, pressão atmosférica (PA) em hPa, umidade relativa do ar (UR) em %, água precipitável (P) em kg/m<sup>2</sup>, velocidade do vento (VV) em m/s e direção do vento (DV) em graus.

Tabela 7 – Médias mensais para o TMY de Rio Branco

Mês	IGH	IDH	IDN	ITI	T	PA	UR	P	VV	DV
Jan	5,0	2,3	3,8	5,1	25,7	992,6	85,5	49,1	1,6	210,4
Fev	5,2	2,5	4,0	5,3	25,7	992,7	86,1	49,1	1,6	210,9
Mar	5,1	2,4	4,0	5,2	25,7	992,7	86,0	48,9	1,6	211,9
Abr	5,1	2,4	4,0	5,3	25,8	992,6	85,3	48,8	1,6	209,8

Tabela 7 – Médias mensais para o TMY de Rio Branco (cont.)

Mês	IGH	IDH	IDN	ITI	T	PA	UR	P	VV	DV
Mai	5,2	2,4	4,1	5,4	25,8	992,6	84,9	48,9	1,5	220,1
Jun	5,1	2,5	3,7	5,1	25,8	992,6	84,5	48,9	1,6	202,7
Jul	5,4	2,4	4,4	5,5	25,8	992,7	84,5	49,0	1,6	207,1
Ago	5,0	2,3	3,8	5,1	25,7	992,6	84,8	49,0	1,5	200,6
Set	4,8	2,4	3,6	5,0	25,6	992,5	85,4	49,0	1,4	207,8
Out	4,8	2,4	3,6	4,9	25,6	992,5	85,7	48,9	1,5	205,9
Nov	5,1	2,3	4,0	5,2	25,7	992,6	85,3	49,0	1,5	210,1
Dez	5,2	2,4	4,1	5,3	25,8	992,6	85,2	49,1	1,5	221,0

Verifica-se baixa variabilidade interanual em todas as variáveis. A IDN apresentou a maior média de montante diário em julho (4,4 kWh/m<sup>2</sup>) e mínima de 3,6 kWh/m<sup>2</sup> em setembro e outubro. Não se verifica relação desses valores com umidade relativa e água precipitável, que costumam ser variáveis que mais impactam no índice de transmissão atmosférica, reduzindo a parcela de radiação direta. A Figura 4 mostra as médias mensais do montante diário de IGH e ITI.

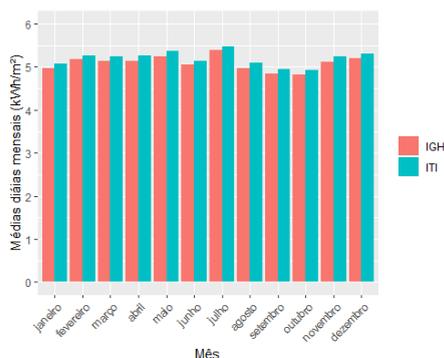


Figura 4 - Médias mensais do montante diário de IGH e ITI para o TMY de Rio Branco

Para latitudes maiores, a ITI (orientada a norte e com inclinação próxima a latitude) tende a apresentar uma variabilidade interanual menor do que a IGH, já que a disponibilidade do recurso é otimizada durante o inverno no plano inclinado. Para latitudes muito pequenas, como o caso do Estado do Acre, a diferença entre o recurso disponível ao longo do ano é muito pequena e, deste modo, a ITI é pouco relevante para a diminuição da variabilidade interanual do recurso.

O menor valor de ITI foi de 4,9 kWh/m<sup>2</sup> em outubro e o maior valor foi de 5,5 em julho, o que representa uma variação de 0,6 kWh/m<sup>2</sup> na média mensal do montante diário de irradiação. O menor valor de IGH foi de 4,8 kWh/m<sup>2</sup> em setembro e o maior foi de 5,4 kWh/m<sup>2</sup> em julho, o que gera também uma variação interanual de 0,6 kWh/m<sup>2</sup>. Portanto, para baixas latitudes a principal vantagem da instalação de módulos em plano inclinado está na diminuição do acúmulo de sujeira no módulo FV, e não na redução da variabilidade interanual do recurso.

Os valores máximos e mínimos de ITI e IDN acontecem nos mesmos meses. A IDN é uma parcela bastante importante no cálculo da ITI. Essas duas variáveis possuem perfis semelhantes ao longo do ano.

A Figura 5 mostra os diagramas de bloco de IGH e ITI considerando os montantes diários de irradiação disponível.

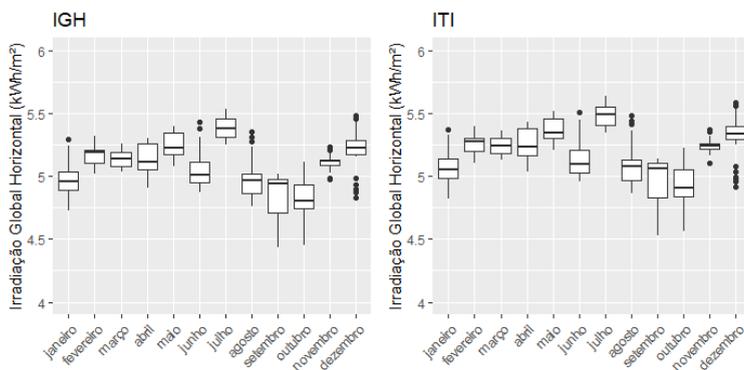


Figura 5 - Boxplot de IGH e ITI para a TMY de Rio Branco

Verificou-se a variação máxima em setembro e a mínima em março, com os demais meses apresentando variações bastante semelhantes e muito pequenas, o que mostra a baixa variabilidade em um mesmo mês do recurso.

### 4.3 Cruzeiro do Sul

A Tabela 8 mostra o montante médio diário característico de cada mês de IGH, IDH, IDN e ITI, em kWh/m<sup>2</sup>, as médias de T em °C, PA em hPa, UR em %, P em kg/m<sup>2</sup>, VV em m/s e DV em graus.

Tabela 8 – Médias mensais para o TMY de Cruzeiro do Sul

Mês	IGH	IDH	IDN	ITI	T	PA	UR	P	VV	DV
Jan	4,8	2,4	3,4	4,9	25,6	987,5	86,5	49,6	1,2	188,5
Fev	5,0	2,5	3,5	5,1	25,6	987,5	86,5	49,8	1,2	189,3
Mar	4,9	2,5	3,5	5,0	25,7	987,5	86,3	50,0	1,2	190,2
Abr	5,0	2,6	3,5	5,0	25,6	987,5	86,5	50,0	1,2	185,7
Mai	5,1	2,6	3,6	5,1	25,6	987,5	87,0	49,8	1,2	185,2
Jun	4,7	2,4	3,4	4,8	25,5	987,5	87,1	49,6	1,3	188,0
Jul	5,1	2,5	3,7	5,1	25,5	987,5	86,9	49,6	1,3	191,6
Ago	5,3	2,4	4,1	5,3	25,7	987,5	85,7	49,5	1,2	190,4
Set	4,9	2,4	3,5	4,9	25,6	987,5	86,3	49,6	1,2	191,6
Out	5,1	2,6	3,7	5,2	25,7	987,5	86,4	49,5	1,2	186,1
Nov	4,9	2,5	3,4	5,0	25,7	987,5	86,4	49,7	1,2	189,8
Dez	5,0	2,5	3,7	5,1	25,6	987,5	86,4	49,5	1,2	188,1

Verifica-se baixa variabilidade interanual em todos parâmetros. Assim como na série histórica de Rio Branco, não foram encontradas altas variações nos dados de IDN ou correlação dessas variações com os dados de umidade relativa e água precipitável. A maior média do montante diário de IDN foi encontrada em agosto (4,1 kWh/m<sup>2</sup>) e a mínima em janeiro, junho e novembro (3,4 kWh/m<sup>2</sup>).

A Figura 6 mostra as médias mensais do montante diário de IGH e ITI.

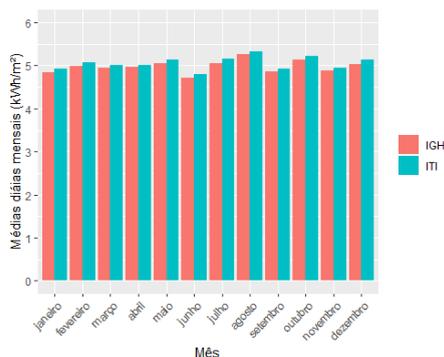


Figura 6 - Médias mensais do montante diário de IGH e ITI para o TMY de Cruzeiro do Sul

O menor valor de ITI foi de 4,9 kWh/m<sup>2</sup> em janeiro e setembro,

e o maior valor foi de 5,3 kWh/m<sup>2</sup> em agosto, o que representa uma variação de 0,4 kWh/m<sup>2</sup> na média mensal do montante diário de irradiação. O menor valor de IGH foi de 4,7 kWh/m<sup>2</sup> em junho, e maior foi de 5,3 kWh/m<sup>2</sup> em agosto, o que gera uma variação interanual de 0,6 kWh/m<sup>2</sup>. Portanto, percebe-se que a ITI para Cruzeiro do Sul reduziu a variabilidade interanual do recurso, ainda que essa redução seja pouco significativa, já que os valores de IGH já possuem um perfil muito uniforme ao longo de todo ano.

A Figura 7 mostra os diagramas de bloco de IGH e ITI considerando os montantes diários de irradiação disponível.

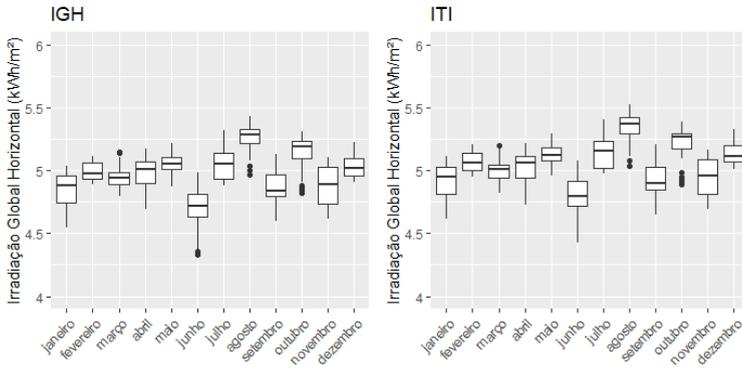


Figura 7 - Boxplot de IGH e ITI para a TMY de Cruzeiro do Sul

Verificou-se a variação máxima em junho e a mínima em fevereiro. Porém, todos os meses apresentam variações muito pequenas, reafirmando mais uma vez a uniformidade do recurso ao longo de todos os dias do ano.

#### 4.4 Brasília

A Tabela 9 mostra o montante médio diário característico de cada mês de IGH, IDH, IDN e ITI, em kWh/m<sup>2</sup>, as médias de T em °C, PA em hPa, UR em %, P em kg/m<sup>2</sup>, VV em m/s e DV em graus.

Tabela 9 – Médias mensais para o TMY de Brasília

Mês	IGH	IDH	IDN	ITI	T	PA	UR	P	VV	DV
Jan	5,4	2,4	4,3	5,6	25,4	982,0	83,8	47,1	1,7	229,9
Fev	5,3	2,4	4,2	5,4	25,4	982,0	83,9	47,2	1,7	225,9
Mar	5,0	2,3	3,9	5,1	25,2	982,0	84,5	47,2	1,8	215,3
Abr	5,0	2,5	3,6	5,1	25,2	981,9	84,5	47,2	1,8	210,5

Tabela 9 – Médias mensais para o TMY de Brasília (cont.)

Mês	IGH	IDH	IDN	ITI	T	PA	UR	P	VV	DV
Mai	4,9	2,4	3,6	5,0	25,2	982,0	84,6	47,2	1,8	220,6
Jun	4,8	2,3	3,7	5,0	25,3	982,0	84,3	47,2	1,7	225,5
Jul	5,0	2,3	3,8	5,1	25,2	982,1	84,7	47,2	1,7	217,9
Ago	5,1	2,3	4,0	5,2	25,2	982,1	84,6	47,4	1,7	216,6
Set	4,9	2,4	3,6	5,1	25,3	982,0	84,7	47,4	1,7	216,2
Out	4,9	2,4	3,5	5,0	25,2	982,0	85,0	47,4	1,8	215,9
Nov	4,7	2,4	3,6	4,8	25,0	982,1	85,3	47,2	1,8	225,7
Dez	5,0	2,4	3,8	5,1	25,1	982,0	84,7	47,0	1,7	227,4

Em Brasília verifica-se também baixa variabilidade interanual em todas as variáveis. Assim como nas demais séries sintéticas, não foram encontradas altas variações nos dados de IDN ou correlação das variações com os dados de umidade relativa e água precipitável. A maior média do montante diário de IDN foi encontrada em janeiro (4,3 kWh/m<sup>2</sup>) e a mínima em outubro (3,5 kWh/m<sup>2</sup>). A Figura 8 mostra as médias mensais do montante diário de IGH e ITI.

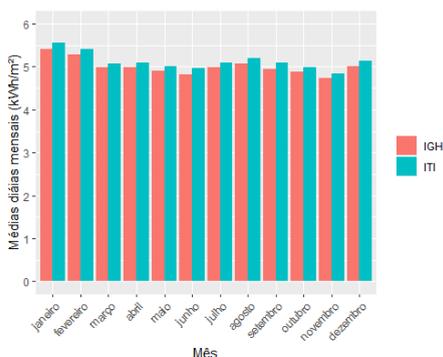


Figura 8 - Médias mensais do montante diário de IGH e ITI para o TMY de Brasília

O menor valor de ITI foi de 4,8 kWh/m<sup>2</sup> em novembro, e o maior valor foi de 5,6 em janeiro, o que representa uma variação de 0,7 kWh/m<sup>2</sup> na média mensal do montante diário de irradiação. O menor valor de IGH foi de 4,7 kWh/m<sup>2</sup> em novembro, e maior foi de 5,4 kWh/m<sup>2</sup> em janeiro, o que gera também uma variação interanual de 0,7 kWh/m<sup>2</sup>. Portanto, percebe-se que a ITI em Brasília não afetou a variabilidade interanual do recurso, que já possui um perfil bastante uniforme ao longo do ano.

A Figura 9 mostra os diagramas de bloco de IGH e ITI considerando os montantes diários de irradiação disponível.

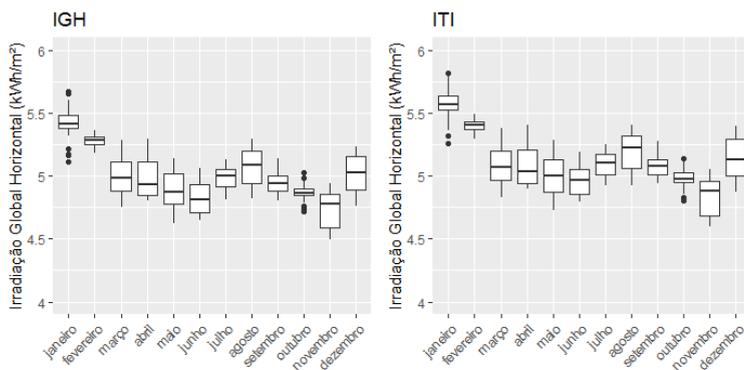


Figura 9 - Boxplot de IGH e ITI para a TMY de Brasília

Verificou-se a variação máxima em novembro e a mínima em fevereiro, porém, todos os meses apresentam variações muito pequenas, reafirmando mais uma vez a uniformidade do recurso ao longo de todos os dias do ano.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho o TMY foi calculado para três cidades do Estado do Acre. Com isso, foi possível avaliar e discutir as metodologias de formação de TMY e a variabilidade temporal mensal e espacial do recurso solar na região. As principais conclusões desse trabalho são:

- a) Mesmo que as três localidades analisadas possuam montantes anuais e mensais semelhantes de IGH - não só em termos de média diária, mas também em termos dos percentis P25, P50 e P75 -, cada uma possui uma formação de TMY própria.
- b) Assim, o ano típico utilizado em uma região não deve ser adotado em outra, principalmente se forem consideradas variações de curto prazo do recurso.
- c) A média anual (IGH) diária das três localidades foi superior à estabelecida no Atlas de Energia Solar do Brasil para a região Norte, em  $0,37 \text{ kWh/m}^2$ , e foi semelhante ao encontrado nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, porém com a vantagem da baixa variabilidade interanual em função, principalmente, da baixa latitude do Estado do Acre.

d) A baixa latitude faz com que não existam ganhos de redução de variabilidade interanual do recurso com a ITI. Nesse sentido, o grande ganho da instalação dos módulos em plano inclinado é com a redução do acúmulo de poeira e orvalho nos módulos FVs.

e) Em termos médios mensais e anuais, a região possui um bom potencial de geração solar. Contudo, é importante observar que, dado o alto nível de umidade da região, o recurso apresenta maiores variações de curto prazo (de 10 em 10 minutos, ou de hora em hora) do que em regiões mais secas e com baixos níveis de nebulosidade. Essa variação maior em curto prazo pode prejudicar a geração FV. A eficiência das usinas nesse caso vai depender das configurações de *strings* e *arrays*, e dos algoritmos de busca do ponto de máxima potência (MPPT) dos inversores.

Com relação ao manuseio dos dados sintéticos, diversos cuidados devem ser tomados. É necessário observar o fuso horário no qual os dados são entregues. No caso das séries analisadas neste trabalho, elas foram entregues no fuso horário UTC+0, que não corresponde ao fuso horário local (UTC -5), o que dificulta a análise dos valores. Por isso é conveniente colocar os dados no fuso horário local. Contudo, é necessário observar a função matemática utilizada para tal e verificar se é desejável ou não considerar os horários de verão, comuns em diversas regiões, nas análises realizadas. Além disso, ao lidar com séries de longo prazo é necessário registrar quais são os anos bissextos, pois a configuração de um dia a mais no ano pode interferir nos cálculos.

Por fim, este trabalho buscou contribuir com dados meteorológicos e de irradiação e com informações mais detalhadas e de longo prazo do Estado do Acre, visando facilitar o desenvolvimento de projetos FVs da região. Como estudos futuros pretende-se o detalhamento dos valores de 10 em 10 minutos das séries sintéticas, bem como a calibração e comparação dessas com os dados que vêm sendo medidos pelas estações solarimétricas instaladas nas três localidades.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa concedida, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio de acesso aos portais de periódicos. Ao Projeto estratégico ANEEL APLPED0026\_PROJETOPED\_2017, que fomentou o desenvolvimento dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. A. M. DE AND VASCONCELLOS, V. M. N. de (2019). Desenvolvimento Do Ano Meteorológico Típico Para a Estação Meteorológica Do Inmet De Copacabana Na Cidade Do Rio De Janeiro, in Xv Encac - Xi Elacac, pp. 538–546.

ARRUDA, A. A. et al. (2012). Radiação Global e Insolação na Região de Ilha Solteira - SP, in XXII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. Cascavel, pp. 1-6. [http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/Connird\\_2012/ARRUDA.pdf](http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/Connird_2012/ARRUDA.pdf)

CEBECAUER, T. AND SURI, M. (2015). Typical Meteorological Year Data: SolarGIS Approach, Energy Procedia. Elsevier B.V., 69, pp. 1958–1969. doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.195.

COSTA, C. L. V. et al., (2022). Análise das Bases de dados do Sistema Elétrico Brasileiro: Estudo de caso dos sistemas isolados. In: II Seminário Interdisciplinar de Energia - SINERG, 2023, São Paulo. Anais do II Seminário Interdisciplinar de Energia. São Paulo: IEE, 2022. p. 32-38.

COSTA, P. H. M. et al. (2020). Eficiência Energética, Pesquisa E Desenvolvimento E Geração Fotovoltaica Na Ufac (Universidade Federal Do Acre), in VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, pp. 30–43. doi: 10.22533/at.ed.1382113053.

CUNHA, K. B. DA, SOARES, M. AND SILVA, A. F. DA (2018) Acesso aos serviços de energia elétrica nas comunidades isoladas da Amazônia: mapeamento jurídico-institucional. Instituto de Energia e Meio Ambiente.

EPE (2014). Sistemas Isolados - avaliação de alternativa de suprimento em sistemas isolados do Acre. Rio de Janeiro: EPE/MME.

EPE (2021a). Expansão da geração - Empreendimentos fotovoltaicos - Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: EPE/MME.

EPE (2021b). Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2024 - Ciclo 2019. Rio de Janeiro: EPE/MME.

FERREIRA, A. L., SANTOS, F. G., DINIZ, I. N., BAITELO, R. L., SILVA, V. O. DA. (2023). Sistemas Fotovoltaicos na Amazônia Legal: avaliação e proposição de políticas públicas de universalização de energia elétrica e logística reversa. pp.79, [http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/IEMA\\_Energia2023-Folheto-WEB0427.pdf](http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/IEMA_Energia2023-Folheto-WEB0427.pdf).

FERREIRA, A. L. AND SILVA, F. B. E (2021). Universalização do acesso ao serviço público de energia elétrica no Brasil: evolução recente e desafios para a Amazônia Legal, *Revista Brasileira de Energia*, 27(3), pp. 135–154. doi: 10.47168/rbe.v27i3.645.

DE FREITAS MOSCARDINI JÚNIOR, E. AND RÜTHER, R. (2020). The influence of the solar radiation database and the photovoltaic simulator on the sizing and economics of photovoltaic-diesel generators, *Energy Conversion and Management*. Elsevier, 210(March), p. 112737. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112737.

GUEYMARD, C. A. AND MYERS, D. R. (2008). Solar Radiation Measurement: Progress in Radiometry for Improved Modeling, in Badescu, V. (ed.) *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1–28.

HAAG, R. AND KREZINGER, A. (2010). Typical Solar Irradiance in the Amazonian Region and His Impact, in IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES CLA) y XVII Simpósio Peruano de Energía Solar (XVII – SPES). Cusco.

LUIZ, E. W. ET AL. (2018). Analysis of intra-day solar irradiance variability in different Brazilian climate zones, *Solar Energy*. Elsevier, 167(April), pp. 210–219. doi: 10.1016/j.solener.2018.04.005.

LUIZ, E. W. AND SCHUCH, N. J. (2012). Determinação de um ano meteorológico típico para Florianópolis – SC, in IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES. São Paulo, pp. 1–7.

MARTINEZ-BOLAÑOS, J. ET AL. (2021). Performance Analysis of Topologies for Autonomous Hybrid Microgrids in Remote Non-Interconnected Communities in the Amazon Region, *Sustainability*, 13, p. 44. doi: 10.3390/su13010044.

Moretto, E. M. et al. (2012) 'Histórico, tendências e perspectivas no planejamento espacial de usinas hidrelétricas brasileiras: A antiga e atual fronteira amazônica', *Ambiente e Sociedade*, 15(3), pp. 141-164. doi: 10.1590/S1414-753X2012000300009.

MOSCARDINI JÚNIOR, E. DE F. (2020). A influência do banco de dados solarimétricos e do simulador fotovoltaico no dimensionamento e na economia de combustível em usinas fotovoltaico-diesel. Universidade Federal de Santa Catarina.

NASCIMENTO, V. A. M. A. DO, TRINDADE, T. B. AND CARVALHO, C. M. (2021). Análise Dos Parâmetros Para Geração De Energia Solar Fotovoltaica No Acre, Brasil, *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, 7(20), p. 202129. doi: 10.18764/2446-6549.e202129.

NEVES, M. E. N. DAS, PINHEIRO, D. P. AND ALMEIDA, A. C. (2021). Estudo sobre a disponibilidade de radiação ao solar na região de Castanhal, PA, *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, (XI), pp. 3–4.

NOAA (2020). *Satellite Channels Overview*.

ONS (2020). *Plano anual da operação energética dos Sistemas Isolados Para 2021 - Pen Sisol 2021*. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico Rua.

ONS (2022). *Orçamento 2022 - info contas setoriais*. Brasília: Operador Nacional do Sistema Elétrico.

PEREIRA, E. B. et al. (2017). *Atlas brasileiro de energia solar*. 2. ed. 2nd edn. São José dos Campos: INPE. doi: 978-85-17-00030-0.

PRADO, N. V.; DA COSTA COELHO, S. M. S. (2017). Estudo da variabilidade temporal da profundidade óptica do aerossol utilizando dados de sensoriamento remoto sobre a região de transição entre a floresta amazônica e o cerrado, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4), pp. 649–658. doi: 10.1590/0102-7786324012.

RELVA, S. G. (2017). *Método de Caracterização da Irradiação para Geração Fotovoltaica: uma análise sistêmica da modelagem da energia primária*. Universidade de São Paulo. doi: 10.11606/D.3.2017.tde-17032017-141345.

SILVA, V. O. DA. (2022). *Como inserir recursos energéticos importados no planejamento energético nacional? Modelo de determinação de recursos energéticos para a integração energética transnacional*. Tese (Doutorado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/T.3.2022.tde-19012023-091237.

SOLARGIS (2020). *Documentation*.

SOUSA, J. W. DE (2020a). Características climáticas do município de Rio Branco , Acre , período de 1990-2019 Climatic characteristics of the municipality of Rio Branco , Acre , period 1990-2019, (29 mm), pp. 723–740.

SOUSA, J. W. DE (2020b). Variabilidade de elementos meteorológicos no município de Cruzeiro do Sul, Acre, intervalo 1993-2014 Variability of meteorological elements in the municipality of Cruzeiro do Sul, Acre, 1993-2014 interval, (71 mm), pp. 708–722.

WAGNER, M. B. (1998). Aspectos básicos da descrição e sumarização de informações em medicina, *Jornal de Pediatria*, 74, pp. 71-74. <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/56211/000437471.pdf?sequence=1#:~:text=O%20quartil%20inferior%2C%20também%20conhecido,a%20mediana%20da%20metade%20superior.>

## **BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS DA PECUÁRIA: IMPACTOS AMBIENTAIS E ORDENAMENTO JURÍDICO EM SANTA CATARINA**

Andrieza de Aquino Eslabão<sup>1</sup>  
Reginaldo Geremias<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade de São Paulo*

<sup>2</sup>*Universidade Federal de Santa Catarina*

DOI: 10.47168/rbe.v29i2.728

### **RESUMO**

A pecuária é uma importante atividade econômica no Estado de Santa Catarina. A atividade de geração de biogás a partir de dejetos da pecuária apresenta benefícios ambientais, econômicos e sociais. Entretanto, pode causar impactos que merecem cuidadosa atenção. A presente investigação teve como objetivo geral realizar estudos dos impactos ambientais negativos provocados por plantas de biogás a partir de dejetos da pecuária, bem como avaliar o ordenamento jurídico voltado ao licenciamento do setor. A metodologia constou de pesquisa bibliográfica e elaboração de matriz legislativa orientativa. Os resultados apontam que o setor é capaz de provocar impactos negativos no solo, água, atmosfera e saúde humana. Observou-se, também, que a normatização incidente sobre processo de licenciamento ambiental de plantas de biogás se mostra incipiente. Concluiu-se pela necessidade da regulação do licenciamento ambiental de plantas de biogás como um aspecto importante para o fomento da produção de energia renovável e proteção ambiental.

Palavras-chave: Dejetos da pecuária; Biogás; Impactos ambientais negativos; Licenciamento ambiental.

### **ABSTRACT**

Livestock is an importantly economic activity in the State of Santa Catarina. Producing biogas from livestock waste grants environmental, economic, and social benefits. However, it may cause impacts that deserve careful attention. The present investigation had, as a general objective, to carry out studies of the negative environmental strikes caused by biogas plants from livestock waste and evaluate the legal system which is aimed at licensing the sector. The methodology consisted of bibliographic research and developing an orienting legislative matrix. The results

indicate that this sector is capable of causing negative impacts on soil, water, atmosphere, and human health. It was also observed that the regulation on the environmental licensing process for biogas plants is incipient. It was possible to conclude that regulating the environmental licensing of biogas plants is necessary as a crucial aspect for promoting renewable energy production and environmental protection.

Keywords: Livestock waste; Biogas; Negative environmental impacts; Environmental licensing.

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento adequado das expressivas quantidades de resíduos gerados pelas atividades humanas tem sido um grande problema ambiental. No que diz respeito aos resíduos orgânicos, os mesmos destacam-se como uma grande fonte de contaminação ambiental pois, de acordo com o Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria, elaborado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais (2015), quando não tratados adequadamente tornam-se uma potencial fonte de contaminação dos solos e corpos hídricos, multiplicação de vetores e moléstias, geração de mau cheiro e difusão de gases de efeito estufa.

O Brasil é um grande produtor pecuário, possuindo, conforme dados publicados pela Pesquisa Pecuária Municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2019) um efetivo de 214,7 milhões de cabeças bovinas, 40,6 milhões de cabeças suínas, 249,1 milhões de cabeças de galinhas, dentre outros animais.

O Estado de Santa Catarina possui um papel proeminente nesse contexto. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI (2021), é o maior produtor de carne suína do Brasil, o segundo maior produtor de frango e o décimo terceiro maior produtor do país de carne bovina. Em termos nacionais, o Estado possui a participação de 27,2% do total de toneladas de carne suína produzida, 14,3% de carne de frango e 2,59% da carne bovina produzida em território nacional.

Segundo o estudo realizado pelo projeto “Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira” – GEF Biogás Brasil (2019), em Santa Catarina são gerados 10,1 milhões m<sup>3</sup>/ano de efluente pelo rebanho total de suínos, 8,2 bilhões de m<sup>3</sup> de efluentes pelo rebanho bovino, 316 mil toneladas de cama aviária e dejetos de aves de corte por ano e 380 mil m<sup>3</sup>/ano de resíduos de aves de postura.

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO (2020) alerta para o fato de que o conjunto da pecuária (bovinos, ovinos, caprinos, suínos e aves) é responsável por

cerca de 18% das emissões de gases de efeito estufa no mundo. Sendo assim, é urgente que se melhore a eficiência no uso de recursos da produção pecuária, bem como reduzir as externalidades negativas associadas à atividade.

A alta concentração de carbono e nutrientes nos resíduos da produção de proteína animal indica a necessidade de estratégias de tratamento diferenciadas para o seu gerenciamento. Apesar da farta literatura no que diz respeito ao tratamento de efluentes de esgoto sanitário, existe pouco conteúdo produzido tratando especificamente das cadeias de produção animal e seus efluentes. Conforme Kunz et al. (2019), o tema é importante e requer atenção, já que muitas unidades produtivas podem apresentar impacto ambiental equivalentes a cidades de médio porte (KUNZ et al., 2019).

A cartilha “Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás”, produzida pelo projeto PROBIOGÁS, uma parceria entre o Ministério das Cidades e organizações alemãs de fomento ao biogás (2016), indica que os resíduos da pecuária apresentam um grande potencial de geração de biogás, dando tratamento adequado aos mesmos, o que mitiga os problemas ambientais decorrentes, e resultando na geração de energia que pode ser utilizada pelo próprio produtor, ou pode ser comercializada.

Na maioria dos casos, os dejetos da pecuária são utilizados diretamente como fertilizantes do solo. No entanto, Gleber e Palhares (2007) apontam que o grande volume gerado pode ocasionar um excesso de elementos químicos contaminantes e agentes biológicos, causando problemas de ordem ambiental e de saúde pública.

Rasapoor et al. (2020) indicam que a biomassa possui um enorme potencial para contribuir com o fornecimento total de energia nas próximas décadas. A partir da utilização de tecnologias integradas, matérias primas como dejetos animais, esterco bovino, suíno e aviário, resíduos agrícolas, e resíduos orgânicos provenientes dos aglomerados urbanos ou da indústria podem ser aproveitados para geração de energia. A biomassa pode ser utilizada para gerar energia de forma direta, para gerar calor, ou indiretamente para gerar produtos como álcool ou o biogás, que é gerado a partir de um processo de digestão anaeróbia.

Conforme estudos realizados por Pasqual et al. (2018), garantir um cenário de segurança alimentar, hídrica e energética, de forma sustentável e equitativa, é um desafio central a ser enfrentado por gestores, governantes e população mundial, já que esses três fatores estão intimamente relacionados. Nesse contexto, vem crescendo o interesse pela possibilidade de gerar energia através de resíduos orgânicos de diversas atividades (pecuária, indústria alimentícia e resíduos sólidos urbanos) que podem, se não manejados corretamente, causar

danos ambientais. Tais processos ainda geram como subproduto um fertilizante que pode ajudar no melhor aproveitamento do solo e produção de alimentos, o que concilia essas três prioridades e apresenta um grande potencial na busca por um futuro sustentável.

Nas últimas décadas, houve um crescimento considerável da oferta de energia a partir de fontes renováveis. No entanto, de acordo com dados extraídos do Balanço Energético Nacional, divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2020), o consumo de energia e o aumento populacional fazem com que demanda seja cada vez maior, e, apesar do aumento da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, a utilização dos combustíveis fósseis e a emissão de gases de efeito estufa também continuam subindo.

Na Contribuição Nacionalmente Determinada (2016), firmada voluntariamente pelo Brasil na Conferência de Paris, o país comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 e, subsequentemente, em 43% abaixo dos níveis de 2005 até 2030. Para que isso ocorra, foi prevista na referida INDC, para o setor de energia, a meta de alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

Para tanto, pretende-se a expansão do uso de fontes renováveis, além da hídrica, na matriz total de energia, para uma participação de 28% a 33% até 2030, através da expansão do uso doméstico de fontes de energia não fóssil e pelo aumento da participação eólica, biomassa e solar. Pretende-se ainda alcançar 10% de ganhos de eficiência energética no setor elétrico até 2030.

À medida que crescem as possibilidades e as tecnologias de aproveitamento da biomassa se tornam mais acessíveis, cresce também a necessidade de planejamento e regulações para que a tentativa de solucionar o problema da crise climática e do aumento constante na demanda de energia não venham a criar outros problemas futuros. Nesse contexto, Trennepohl e Trennepohl (2020) alertam que o licenciamento ambiental exerce um papel primordial, sendo um importante instrumento de efetivação da proteção ao meio ambiente, uma vez que as atividades de utilização de biomassa para fins energéticos estão sujeitas a causar riscos e efeitos maléficos em suas cadeias de produção.

A Lei nº 17.542, de 12 de julho de 2018, que institui a Política Estadual do Biogás em Santa Catarina, prevê, como um de seus instrumentos de efetivação, a prioridade e simplificação dos licenciamentos para empreendimentos da cadeia produtiva do biogás por meio de regulamento próprio dos órgãos estaduais competentes.

No entanto, tal termo normativo ainda não foi criado, o que corresponde a uma lacuna regulamentar que pode gerar insegurança jurídica para os agentes envolvidos na cadeia produtiva e para os ór-

gãos ambientais licenciadores.

Partindo destes pressupostos, o presente artigo teve como objetivo geral realizar estudos dos impactos ambientais negativos provocados por plantas de geração de biogás a partir de dejetos da pecuária, bem como do ordenamento jurídico voltado ao licenciamento ambiental do setor no Estado de Santa Catarina. Estes estudos são de relevância, pois podem contribuir para a ampliação da geração de energia de fonte renovável e mitigar os problemas ambientais e sanitários decorrentes da atividade econômica da pecuária.

A metodologia constou de pesquisa bibliográfica e análise dos principais impactos ambientais negativos vinculados à produção do biogás a partir de dejetos da pecuária, considerando a necessidade de adoção de medidas mitigadoras aos impactos próprios da atividade. Além disso, elaborou-se uma matriz legislativa orientativa das normas incidentes sobre o licenciamento do setor em Santa Catarina com vistas a subsidiar a criação de um instrumento que regulamente a matéria no Estado.

## **2. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS DA PECUÁRIA**

Conforme Rasapoor et al. (2020), de maneira genérica, biomassa pode ser conceituada como toda a matéria orgânica produzida biologicamente. O termo biomassa compreende as produções agrícolas e florestais, bem como resíduos derivados da produção agrícola, agroindustrial e domésticos. Estima-se que sejam gerados mundialmente cerca de 146 bilhões de toneladas de biomassa por ano.

Tomalsquim (2016) aponta que a biomassa é a fonte mais antiga de obtenção de energia, sendo que se estima que a utilização da madeira para a cocção de alimentos remonta mais de um milhão de anos.

No entanto, Cardoso e Parente (2018) assinalam que recentemente a utilização da biomassa como fonte de obtenção de energia passou a ser aprimorada como uma opção à crise ambiental, oferecendo uma alternativa para os combustíveis fósseis, especialmente o petróleo, mitigação dos problemas do tratamento dos resíduos sólidos orgânicos e redução da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, notadamente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), por atividades que possuem grande potencial poluente.

Além disso, conforme sinalizam Kapoor et al. (2020), questões relacionadas ao melhor aproveitamento dos recursos naturais, integrando-os a avançados mecanismos e tecnologias de eficiência, mitigando danos ambientais e integrando agentes sociais, estão no centro da discussão do planejamento de uma economia circular.

A biomassa pode ser submetida ao processo de biodigestão anaeróbia, com consequente produção de biocombustíveis. Esse processo, conforme preconiza Rasapoor et al. (2020), é comum na natureza, ocorrendo, por exemplo, em fundos de lagos, esterqueiras, pântanos e no rúmen de animais ruminantes.

A biodigestão anaeróbia, demonstrada na Figura 1, intitulada “Esquema da digestão anaeróbia”, adaptada pela autora da cartilha Conceitos para o licenciamento de usinas de biogás do projeto PRO-BIOGÁS (2010), pode ser dividida em quatro etapas, quais sejam, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo que cada uma é realizada por grupos de microrganismos que podem requerer condições ambientais específicas (KUNZ et al., 2019).

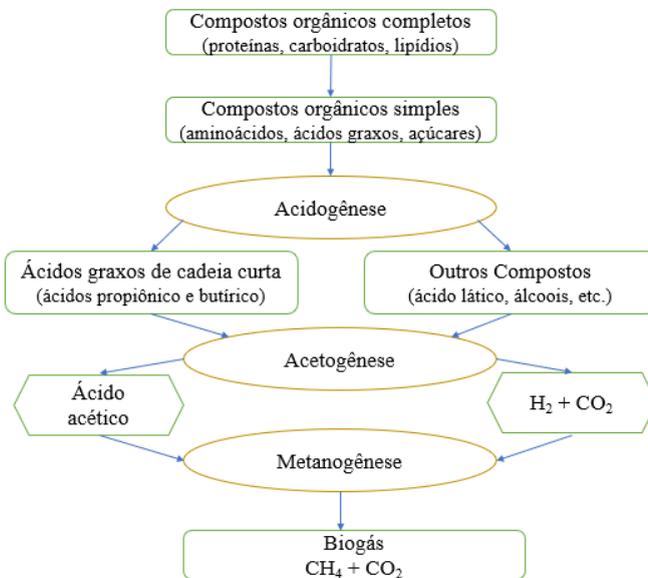


Figura 1 - Esquema da digestão anaeróbia

Conforme a cartilha do PROBIOGÁS, já mencionada (2010), na etapa da hidrólise, compostos orgânicos complexos como proteínas, carboidratos e lipídios são decompostos por bactérias hidrolíticas, transformando-os em substâncias menos complexas, como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. Na etapa da acidogênese, os compostos formados são decompostos em ácidos graxos de cadeia curta, ácido láctico e álcoois, sob a ação de bactérias fermentativas acidogênicas. Na etapa da acetogênese, ocorre o processo de formação do

ácido acético pelas bactérias acetogênicas. Por fim, na etapa da metanogênese, as metanogênicas transformam, principalmente, o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano. No final do processo, tem-se o biogás, o qual é composto principalmente de metano (50% a 70% em volume) e dióxido de carbono (25% a 50% em volume), contendo também pequenas quantidades de hidrogênio, amônia e outros gases, variando de acordo com os substratos utilizados, a técnica de fermentação aplicada e as diferentes tecnologias de construção.

O biogás pode ser utilizado para geração de energia térmica, elétrica, como combustível para automóveis ou substituição do gás de cozinha, dentre outras utilidades, como enumeram Kapoor et al. (2020).

Tabatabaei et al. (2020) ainda prescrevem que o biogás pode ser elevado a composições similares às do gás natural, quando é purificado, podendo chegar a conter cerca de 96-97% de metano. Diversas inovações tecnológicas para potencializar a qualidade do biogás estão sendo aprofundadas a partir de técnicas biológicas, como a utilização de aditivos biológicos, a codigestão anaeróbia e a produção integrada de biogás. Além disso, estão sendo desenvolvidas algumas técnicas menos convencionais de remoção das impurezas contidas no biogás gerado pela digestão anaeróbica (ex: CO<sub>2</sub>, água e sulfeto de hidrogênio-H<sub>2</sub>S), uma vez que essas impurezas podem ameaçar a saúde humana e causar impactos adversos, tais como baixa capacidade, corrosão e emissões de gases de efeito estufa.

Além do biogás, sinaliza Tabatabaei et al (2020), o processo de digestão anaeróbia produz um resíduo sólido e líquido rico em nutrientes, chamado de digestato, que pode ser utilizado na agricultura como fertilizante de solos. A composição do digestato depende da composição da matéria prima e dos fatores ambientais e tecnológicos utilizados para seu processamento. Normalmente, o digestato contém cerca de 1,92% de matéria inorgânica, 6,08% de matéria orgânica e 92% de água.

Mais especificamente, indicam Tabatabaei et al. (2020), a parte sólida do digestato (cerca de 8%) pode conter matéria orgânica dissolvida, nitratos (NO<sub>3</sub>-), amônia (NH<sub>4</sub>+), fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na), além de microelementos como boro, cobre, manganês, ferro e zinco, geralmente esgotados do solo como resultado das práticas agrícolas intensivas.

Conforme Kapoor et al. (2020), o digestato pode ser utilizado diretamente nas produções agrícolas como fertilizante, como matéria prima para cama de animais ou processado e vendido como fertilizante com valor nutricional para o solo. Além das aplicações agrícolas, a parte líquida do digestato pode ser utilizada como fonte de nutrientes

para produção de algas, sendo que a parte sólida do digestato pode ser utilizada para produção de bioetanol ou como combustível em processos térmicos como combustão, ou convertido em carvão ativado através de um processo de pirólise.

### 3. SETOR DO BIOGÁS NO BRASIL E EM SANTA CATARINA

De acordo com dados extraídos da International Energy Agency - IEA (2020), nas últimas décadas houve um aumento das fontes renováveis em todo mundo, com destaque para as fontes eólica, solar e biocombustíveis.

A matriz energética brasileira também acompanhou essa tendência. Conforme o Balanço Energético Nacional - BEN (2020), publicado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, ilustrado pela Figura 2, a oferta interna de energia mostra uma participação das energias renováveis de 46,1%, distribuídas entre biomassa da cana, hidráulica, lenha e carvão vegetal e outras renováveis. Dentre as outras energias renováveis, que representam 7% da oferta interna de energia, o biogás é responsável por 1,3%, tendo crescido 31,8% de 2018 para 2019.

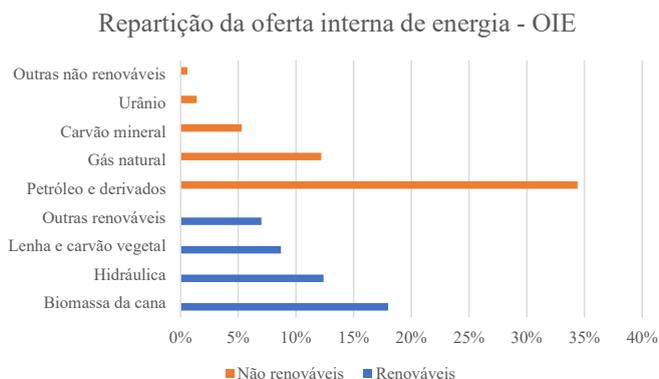


Figura 2 - Elaborada pelos autores com base nos dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2020

Tabela 1 - Elaborada pelos autores com base nos dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2020

Outras renováveis	2018	2019	2018/2019
Lixívia	9.553	8.948	-6,30%
Biodiesel	4.391	4.878	11,10%
Eólica	4.169	4.815	15,50%

Tabela 1 - Elaborada pelos autores com base nos dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2020 (cont.)

<b>Outras renováveis</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2018/2019</b>
Outras biomassas	1.134	1.149	1,40%
Solar	298	572	92,20%
Biogás	204	269	31,80%
Gás industrial de carvão vegetal	88	81	-8%
Total	19.837	20.712	4,40%

A análise de conjuntura, publicada pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2018), sinaliza que a grande disponibilidade de insumos dispersos por várias regiões do país, tais como resíduos de unidades de saneamento e da pecuária, podem contribuir para um aumento considerável do uso do biogás no Brasil nos próximos anos. O estudo ressalta que, além de uma opção para oferta energética, obtêm-se uma solução para o problema ambiental da disposição dos resíduos advindos da produção animal. Nesse sentido, o estudo aponta a oportunidade criada pelo Novo Mercado de Gás, indicando que a produção de biogás pode servir para aumentar a oferta de gás natural, bem como para diminuir a pegada de carbono, evidenciando uma sinergia positiva entre o combustível fóssil e o renovável para uma transição gradual. Nesse sentido, a produção de biogás amplia tanto a capacidade de atendimento à demanda quanto a abrangência da oferta, podendo ser inclusive inserido nos gasodutos.

Já o Relatório Final do Plano Nacional de Energia 2050 da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2020) aponta para o potencial de descentralização da produção de biocombustíveis líquidos e biogás em plantas de pequena escala, o que representa uma mudança de paradigma para o setor, com benefícios que extrapolam o setor energético. No entanto, conforme instrui a cartilha “Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás”, do projeto PROBIOGÁS (2010), a concretização destes cenários depende de alguns fatores, como a competitividade dos recursos e a superação de diversos desafios.

O estudo realizado pelo projeto “Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira” – GEF Biogás Brasil (2019), desenvolvido em conjunto com diversos organismos internacionais, instituições privadas e entidades governamentais, avaliou o potencial de produção de biogás dos três estados do sul do Brasil (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), com base em dados quantitativos e qualitativos colhidos através do Censo Agro do IBGE de 2017. Os resultados obtidos pelo projeto indicam o potencial de geração de energia para o Estado de Santa Catarina na suinocultura, bovinocultura e avicultura.

Segundo o mesmo estudo, o Estado de Santa Catarina possui um rebanho de 8.070.236 cabeças de suínos com 90% destinados à suinocultura de engorda e 10% para matrizes fêmeas e machos, a maior parte localizada na região oeste do Estado. Estima-se que 10,1 milhões de m<sup>3</sup>/ano de efluente são gerados pelo rebanho total de suínos que, se convertidos em biogás, teriam capacidade para abastecer 309.782 residências com energia elétrica (817,9 GWh/ano).

O rebanho bovino atinge 2,8 milhões de cabeças, sendo que 75% correspondem a bovinos de corte e 25% a bovinos leiteiros. Com base nesses quantitativos, o estudo estima que o plantel de bovinos catarinense possa gerar, anualmente, 8,2 bilhões de m<sup>3</sup> de efluentes. Apenas na região sudoeste são, aproximadamente, 1,4 bilhões de m<sup>3</sup>/ano de efluentes. Considerando que esses substratos fossem utilizados em sistema de biodigestão, seria possível produzir 546 milhões m<sup>3</sup>/ano de biogás.

O biogás gerado a partir desse substrato poderia ser destinado à produção de energia elétrica, gerando 793 GWh/ano, o que seria capaz de abastecer cerca de 300.378 residências. Sendo convertido em biometano, poderia substituir 203 milhões de litros de diesel ou 243 milhões de L/ano de gasolina comum.

Ainda, segundo o estudo, o Estado de Santa Catarina conta com 168 milhões de aves, dos quais 94% correspondem a avicultura de corte e 6% a avicultura de postura. Os resíduos gerados nesta atividade (316 mil toneladas por ano de cama aviária e dejetos de aves de corte e 380 mil m<sup>3</sup>/ano de resíduos de aves de postura) têm capacidade de produzir 82 milhões m<sup>3</sup>/ano de biogás.

O biogás produzido a partir da avicultura poderia produzir cerca de 65 milhões de m<sup>3</sup>/ano de biometano que poderiam ser empregados na substituição de 94 milhões de litros de álcool hidratado.

A página eletrônica do Data Sebrae biogás (2021) também traz estimativas de potencial pecuário do biogás para todos os estados brasileiros, valendo citar os dados obtidos a partir do painel interativo para o potencial de geração de biogás a partir das atividades pecuárias no Estado de Santa Catarina, por municípios. Tais estimativas foram elaboradas considerando dados do censo agropecuário de 2017 do IBGE e fatores de conversão entre cabeças de rebanho e metros cúbicos de biogás fornecidos por CIBiogás. No entanto, não obstante o grande potencial de Santa Catarina para produção de biogás, estima-se que sejam gerados apenas 18.84 m<sup>3</sup>/ano.

#### **4. IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

A geração de biogás a partir de dejetos da pecuária tem um grande potencial para mitigar problemas ambientais decorrentes da ati-

vidade, agregando benefícios ambientais, econômicos, sociais e à saúde humana. No entanto, a atividade também apresenta uma série de pontos que, se não manejados adequadamente, podem vir a ocasionar problemas ambientais.

Na Tabela 2, elaborada pela autora a partir de diversas referências bibliográficas (POESCHL; WARD; OWENDE, 2012a POESCHL; WARD; OWENDE, 2012b; FEAM, 2015, DEBONI; FEILSTRECKER; TARSO, 2017, MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2016, SINSUW; WUISANG; CHU, 2021, ZHANG et al., 2021), são elencados os principais impactos relacionados à produção de biogás a partir de dejetos da pecuária citados pela literatura.

Tabela 2 - Impactos ambientais relacionados à produção do biogás

MEIO	IMPACTOS
ABIÓTICO	Emissões atmosféricas: CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NMVOC, PM10, N <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> S, gases de efeito estufa e material particulado.
	Emissão de odores.
	Contaminação de recursos hídricos superficiais ou subterrâneos. Eutrofização. Ecotoxicidade.
	Contaminação do solo. Sobrecarga de nutrientes como fósforo e nitrogênio.
	Esgotamento de recursos.
	Explosões ou incêndios.
	Geração de ruídos.
	Formação de siloxanos.
BIÓTICO	Perda de biodiversidade na flora.
	Perda de biodiversidade na fauna.
SAÚDE HUMANA	Toxicidade humana, resistência a antibióticos pelo uso de fertilizantes provenientes da pecuária, intoxicação, asfixia e/ou queimaduras por contato e/ou aspiração de gases ou substâncias tóxicas.
SOCIOECONÔMICO	Efeitos socioeconômicos no entorno das plantas de biogás.

Sendo assim, para que haja uma efetiva proteção ao meio ambiente, é de suma importância que exista um regramento claro e abrangente, de forma que o procedimento de licenciamento transcorra gerando segurança para os produtores interessados na sua instalação, para os órgãos ambientais e, principalmente, para o meio ambiente.

## 5. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL DO SETOR DO BIOGÁS EM SANTA CATARINA

Dentre os instrumentos instituídos pela Política Nacional de Meio Ambiente, Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981),

o licenciamento ambiental de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras exerce um papel relevante como um dos mais importantes mecanismos do poder público para garantia da qualidade de vida das presentes e futuras gerações, visando à preservação do direito fundamental e inalienável a um meio ambiente ecologicamente equilibrado preceituado pelo artigo 225 da Constituição da República Federativa do Brasil (TRENNEPOHL; TRENNEPOHL, 2020).

Pode-se afirmar que uma combinação coerente entre os múltiplos mecanismos políticos e suas interações é necessária para lidar com as barreiras enfrentadas pelas medidas de transição de sustentabilidade (KANDA et al., 2022).

O procedimento de licenciamento ambiental, enquanto um desses mecanismos e verdadeiro gargalo das iniciativas de projetos, carece de higidez e segurança jurídica para que possa alicerçar a expansão do setor de geração de energia a partir de fontes alternativas (TRENNEPOHL; TRENNEPOHL, 2020).

A produção do biogás, conforme prescreve a cartilha de “Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás” do projeto PROBIOGÁS (2010), da mesma forma que todas as instalações industriais, está sujeita à observância de aspectos ambientais e de segurança.

A Política Nacional do Meio Ambiente, Lei nº 6.938/81, de 31 de agosto de 1981, prevê, entre os instrumentos destinados à consecução dos seus objetivos, no inciso IV “o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras;”

O artigo 10 da referida Lei menciona que a construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais que possam, efetiva ou potencialmente, causar poluição ou degradação ambiental, dependerão de prévio licenciamento ambiental.

Conforme conceituado pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA (2016), o licenciamento ambiental é um importante mecanismo de controle sobre as atividades humanas que interferem nas condições ambientais por meio do qual se busca a conciliação do desenvolvimento econômico com o uso dos recursos naturais, de modo a assegurar a sustentabilidade dos ecossistemas em suas variabilidades físicas, bióticas, socioculturais e econômicas.

Visando regulamentar e efetivar a utilização do licenciamento ambiental como um instrumento de gestão ambiental, conforme instituído pela lei n. 6.938 de 31 de agosto de 1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, em 19 de dezembro de 1997 foi publicada a Resolução nº 237 pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, que, posteriormente, veio a ser complementada e alterada pela Lei Complementar nº 140/2011.

A Resolução define o licenciamento ambiental como um procedimento administrativo necessário às atividades consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, no qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso.

Tal procedimento costuma ser instruído com estudos ambientais apropriados à avaliação dos aspectos ambientais relacionados à localização, instalação, operação e ampliação de uma atividade ou empreendimento, permitindo uma análise técnica nos impactos ambientais do empreendimento.

São considerados estudos ambientais, conforme a Resolução nº 237, o relatório ambiental, o plano e projeto de controle ambiental, o relatório ambiental preliminar, o diagnóstico ambiental, o plano de manejo, o plano de recuperação de área degradada e a análise preliminar de risco.

Conforme o Guia de Licenciamento publicado pela ABiogás (s/d), quando analisadas as referências legais e normativas específicas sobre o biogás, percebe-se que ainda não existe uma regulação específica em nível federal para o seu licenciamento ambiental. Dada a competência concorrente da União e dos Estados da Federação em matéria ambiental, o que se verifica na prática é que cada unidade da federação cria regimentos próprios, havendo divergência considerável nos critérios adotados para enquadramento em cada estado que possui tipologia.

A Constituição do Estado de Santa Catarina (1989) também dispõe da defesa do meio ambiente como sua competência, dispondo, no art. 9º, inciso VI, a competência de, juntamente com a União e os Municípios, proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas.

Com a finalidade de normatizar as diretrizes já traçadas pela Constituição Estadual, o Código Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina, instituído pela Lei 14.675 publicada em 13 de abril de 2009, também traz em seus princípios e instrumentos diretrizes para o exercício da atividade de licenciamento ambiental no contexto dos objetivos da própria Política Estadual do Meio Ambiente.

O artigo 4º da Política Estadual do Meio Ambiente coloca como um de seus princípios, no inciso II, a compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a proteção e preservação da biodiversidade e melhoria da qualidade ambiental. Como um de seus instrumentos, o art. 7º aponta, no inciso I, o licenciamento ambiental e, no inciso II, a avaliação de impactos ambientais. Já o artigo 29 indica que serão passíveis de licenciamento ambiental as atividades conside-

radas pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente - CONSEMA potencialmente causadoras de degradação ambiental.

Além disso, o artigo 31 da Política em pauta esclarece os tipos de estudos ambientais aplicáveis para a avaliação prévia de impactos necessária ao procedimento de licenciamento de atividades potencialmente poluidoras, estabelecendo em seus parágrafos primeiro e segundo algumas diretrizes que devem nortear o empreendedor.

A avaliação prévia dos impactos ambientais é realizada com o auxílio de documentos como o Estudo de Impacto Ambiental - EIA, o Estudo Ambiental Simplificado - EAS, o Relatório Ambiental Prévio - RAP, os quais subsidiam a concessão da Licença Ambiental Prévia e a elaboração dos programas de controle ambiental que podem ser exigidos do empreendimento.

Além disso, o empreendedor deve, conforme recomendam os § 1º e 2º do artigo 31, avaliar a possibilidade de adaptações do processo produtivo visando minimizar a geração de efluentes líquidos, de efluentes atmosféricos, de resíduos sólidos, da poluição térmica e sonora, bem como a otimização da utilização dos recursos ambientais, promovendo a conscientização e treinamento do pessoal da área operacional.

A Resolução nº 98 do Conselho Estadual do Meio Ambiente - CONSEMA, publicada em 5 de maio de 2017, cumpre com o disposto no artigo 29 do Código Estadual do Meio Ambiente, trazendo uma listagem das atividades consideradas potencialmente poluidoras e estabelecendo, segundo o seu porte, o tipo de estudo técnico necessário para a obtenção da licença ambiental.

No código 34.20.00 é disposta a unidade de produção de gás e biogás, com ou sem aproveitamento energético, dispondo de um potencial poluidor/degradador do ar médio, da água pequeno e do solo pequeno, o que resulta em um potencial poluidor/degradador geral, segundo a Resolução, médio.

Ademais, a Resolução estabelece que as unidades de produção de gás e biogás de pequeno porte, ou seja, aquelas cuja vazão de bombeamento seja inferior ou igual a 500 m<sup>3</sup>/h, precisarão da elaboração do Relatório Ambiental Prévio no processo de licenciamento ambiental, assim como as unidades de produção de gás e biogás de porte médio, ou seja, aquelas cuja vazão de bombeamento seja superior a 500 m<sup>3</sup>/h e inferior ou igual a 2000 m<sup>3</sup>/h.

Já as unidades de produção de gás e biogás de grande porte, ou seja, aquelas cuja vazão de bombeamento seja superior ou igual a 2000 m<sup>3</sup>/h, precisarão elaborar o Estudo Ambiental Simplificado, segundo a redação dada pela Resolução do CONSEMA nº 118, de 2017.

Podemos diferenciar o Relatório Ambiental Prévio (RAP), que é um estudo técnico elaborado por profissional habilitado, ou por equipe

multidisciplinar, e que oferece elementos para a análise da viabilidade ambiental de empreendimentos, ou atividades consideradas potencialmente ou efetivamente causadoras de degradação ambiental, do Estudo Ambiental Simplificado (EAS), uma vez que primeiro deve abordar um diagnóstico simplificado da área do empreendimento e seu entorno. Já o EAS, que só pode ser elaborado por equipe multidisciplinar, deve abordar a interação entre elementos dos meios físico, biológico e socioeconômico, buscando a avaliação dos impactos diretos resultantes da implantação do empreendimento a partir de um diagnóstico integrado, estabelecendo medidas mitigadoras, de controle ambiental e compensatórias, quando couber.

Em 13 de julho de 2018 foi publicada a Lei n. 17.542, que institui a Política Estadual do Biogás, cuja justificativa expressa a preocupação com a maciça exploração econômica resultante da criação intensiva de animais que alimenta a agroindústria catarinense, quando seus resíduos não são tratados adequadamente.

A Política reúne um conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, ações, incentivos e fomentos a serem adotados pelo Estado, com vistas à produção, à exploração, ao gerenciamento e à comercialização de biogás.

O referido instrumento legal também estabelece como princípios da Política Estadual do Biogás, no artigo 3º, uma visão sistêmica da gestão da biomassa que considere variáveis ambientais, econômicas, culturais, sociais e tecnológicas, buscando ecoeficiência, responsabilidade solidária pela destinação da biomassa, o reconhecimento da biomassa como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor da cidadania, e a satisfação das necessidades humanas e da sanidade ambiental, reduzindo impactos ambientais provenientes da exploração econômica das atividades agropastoris.

Já os objetivos almejados pela Política elencam a proteção da saúde humana e animal e do meio ambiente, minimizando os impactos da produção e exploração comercial da proteína animal, a adoção, o desenvolvimento e o aprimoramento de tecnologias limpas para minimizar impactos ambientais, a redução do volume de biomassa e a biodigestão de dejetos e rejeitos animais, urbanos e industriais, bem como o fomento ao aproveitamento da biomassa por meio do seu uso em escala industrial e comercial, como forma de geração de emprego e renda.

No que diz respeito ao licenciamento ambiental das atividades de produção de biogás, vale ressaltar que a Política Estadual do Biogás prevê, no artigo 5º, a prioridade e a simplificação dos licenciamentos para empreendimentos da cadeia produtiva do biogás por meio de regulamento próprio dos órgãos estaduais competentes.

Com base nas pesquisas sobre as Leis, Decretos, Resoluções, Instruções Normativas, Portarias e normativas técnicas aplicáveis às plantas de biodigestão no Estado de Santa Catarina, a presente investigação elaborou uma matriz orientativa das principais normativas que regulam o licenciamento ambiental de plantas de biogás no Estado, conforme descrito na Tabela 3 elaborada pela autora.

Tabela 3 - Matriz normativa orientativa do licenciamento ambiental de plantas de biogás no Estado de Santa Catarina

Contexto	Área	Legislação
Contexto do empreendimento	Resíduos/ Saneamento/ Energia renovável	Lei Federal nº 12305/2010
		Decreto Federal nº 7404/2010
		Lei Estadual nº 13.557/2005
		Resolução n. 114/2017 do CONSEMA/SC
Licenciamento Ambiental	Critérios/ Diretrizes Gerais	Lei Federal 6.938/81
		Resolução Conama 01/86
		Resolução CONAMA nº 237/1997
		Lei Complementar 140/2011
		Resolução CONSEMA nº 98
		Lei Estadual nº 14.675/2009
		Decreto Estadual nº 2.955/2010
		Lei Estadual n. 17.542/2018
		Resolução n. 143/2019 CONSEMA
Instruções Normativas nº 11, 28, 65 e/ou 69 do IMA		
Controle Ambiental/ Padrões	Efluente/ Recursos Hídricos	Resolução CONAMA n.º 430 de 2011
		Resolução CONAMA nº 357/2005
		Portaria Estadual nº 024/79
		Resolução CONAMA nº 181/2021
	Emissões Atmosféricas	Resolução CONAMA nº 382/2006
		Resolução CONAMA nº 491/2018
	Ruído	Resolução CONAMA nº 001/1990
	Segurança	ABNT NBR 17.505/2013
		NR 06, 09, 10, 12, 20, 23 e 26/1978 Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho
NSCI/94 Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Santa Catarina		

Tabela 3 - Matriz normativa orientativa do licenciamento ambiental de plantas de biogás no Estado de Santa Catarina (cont.)

Contexto	Área	Legislação
Aspectos Locacionais	Flora	CONAMA nº 02/1994
		Resolução CONAMA nº 369/2006
		Lei Federal nº 12.651/2012
		Lei Federal nº 11.428/2006
	Fauna	IN nº 146/2007 do IBAMA
		Lei Federal nº 5.197/1967
Patrimônio Cultural Arqueologia	IPHAN - Instrução Normativa nº 001/2015	
Área de marinha	Decreto Federal nº 5.300/2004	
Regulamentação Subprodutos	Composto	Lei nº 6.894/ 1980
		IN MAPA nº 27/2006
		IN MAPA nº 25/2009
	Biogás/ Biometano	Lei Federal 14.134/21
		Decreto 10.712/21
		Resolução ANP nº08/2015
		Resolução ANP nº 23/2012
		ABNT NBR 14.461/2000 e seguintes.
		ABNT NBR 15.526/2012
	Energia Elétrica	Lei nº 9.074/1995
		Resolução Normativa ANEEL nº 167/2005
		Lei 14.300 de 6 de janeiro de 2022 – Marco Legal da Geração Distribuída
		ABNT NBR 5.410/2004

Como se pode observar, diversas legislações regulamentam questões relevantes da produção, comercialização e implantação de plantas de biogás em áreas diversas. Dessa forma, a existência de uma norma que congregasse as diretrizes relevantes para o licenciamento ambiental de plantas de biogás a partir de dejetos da pecuária tornaria o processo mais simples.

Também foi possível constatar a inexistência de uma normativa própria para a atividade de biogás que congregue parâmetros e definições para o procedimento de licenciamento ambiental, tal como almejado pela Lei 17.542 de 12 de julho de 2018.

Observou-se, portanto, que a legislação ambiental que regulamenta o licenciamento de plantas de biogás a partir de dejetos da pecuária no Estado de Santa Catarina pode ser aprimorada, para que

possa trazer mais segurança e qualidade ambiental para os novos projetos a serem incentivados por políticas de expansão da atividade.

## 6. CONCLUSÃO

Apesar de todos os benefícios ambientais advindos da instalação de unidades de tratamento de dejetos da pecuária através da geração de biogás, a atividade também possui uma série de impactos e riscos atrelados que merecem cuidadosa atenção.

Tais instalações possuem caráter industrial, associando a recepção e tratamento de resíduos e efluentes, a produção e valorização do biogás, que é um gás inflamável, e o procedimento e expedição do material digerido. Alguns dos principais impactos ambientais dessas usinas são a geração de emissões de odorantes, de gases causadores de efeito estufa e de material particulado, a proliferação de vetores e a possibilidade de contaminação do solo e corpos hídricos (FEAM; GIZ, 2015). Outras questões, como a geração de ruídos, o risco de explosões e a destinação final adequada do material digerido (digestato), também são variáveis específicas da atividade que requerem cuidados.

Por estarem listadas na Resolução n. 98 do CONSEMA de Santa Catarina como uma das atividades que necessitam da realização do licenciamento ambiental, tais unidades dependem de tal procedimento para sua instalação, variando o tipo de estudo ambiental requerido em função do porte do empreendimento.

Verifica-se que incidem sobre os empreendimentos de geração de biogás uma série de normativas esparsas, tais como as que regulam a supressão de vegetação, a destinação de resíduos sólidos, limites de emissões de gases, ruídos, normas técnicas para elaboração de projetos e de segurança do trabalho, dentre outras.

No entanto, a falta de um regramento para o licenciamento ambiental das atividades de geração de biogás a partir de dejetos da pecuária no Estado de Santa Catarina pode ser um fator de atraso na expansão do programa de incentivo à atividade instituído pela Política Estadual do Biogás, além de gerar insegurança jurídica para as partes envolvidas e deixar lacunas que podem acabar em situações danosas ao meio ambiente e às pessoas envolvidas na operação.

Como referência normativa, pertinente citar a Resolução n. 8/2021 da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável - SE-DEST do Estado do Paraná, que sai na frente dos demais estados brasileiros ao criar uma norma específica para a fonte (ABiogás, s/d).

Uma regulação clara e assertiva é importante para garantir a efetividade do processo de licenciamento ambiental e, por consequência, contribuir para a segurança técnica do empreendimento e mitigação de passivos ambientais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGÁS - Associação Brasileira do Biogás (ABiogás). Guia de licenciamento. Sem data. Disponível em: [https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390e020a5fea59db1b4ea53\\_guia-licenciamento-abiogas.pdf](https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390e020a5fea59db1b4ea53_guia-licenciamento-abiogas.pdf). Acesso em: 03 de abril de 2023.

AGENDA 2030. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 18 set 2022.

BIOGÁS BRASIL. Potencial de geração de biogás no sul do Brasil. Projeto GEF Brasil. Foz do Iguaçu/PR: 2019. Disponível em: [https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Potencial-de-produ%C3%A7%C3%A3o-de-biog%C3%A1s-Sul-do-Brasil\\_OK\\_revRCFM-v-2-min.pdf](https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Potencial-de-produ%C3%A7%C3%A3o-de-biog%C3%A1s-Sul-do-Brasil_OK_revRCFM-v-2-min.pdf). Acesso em: 20 de julho de 2022.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, [2020]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 5 ago. 2022.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 06 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Brasília: Presidência da República [1997]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9478.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9478.htm). Acesso em: 29 ago. 2022.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República [1981]. Disponível em: [150 http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm). Acesso em: 29 ago. 2022.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República [2010]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 29 ago. 2022.

BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981. Brasília: Presidência da República [2011]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/lcp/lcp140.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm). Acesso em 29 de ago. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2050 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 15 de julho de 2021.

BRASIL. NDC Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. UNFCCC, v. 9, p. 6, 2016. Disponível em: <https://unfccc.int/NDCREG>. Acesso em 20 de julho de 2022.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás / Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Felipe Correa de Souza Pereira Gomes ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2016. p.:147 p. : il. – (Desenvolvimento do mercado de biogás; 3). Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/licenciamento-usinas-biogas.pdf>. Acesso em: 15 de julho de 2021.

CARDOSO, M. T.; PARENTE, V. A importância do aproveitamento energético de resíduos para descarbonização da economia na Sueca. Revista Brasileira de Energia, v. 24, n. 2, p. 07–22, 2018.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. Publicada no DOU no 247, de 22 de dezembro de 1997, Seção 1, páginas 30841-30843. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=237](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237). Acesso em 20 de julho de 2022.

CONSEMA - Conselho Estadual de Meio Ambiente. Resolução nº 98 de 5 de maio de 2017. Aprova, nos termos do inciso XIII, do art. 12, da Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009, a listagem das atividades sujeitas ao licenciamento ambiental, define os estudos ambientais necessários e estabelece outras providências. Florianópolis: Conselho Estadual de Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.sde.sc.gov.br/index.php/biblioteca/consema/legislacao/resolucoes/2017/2212-resolucao-consema-n-98-2017/file>. Acesso em 20 de julho de 2022.

DEBONI, F. V.; FEILSTRECKER, M.; TARSO, P. DE. Licenciamento ambiental de plantas de biodigestão de resíduos: critérios de diretrizes para o estado do Paraná. Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, p. 78, 2017.

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina; CEPA – Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola. Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina 2019 - 2020. p. 172, 2021. [https://docweb.epagri.sc.gov.br/website\\_cepapublicacoes/Sintese\\_2019\\_20.pdf](https://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepapublicacoes/Sintese_2019_20.pdf). Acesso em 20 de julho de 2022.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Décima Edição Da Análise De Conjuntura Dos Biocombustíveis – Ano 2020. Publicado em: Julho de 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2020>. Acesso em 20 de julho de 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético 2020 - Relatório Síntese / Ano base 2019. p. 73, 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em 20 de julho de 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 - Ano base 2019. Empresa de Pesquisa Energética, p. 256, 2020b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20EI%C3%A9trica%202020.pdf>. Acesso em 20 de julho de 2022.

ESTADO DE SANTA CATARINA. Constituição (1988). Constituição do Estado de Santa Catarina. Florianópolis, SC: Assembleia Legislativa. Disponível em: [http://leis.alesc.sc.gov.br/html/constituicao\\_estadual\\_1989.html#:~:text=CONSTITUI%C3%87%C3%83O%20DO%20ESTADO%20DE%20SANTA%20CATARINA%20DE%201989&text=O%20povo%20catarinense%2C%20integrado%20%C3%A0,-do%20Estado%20de%20Santa%20Catarina](http://leis.alesc.sc.gov.br/html/constituicao_estadual_1989.html#:~:text=CONSTITUI%C3%87%C3%83O%20DO%20ESTADO%20DE%20SANTA%20CATARINA%20DE%201989&text=O%20povo%20catarinense%2C%20integrado%20%C3%A0,-do%20Estado%20de%20Santa%20Catarina). Acesso em: 20 de julho de 2022.

ESTADO DE SANTA CATARINA. Lei nº 14.675 de 13 de abril de 2009. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências. Florianópolis, SC: Governo do Estado de Santa Catarina. Disponível em: [http://leis.ale.sc.gov.br/html/2009/14675\\_2009\\_Lei.html](http://leis.ale.sc.gov.br/html/2009/14675_2009_Lei.html). Acesso em: 20 de julho de 2022.

ESTADO DE SANTA CATARINA. Lei nº 17.542, de 12 de julho de 2018. Institui a Política Estadual do Biogás e dá outras providências. Florianópolis, SC: Governo do Estado de Santa Catarina. Disponível em: [http://leis.ale.sc.gov.br/html/2018/17542\\_2018\\_Lei.html#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2017.542%2C%20de%2012%20de%20julho%20de%202018&text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Estadual%20do%20Biog%C3%A1s%20e%20estabelece%20outras%20provid%C3%AAncias](http://leis.ale.sc.gov.br/html/2018/17542_2018_Lei.html#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2017.542%2C%20de%2012%20de%20julho%20de%202018&text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Estadual%20do%20Biog%C3%A1s%20e%20estabelece%20outras%20provid%C3%AAncias). Acesso em: 20 de julho de 2022.

FAO. Pecuária sustentável e mudanças climáticas na América Latina e no Caribe. Disponível em: <http://www.fao.org/americas/prioridades/ganaderia-sostenible/pt/>. Acesso em: 1 dez. 2020.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM), Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ). Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), [2015]. Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/2015/PRODUCAO\\_SUSATEN-TAVEL/GUIAS-TECNICOS-AMBIENTAIS/Guia\\_Biog%C3%A1s.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2015/PRODUCAO_SUSATEN-TAVEL/GUIAS-TECNICOS-AMBIENTAIS/Guia_Biog%C3%A1s.pdf). Acesso em 1 dez. 2020.

GLEBER, L.; PALHARES, J. C. P. Gestão Ambiental na Agropecuária. Embrapa, p. 314, 2007.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento. 3. ed. rev ed. São Paulo: Edusp, 2012.

GUSSOLI, F. K. Relative and supraconstitutional hierarchy of international human rights treaties. *Revista de Investigações Constitucionais*, v. 6, n. 3, p. 703–747, 2019.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. Licenciamento Ambiental. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes/licenciamento-ambiental>. Acesso em: 15 de julho de 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa da Pecuária Municipal - PPM - Séries históricas 1974 - 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=series-historicas>. Acesso em: 14 abr. 2021.

IEA – International Energy Agency. Data & Statistics. Disponível em: [https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy supply&indicator=TPESbySource](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource). Acesso em: 24 set. 2021a.

IMA Instituto de Meio Ambiente de Santa Catarina. Instrução Normativa nº 65 de 10 de fevereiro de 2020. Defini a documentação necessária ao licenciamento e estabelecer critérios para apresentação dos planos, programas e projetos ambientais para implantação das atividades listadas no Anexo 1 desta Instrução Normativa. Instituto de Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina. Florianópolis, SC. Disponível em: [file:///C:/Users/User/Downloads/in65\\_44\\_20200210.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/in65_44_20200210.pdf). Acesso em 15 de julho de 2021.

JUNIOR, E. S. DA S. Direito constitucional: Hierarquia das normas constitucionais. Jusbrasil, 2021. Disponível em: <https://eliassouzadsj.jusbrasil.com.br/artigos/1201884938/direito-constitucional-hierarquia-das-normas-constitucionais>. Acesso em: 15 de julho de 2021.

KAPOOR, R. et al. Valorization of agricultural waste for biogas based circular economy in India: A research outlook. *Bioresource Technology*, v. 304, n. February, p. 123036, 2020.

KUNZ, A. et al. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia: EMBRAPA, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1108617/fundamentos-da-digestao-anaerobia-purificacao-do-biogas-uso-e-tratamento-do-digestato>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2023.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. DE. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. *Revista de Política Agrícola*, p. 28–35, 2006.

LENZA, P. Direito Constitucional Esquematizado. 19a ed. São Paulo: 2015.

MAO, C. et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 540–555, 2015.

NASCIMENTO NETO, J. O. DO. Políticas Públicas e regulação socioambiental. Governança, estratégias e escolhas públicas: energia e desenvolvimento em pauta. Curitiba: Íthala, 2017.

PASQUAL, J. C. et al. Assessment of collective production of biomethane from livestock waste for urban transportation mobility in Brazil and the United States. *Energies*, v. 11, n. 4, p. 1–19, 2018.

POESCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Environmental impacts of biogas deployment - Part I: Life Cycle Inventory for evaluation of production process emissions to air. *Journal of Cleaner Production*, v. 24, p. 168–183, 2012a.

POESCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Environmental impacts of biogas deployment - Part II: Life Cycle Assessment of multiple production and utilization pathways. *Journal of Cleaner Production*, v. 24, p. 184–201, 2012b.

RASAPOOR, M. et al. Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation. *Fuel*, v. 261, n. September 2019, p. 116497, 2020.

RIFKIN, J. A terceira revolução industrial: como o poder lateral está transformando a energia, economia e mundo. São Paulo: M.Books do Brasil Editora Ltda., 2012.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. DataSebrae Biogás. Disponível em: <https://painéis-lai.sebrae.com.br/single/?appid=bc75184c=943-f4156--b85c305915943-ebd&sheet-fb74886d-b41f-40a1-a4df-485782d9fda7&opt=cursel%2Cctxmenu&select=clearall>. Acesso em: 15 set. 2021.

SINSUW, A. A. E.; WUISANG, C. E.; CHU, C. Y. Assessment of environmental and social impacts on rural community by two-stage biogas production pilot plant from slaughterhouse wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, v. 40, n. October 2020, p. 101796, 2021.

SOUZA, I. S. DE; AQUINO, R. F. DE. Análise do princípio da proteção ao meio ambiente na Política Energética Nacional. *Direito Energia*, v. 7, p. 106–128, 2013.

TABATABAEI, M. et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 2: Mainstream and downstream strategies. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1392–1407, 2020.

TOMALSQUIM, M. T. Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TRENNEPOHL, C.; TRENNEPOHL, T. Licenciamento Ambiental. 8a Edição ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2020.

ZHANG, Y. et al. Dispersion of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) from stored swine manure biogas digestate to the atmosphere. *Science of the Total Environment*, v. 761, p. 144108, 2021

## ESTUDO CINÉTICO DA CO-PIRÓLISE DO LODO DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL E CASCA DE CAFÉ

Hilson Henrique Massucatti Canal<sup>1</sup>  
Cláudia Rodrigues Teles<sup>1</sup>  
Taisa Shimosakai de Lira<sup>1</sup>  
Thiago Padovani Xavier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo

DOI: 10.47168/rbe.v29i2.731

### RESUMO

Com o avanço tecnológico, a utilização da biomassa como fonte energética se tornou uma alternativa à utilização de combustíveis fósseis, pois, contribuem para a redução da emissão dos gases de efeito estufa. O lodo da indústria de celulose e papel e as cascas de café possuem grande potencial de utilização para fins energéticos, principalmente pela sua composição, com alta concentração de matéria orgânica. Desta forma, este trabalho tem o objetivo de avaliar o potencial desses resíduos para aplicação em processos termoquímicos de conversão, mais especificamente a co-pirólise. Foi avaliado o comportamento da degradação térmica de misturas de 0, 25, 50, 75 e 100% de casca de café e lodo, em massa, bem como foram estimados os parâmetros cinéticos e termodinâmicos por meio da análise termogravimétrica. A casca de café apresentou baixo teor de umidade, 11,33%, e alto teor de sólidos voláteis, 73,64%, enquanto o lodo apresentou alto teor de umidade e sólidos voláteis, 60,63 e 67,24% respectivamente, tornando-se essencial o emprego de tecnologias de desaguamento a montante dos processos de aproveitamento energético. A cinética das reações de pirólise foi investigada, com três etapas da reação, tais como, liberação de voláteis leves e zona ativa e passiva de pirólise. Ainda, o estudo da sinergia entre os dois resíduos apontou que a adição de 75% de lodo da indústria de celulose e papel na composição da amostra para todas as taxas de aquecimento foi positiva quanto a geração de voláteis na reação. Desta forma, considerando que a geração desses resíduos é crescente e com base nas premissas da gestão de resíduos sólidos, concluiu-se que a pirólise e co-pirólise das biomassas é aconselhável, pois, trata-se de uma alternativa de destinação final social, econômico e ambientalmente viável para resíduos que são potencialmente danosos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Co-pirólise; Cinética; Aproveitamento energético de resíduos.

## ABSTRACT

With technological advances, the use of biomass as an energy source has become an alternative to the use of fossil fuels, as they contribute to the reduction of greenhouse gas emissions. Sludge from the pulp and paper industry and coffee husks have great potential for energy use. Thus, this work aims to evaluate the potential of sludge from the pulp and paper industry and coffee husks for application in thermochemical conversion processes, more specifically co-pyrolysis. The thermal degradation behavior of mixtures of 0, 25, 50, 75 and 100% of coffee husks and sludge, by mass, was evaluated, as well as the kinetic and thermodynamic parameters estimated through thermogravimetric analysis. The coffee husk presented low moisture content, 11.3% and high volatile solids content, 74.64% while the sludge presented high moisture and volatile solids content, 60.63 e 67.24% respectively, making essential the use of dewatering technologies upstream of the energy recovery processes. The kinetics of pyrolysis reactions were investigated, with three reaction steps, such as light volatiles release and active and passive pyrolysis zone. Still, the study of the synergy between the two residues, pointed out that the addition of 75% of sludge from the pulp and paper industry in the sample composition for all heating rates was positive regarding the generation of volatiles in the reaction. In this way, considering that the generation of this waste is increasing and based on the premises of solid waste management, it was concluded that pyrolysis and co-pyrolysis of biomass is advisable, as it is a viable alternative of destination, from social, economic and environmental points of view, of residues that are potentially harmful to the environment.

Keywords: Co-pyrolysis; Kinetics; Waste to Energy.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo a International Energy Agency - IEA (2020), no ano de 2018 o consumo de energia no mundo era composto por cerca de 86% de fontes não-renováveis de energia e 14% advindas de fontes renováveis. Enquanto no Brasil, no mesmo ano base, o consumo de energia era baseado em cerca de 46% de fontes renováveis, sendo que, a utilização da biomassa como fonte de energia representou 26% do total (EPE, 2020).

Mesmo que a matriz energética brasileira disponha de uma boa parcela de fontes renováveis comparada com o restante do mundo, ainda apresenta uma situação de dependência do uso de fontes não renováveis, em sua maioria composta por combustíveis fósseis. De acordo com Lewandrowski et al. (2020), a utilização de combustíveis

fósseis como fonte energética propicia um desenvolvimento insustentável, pois, causam interferências ambientais principalmente por causa da emissão dos gases do efeito estufa - GEE. Os autores ainda complementam que a substituição desses combustíveis fósseis não renováveis por biomassa pode significar uma redução na emissão de CO<sub>2</sub> em até 50%, atribuindo este fato ao balanço zero de emissão deste gás.

Partindo dessa premissa, Huang et al. (2016) apontaram que a utilização da biomassa residual para suprimir essa dependência pelas fontes não renováveis de energia é benéfica no ponto de vista do desenvolvimento sustentável, pois se trata de aproveitamento de materiais residuais. Neste contexto, alguns autores consideram que tais resíduos são uma fonte promissora de energia. Essa opção vem sendo testada em diversos aspectos, um deles é a obtenção de biocombustíveis por processos termoquímicos de conversão, dentre eles a pirólise, gaseificação e combustão (MACKENDRY, 2002; QUAN e GAO, 2016; XAVIER, 2016; ONG et al., 2020; OPIA et al., 2020).

Opia et al. (2020) apontaram que a pirólise tem se mostrando uma técnica promissora na conversão energética de biomassa, transformando materiais residuais em produtos úteis socioeconomicamente. Em complemento, Czernik e Bridgwater (2004) afirmam que ao submeter um resíduo à pirólise, é possível reduzir em até 90% o volume, representando uma solução para problemas relacionados ao manuseio, armazenamento e disposição final, logo diminuindo riscos de contaminação do meio ambiente. Ainda, Quan e Gao (2016) e Uzo-ejinwa et al. (2018) apresentaram a co-pirólise como uma alternativa muito versátil, pois a combinação de mais de um resíduo é uma forma de aproveitar todas as características a fim de se obter uma mistura ótima, como, por exemplo, o melhoramento do bio-óleo produzido com a redução de compostos oxigenados. Esse fenômeno também é denominado de potencial sinérgico entre as matérias (ZHANG et al., 2017; LI et al., 2019).

De acordo com Zhang et al. (2020), a pirólise, além de se mostrar uma técnica promissora na conversão energética de diferentes resíduos, pode ser aplicada como uma forma de destinação final, visto que este método além de reduzir drasticamente seu volume, pode representar um eficiente meio de tratamento que contrapõem com as medidas comumente empregadas, minimizando riscos ao meio ambiente. Os autores relacionaram a pirólise como uma forma de tratamento de resíduo, empregada principalmente aos diversos tipos de lodos de estações de tratamento de efluentes (ETE). Outra alternativa que tem se mostrado viável é a aplicação da pirólise às biomassas lignocelulósicas por causa da sua composição, geralmente com altos teores de sólidos voláteis e baixos teores de sólidos fixos, que significa

um padrão de qualidade para o processo de conversão energética (MACKENDRY, 2002; QUAN e GAO, 2016).

De acordo com Veluchamy e Kalamdhad (2017), o intenso processo de industrialização ocasiona uma crescente demanda por energia e uma maior disponibilidade de resíduos. O lodo é um resíduo sólido proveniente de ETE's de diversos processos industriais, geralmente não-tóxico e carregado de matéria orgânica. Tal resíduo pode receber três tipos diferentes de destinação final: aplicação em agricultura; aterros sanitários e, reaproveitamento energético (ANDREOLI, 2006; FONTS et al., 2009; MANARA e ZABANIOTOU, 2012). Entretanto, alguns autores apontam que a destinação desses lodos em aterros é inviabilizada por conta do grande volume que é produzido atualmente, que gera dificuldades técnicas no manejo desses aterros. Assim sendo, técnicas que se baseiam na redução, reaproveitamento e reciclagem desse tipo de resíduo refletem em maiores níveis de segurança ambiental (JAMALI et al., 2007; MANARA e ZABANIOTOU, 2012). O lodo gerado nas fábricas de celulose e papel pode ser categorizado em lodo primário e secundário. O lodo primário refere-se ao material gerado pela clarificação inicial do efluente da fábrica de papel/celulose via flotação ou sedimentação. Já o lodo secundário é originário de uma sucessão de métodos, tais como lodos ativados, aeração e mistura para oxidação, a fim de reduzir o volume e gerar um material residual mais processado (TURNER et al., 2022).

Dentre os diversos tipos de biomassa lignocelulósica, tem-se também a casca de café, que segundo Murthy e Naidu (2012) representam cerca de 18% em massa de toda a cadeia de beneficiamento do café. O Brasil corresponde ao maior produtor de café do mundo desde a década de 1970 (FERRÃO et al., 2017). E se tratando de uma atividade muito difundida, Saenger et al. (2001) alegam que a destinação final mais empregada para seus resíduos é a utilização como fertilizante natural, ou aproveitamento como combustível complementar para a secagem dos grãos de café.

Deste modo, existem estudos que investigam o potencial energético da pirólise do lodo da indústria de celulose e papel (WANG et al., 2021) e da casca de café (CHEN et al., 2017) de forma desagregada. Porém, não foram encontrados estudos que investigam o potencial energético da co-pirólise destas duas biomassas combinadas, o que justifica a investigação da interação dessas fontes renováveis para produção de energia, tendo por base estudos de potencial sinérgico da co-pirólise (QUAN e GAO, 2016; UZOEJINWA et al., 2018).

O Brasil é o maior produtor de café no mundo e os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo responderam por 83,8% da produção do café nacional em 2017 (EMBRAPA, 2018). Por outro lado, estima-se que em torno de 400 Mt de papelão e papel são produzidos globalmente por ano, e que 4,3–40 kg (ps) de lodo, celulose e lodo de

fábrica de papel são gerados para cada tonelada de produto (TURNER et al., 2022).

Para atingir os objetivos relativos à pirólise de biomassa, Ceylan e Topçu (2014) atestam que é necessário o estudo da cinética das reações pirolíticas como uma ferramenta de dimensionamento e controle, tanto da biomassa quanto dos mecanismos para a conversão da energia propriamente dita. Os modelos cinéticos isoconversionais são aplicáveis para o estudo da cinética dessas reações e apresentam resultados consistentes (CEYLAN e TOPÇU, 2014; CHANDRASEKARAN et al., 2017; HU et al., 2017).

Com isso, este estudo se justifica na importância de se encontrar meios de substituir as fontes de energia não renováveis por fontes renováveis, se alicerçando nos objetivos socioeconômicos do desenvolvimento sustentável. A utilização de biomassas como fontes energéticas tem se destacado com resultados promissores, assim, este estudo tem o objetivo principal o estudo cinético das reações de pirólise e co-pirólise do lodo da indústria de celulose e papel e da casca de café, assim como avaliar seus potenciais para aplicação em processos termoquímicos de conversão energética e, como objetivos específicos, determinar os parâmetros físico-químicos por meio da análise imediata, e os parâmetros cinéticos e termodinâmicos por meio da análise termogravimétrica e aplicação dos modelos cinéticos isoconversionais.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Coleta e preparação das amostras

Foram coletados dois diferentes resíduos para a realização deste estudo, as cascas de café e o lodo da indústria de celulose e papel. As amostras foram coletadas de acordo com a norma de amostragem de resíduos sólidos, NBR 10.007 (ABNT, 2005). As cascas de café tiveram origem das lavouras cafeeiras, com predominância do cultivo do café Conilon (*Coffea canephora*), na região de São Mateus, ES, Brasil. O lodo foi coletado de um reator do tipo lodos ativados de uma ETE de uma indústria de celulose e papel, sendo considerado lodo secundário.

Inicialmente, os resíduos foram submetidos a uma secagem em estufa, para retirada do excesso de umidade. Na sequência, as amostras secas foram trituradas em moinho de facas (tipo Willey SL-32) e, em seguida, peneiradas em peneiras de metal da marca Bertel. Da mesma forma como Lima (2018) e Pimentel (2019), utilizou-se amostra com partículas iguais ou menores que 0,212 mm.

Os resíduos foram submetidos ao forno mufla (Forno Mufla Digital Microprocessado SP-1200DM/B) a 850 K por uma hora, ou até atingir peso constante, com acompanhamento das massas iniciais e

finais das amostras. Portanto, foram obtidas as frações percentuais em massa de umidade (U), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF), que correspondem aos procedimentos de análise imediata descritos no Método 2540 G do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (BAIRD et al., 2017), que dispõe sobre procedimentos de análise imediata de resíduos sólidos e semi-sólidos.

## 2.2 Análise termogravimétrica

Foi utilizado um analisador termogravimétrico (Shimadzu Termogravimetric Analyzer DTG-60), sob fluxo contínuo de atmosfera inerte de nitrogênio a uma vazão de 50 ml/min. Para cada corrida do experimento, a composição da amostra foi variada de acordo com o estudo de experimentos fatoriais, sendo essas amostras misturas da casca de café e do lodo, variando em massa de 0, 25, 50, 75 e 100%. Ainda, os experimentos foram conduzidos a diferentes taxas de aquecimento, que foram elas: 10, 20, 30, 40 e 50 K/min, partindo da temperatura ambiente até 873 K. O equipamento registra a perda de massa, tempo e temperatura durante a reação de pirólise e, ao final emite um relatório com o acompanhamento dessas variáveis.

## 2.3 Efeito sinérgico entre as biomassas

Foram analisados o lodo da indústria de celulose e papel e a casca de café quanto aos efeitos sinérgicos que influenciam a volatilização da matéria orgânica durante o processo de co-pirólise. Para isso, foram comparados os resultados da perda de massa experimental (dados termogravimétricos das misturas das biomassas) e teórica (dados termogravimétricos das biomassas puras) de forma a se obter um valor que representa uma condição sinérgica positiva, negativa ou neutra. Para isso, aplicou-se a Equação 1, (MALLICK et al., 2018):

$$\Delta m = \Delta m_{exp} - (x_{LO} * \Delta m_{LO} + x_{CC} * \Delta m_{CC}) \quad (1)$$

onde:  $\Delta m$  é a condição de sinergia entre as biomassas;  $\Delta m_{exp}$  é a perda de massa experimental da mistura obtida por meio da análise termogravimétrica;  $x_{LO}$  e  $x_{CC}$  são as frações mássicas aplicadas a cada amostra de lodo e casca de café, respectivamente e;  $\Delta m_{LO}$  e  $\Delta m_{CC}$  são as perdas de massa do lodo e da casca de café puros, obtidas por meio da análise termogravimétrica, respectivamente.

## 2.4 Modelagem cinética

No estudo de cinética das reações de pirólise deste trabalho, foram utilizados os modelos cinéticos isoconvercionais. Para isso, a conversão ( $x$ ) primária da casca de café, lodo da indústria de celulose e papel e suas misturas foi definida pela Equação 2:

$$x = \frac{m_i - m}{m_i - m_f} \quad (2)$$

onde:  $m$  é a massa monitorada no instante; e  $m_i$  e  $m_f$  são as massas iniciais e finais da amostra, respectivamente.

A taxa de conversão nos modelos cinéticos isoconvercionais é definida pelo produto de duas funções dependentes, uma da temperatura e outra da conversão ( $x$ ), vide Equação 3 (STARINK, 1996):

$$\frac{dx}{dt} = k(T) * f(x) \quad (3)$$

na qual,  $k(T)$  é a constante da taxa de reação em relação a temperatura  $T$  no instante, descrita pela Equação de Arrhenius, vide Equação 4:

$$k(T) = k_0 * e^{-E_a/RT} \quad (4)$$

onde:  $k_0$  é a constante pré-exponencial ou fator de frequência;  $E_a$  é a energia de ativação;  $R$  é a constante universal dos gases; e  $T$  é a temperatura.

A degradação térmica da biomassa ocorre sob condições não-isotérmicas, ou seja, a temperatura aumenta linearmente partindo de uma temperatura inicial  $T_0$ , de acordo com a Equação 5, dada uma taxa de aquecimento (ver Equação 6):

$$T = T_0 + \beta t \quad (5)$$

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

Assim, ordenando as Equações 4 e 6, e substituindo em 3, tem-se a Equação 7:

$$\frac{dx}{f(x)} = \frac{k_0}{\beta} * e^{\frac{-E_a}{RT}} dT \quad (7)$$

Integrando a Equação 7, a partir da temperatura inicial  $T_0$  até a temperatura  $T$ , correspondentes à conversão ( $x=0$ ) e ( $x$ ), respectivamente, obtém-se a Equação 8:

$$g(x) = \int_0^x \frac{dx}{f(x)} = \frac{k_0}{\beta} \int_{T_0}^T e^{\frac{-E_a}{RT}} dT \quad (8)$$

Na Tabela 1 é apresentado o formato final das equações dos modelos utilizados. Os modelos se diferem pelo método de integração e aproximação, sendo todos derivados da Equação 8. Os modelos de Ozawa (OZAWA, 1965), Starink (STARINK, 1996) e Kissinger-Akahira-Sunose (K.A.S.) (AKAHIRA e SUNOSE, 1971) seguem as mesmas considerações físico-químicas e matemáticas. Já no modelo de Kissinger (KISSINGER, 1956) foi utilizada a técnica de integração por partes, que se baseia no deslocamento da temperatura de pico  $T_{máx.}$ , ou seja, a temperatura na qual obtém-se a maior taxa de conversão,  $\frac{dx}{dt}$ . A energia de ativação  $E_a$  é obtida por regressão linear simples a partir das Equações 9, 10, 11 e 12.

Para os modelos de Ozawa (OZAWA, 1965), Starink (STARINK, 1996) e Kissinger-Akahira-Sunose (K.A.S.) (AKAHIRA e SUNOSE, 1971), foram obtidas as regressões lineares simples de cada modelo de acordo com o acompanhamento da temperatura correspondente à conversão ( $x$ ) em intervalos de 5%. Já para o modelo de Kissinger (KISSINGER, 1956), foi obtida apenas uma regressão linear simples.

Tabela 1 - Equações correspondentes aos modelos isoconvercionais

Modelo	Equação
Ozawa	$\ln \beta = -1,052 * (E_a/RT) + \ln[(k_0 * E_a)/R] - \ln[g(x)] - 5,3305 \quad (9)$
Starink	$\ln(\beta/T_x^{1,8}) = -[1,007 - (1,2 * 10^{-5} * E_a)] * (E_a/RT) + C_2 \quad (10)$
K.A.S.	$\ln(\beta/T_x^2) = -(E_a/RT) + \ln[k_0 * R/E_a * g(x)] \quad (11)$
Kissinger	$\ln(\beta/T_{máx.}^2) = -(E_a/RT_{máx.}) + [\ln(k_0 * R/T) - \ln(g(x))] \quad (12)$

## 2.5 Estimação dos parâmetros termodinâmicos

Com os dados das análises termogravimétricas e os modelos cinéticos isoconvercionais, é possível obter, dentre outras informações, a energia de ativação e o fator de frequência,  $E_a$  e  $k_0$ . Com isso, a estimação dos parâmetros termodinâmicos torna-se viável. Os valores da entalpia ( $\Delta H$ ), energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) e entropia ( $\Delta S$ ) são dados pelas Equações 13, 14 e 15, respectivamente (MÜSELLIM et al., 2018).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (13)$$

$$\Delta G = E_a + RT_{m\acute{a}x.} * \ln \left[ \frac{k_b * T_{m\acute{a}x.}}{h * k_0} \right] \quad (14)$$

$$\Delta S = \frac{(\Delta H - \Delta G)}{T_{m\acute{a}x.}} \quad (15)$$

onde:  $T_{m\acute{a}x.}$  é a temperatura de pico;  $k_b$  é a constante de Boltzmann; e  $h$  representa a constante de Planck.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização dos resíduos

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise imediata para os resíduos sólidos de casca de café e lodo da indústria de celulose e papel. Além disso, são apresentados os resultados de análises imediata de resíduos semelhantes encontrados na literatura.

O teor de umidade de uma biomassa interfere negativamente em qualquer processo de conversão termoquímica de energia, uma vez que o poder calorífico é reduzido. Mckendry (2002) afirma que para os processos de conversão, quanto menor a quantidade de água melhor será o rendimento energético. Ainda, o autor afirma que biomassas com teores de umidade acima de 50% não são indicadas para conversão energética sem antes passar por um processo de adequação, ou seja, drenagem ou desidratação desse material. Neste trabalho, os teores de umidade encontrados para a casca de café e o lodo da indústria de celulose e papel foram de 11,33% e 60,63%, respectivamente.

Tabela 2 - Análise imediata para os resíduos de casca de café e lodo da indústria de celulose e papel; resultados deste trabalho e os encontrados na literatura

Biomassa	Umidade (%) <sup>*</sup>	Sólidos voláteis (%) <sup>**</sup>	Sólidos fixos (%) <sup>**</sup>	Referência
Casca de café	11,33	73,64	26,06	(LIMA, 2018)
	10	78,50	21,50	(SUAREZ et al., 2000)
	-	70,02	29,98	(Veiga, 2016)
	6,98	69,81	30,19	(CHEN et al., 2017)
Lodo da indústria de celulose e papel	60,63	67,24	32,76	Autor
	10,90	84,74	15,26	(BORGES et al., 2008)
	74,95	71	29	(VELUCHAMY e KALAMDHAD, 2017)
	9,70	66,10	33,90	(VAN GEEM, 2019)

<sup>\*</sup>base úmida, umidade considerada na fração percentual da amostra,  
<sup>\*\*</sup>base seca, umidade desconsiderada na fração percentual da amostra.

Segundo Mckendry (2002), os teores de sólidos voláteis e fixos representam a qualidade e o potencial de conversão energética de qualquer combustível que será submetido a qualquer processo de conversão, como critérios técnicos para a eficiência energética dos combustíveis. Sendo que os sólidos fixos prejudicam a transferência de calor no processo de conversão e formam depósitos nos equipamentos, e segundo Ahmad et al. (2017), os sólidos voláteis facilitam a ignição do combustível, e conseqüentemente o processo de pirólise. Os valores de sólidos voláteis e fixos dos resíduos de casca de café encontrados neste trabalho foram de 73,64% e 26,06%, respectivamente, que se aproximam dos encontrados na literatura (Tabela 2).

O mesmo não acontece para os valores de sólidos voláteis e fixos do lodo da indústria de celulose e papel encontrados neste trabalho, 67,64% 32,76%, respectivamente, quando comparados com os dados de Borges et al. (2008) (Tabela 2). Uma explicação para este fenômeno é que os resíduos de ETE's sofrem diferenciação na sua composição dependendo do processo ao qual se deu origem ao resíduo e o processo de tratamento subsequente (BRAILE e CAVALCANTI, 1993).

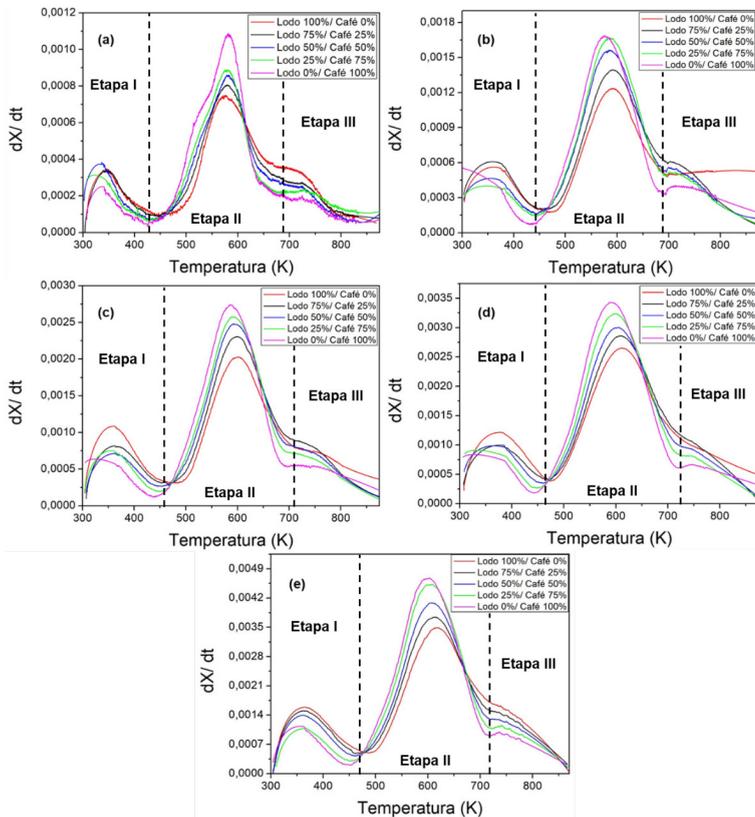
Desta forma, considera-se que a casca de café possui aplicação favorável no quesito aproveitamento energético, principalmente pelo baixo teor de umidade e o alto teor de sólidos voláteis encontrados, que estão de acordo com as análises dos parâmetros de qualidade de biomassas a serem destinadas para processos termoquímicos de conversão energética (MCKENDRY, 2002). Já o lodo da indústria de celulose e papel apresentou valores de umidade para os quais se torna

indispensável o emprego de tecnologias de desaguamento e secagem para aplicações desta biomassa em aproveitamento energético.

### 3.2 Cinética de degradação térmica

#### 3.2.1 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica possibilitou observar as características da degradação térmica, por meio das curvas DTG, das diferentes amostras nas diferentes taxas de aquecimento, vide Figura 1. São facilmente identificadas as três principais etapas da degradação de acordo com os três picos formados durante as reações de pirólise.



\*(a), (b), (c), (d) e (e) correspondem às taxas de aquecimento de 10 K/min, 20 K/min, 30 K/min, 40 K/min e 50 K/min, respectivamente

Figura 1 - Curvas DTG da casca de café e lodo da indústria de celulose e papel em diferentes taxas de aquecimento

A Tabela 3 apresenta os valores os quais estão relacionados com o início e final de cada etapa da reação de acordo com os principais picos de degradação térmica, obtidos a partir de uma média de cada amostra entre as diferentes taxas de aquecimento (Figura 1). Desta forma, podemos descrever a probabilidade de ocorrer a decomposição de cada elemento constituinte das biomassas, com base na faixa de atuação de cada etapa e o intervalo de degradação de cada componente. Xiao et al. (2020) analisaram o quanto que a taxa de aquecimento interfere no processo de pirólise e constataram que quanto maior a taxa de aquecimento, maiores são as temperaturas de pico alcançadas no processo e maiores as temperatura iniciais de volatilização da matéria; esse fenômeno foi chamado de histerese térmica. Isso explica o deslocamento das três etapas do processo de pirólise para maiores temperaturas, como visto na Tabela 3. A seguir, é feita a descrição de cada uma dessas etapas:

Tabela 3 - Faixas de temperatura das etapas de degradação para todas as taxas de aquecimento

Taxa de aquecimento ( $\beta$ ) (K/min)	Etapas					
	(I)		(II)		(iii)	
	Faixa (K)	Perda de massa (%)	Faixa (K)	Perda de massa (%)	Faixa (K)	Perda de massa (%)
10	Ambiente - 438	16	438 - 698	68	698 - Final	16
20	Ambiente - 449	18	449 - 694	62	694 - Final	20
30	Ambiente - 457	18	457 - 707	65	707 - Final	16
40	Ambiente - 459	20	459 - 724	66	724 - Final	14
50	Ambiente - 463	19	463 - 719	66	719 - Final	15

Etapa I – nota-se que à medida que se aumenta a taxa de aquecimento a tendência é aumentar a temperatura final desta primeira etapa. Portanto, esta fase ocorre na faixa da temperatura ambiente até 438 K para a menor taxa, e 463 para a maior.

De acordo com Sahoo et al. (2021), até a faixa de 450 K, ocorre a degradação térmica dos extrativos e desagregação dos componentes principais da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina), além de que há a liberação de umidade intra e extracelular. Nesta fase ocorre a chamada liberação de voláteis leves (TRANVAN et al., 2014). Kan et al. (2016) constataram que grande parte das biomassas, em especial as lignocelulósicas, são constituídas de extrativos, variando de 0 a 15% de sua massa dependendo do tipo e pré-tratamento. A perda de massa nesta etapa variou de 16 a 20%.

Um comportamento semelhante em todas as figuras é que as amostras compostas por maior percentual em massa de lodo da indús-

tria de celulose e papel possuem uma taxa de degradação térmica maior nesta etapa. Visto que, esta etapa é dominada pela liberação de voláteis leves, principalmente a umidade, e o lodo é mais úmido que a casca de café.

Etapa II – o início desta etapa está relacionado com o final da primeira e o intervalo de atuação é de 438 até 724 K, variando entre as taxas de aquecimento, com pico de degradação no intervalo de 500 a 650 K. De acordo com Tranvan et al. (2014), a faixa de degradação térmica da hemicelulose e celulose são 493 a 588 K e 588 a 673 K, com o pico máximo de 541 K e 628 K, respectivamente. Igualmente, Huang et al. (2018) afirmam que o intervalo da lignina é de 538 a 769 K. Portanto, nesta faixa de atuação da etapa II ocorre a decomposição total da hemicelulose e celulose contidas na biomassa, e parcial da lignina. Esta etapa pode ser chamada de zona ativa de pirólise (TRANVAN et al., 2014).

De acordo com Kan et al. (2016), em termos gerais, a biomassa lignocelulósica, além de extrativos, é composta por celulose (25 a 50% em massa), hemicelulose (15 a 40%) e lignina (10 a 40%), podendo variar de acordo com o tipo e as condições de crescimento das plantas. Nesta etapa, a perda de massa variou de 62 a 68% em massa, referente à degradação total ou parcial dos componentes.

Nesta etapa ocorre o inverso da etapa I, e as amostras com maiores percentuais em massa de casca de café possuem o pico de degradação mais elevado. Isto se deve principalmente ao fator de composição da biomassa, mais precisamente pela quantidade de celulose contida, pois ela é a maior responsável pela elevação da taxa de degradação térmica nesta etapa. E ao final desta etapa, ocorre a diminuição gradativa da taxa de degradação; consequência disso é a diminuição da celulose, hemicelulose e lignina disponíveis na reação (MCKENDRY, 2002). Pode ser visto que nesta etapa há o maior percentual médio de perda de massa (Tabela 3).

Etapa III - nesta fase do processo se dá a finalização da pirólise, em que a degradação ocorre principalmente sobre a lignina remanescente das biomassas, de acordo com a faixa de degradação estimada por Huang et al. (2018). Esta etapa pode ser chamada de zona passiva de pirólise, tendo em vista que a matéria inicial se volatilizou ou se converteu em carvão na etapa anterior (TRANVAN et al., 2014). Isso justifica as baixas perdas de massa nesta etapa. Graficamente, na Figura 1, obteve-se ombros discretos que caracterizam a terceira etapa da pirólise, e em seguida uma diminuição da taxa de degradação térmica das biomassas até o final do processo.

### 3.2.2 Efeito sinérgico entre as biomassas

Assim como em Pimentel (2019) e Lopes (2020), foi investigada

a interação entre a casca de café e o lodo da indústria de celulose e papel em relação à produção de voláteis. Portanto, foram relacionadas as perdas de massa teóricas com as calculadas das misturas a partir das substâncias puras. Com isso, pode-se descobrir se as interações entre as biomassas são favorecidas ou desfavorecidas de acordo com a produção de voláteis e suas diferentes combinações. A Tabela 4 apresenta os valores referentes a esta relação das curvas teóricas e calculadas para cada amostra nas diferentes taxas de aquecimento.

Tabela 4 - Efeito sinérgico entre as biomassas para produção de voláteis

Amostra	$\Delta m$				
	10 (K/min)	20 (K/min)	30 (K/min)	40 (K/min)	50 (K/min)
LO25CC75	-0,0151325	0,0647675	0,01331	0,009265	-0,0002625
LO50CC50	-0,013995	0,048375	0,01982	-0,00262	0,000725
LO75CC25	0,0102525	0,0577125	0,0147	0,011975	0,0021225

Não foi possível identificar um padrão definido do comportamento sinérgico entre as biomassas considerando apenas o percentual de mistura de cada amostra e as taxas de aquecimento. Porém, observa-se que para a amostra LO75CC25 houve uma interação sinérgica positiva para todas as taxas de aquecimento.

De acordo com Wang et al. (2012), os valores de  $\Delta m$  inferiores a zero representam uma condição sinérgica negativa e, maiores que zero, sinérgica positiva. Com isso, observa-se que para a taxa de aquecimento de 10 K/min com a adição de 75% de casca de café no lodo da indústria de celulose e papel houve a maior interação sinérgica negativa. Em contrapartida, a combinação que apresentou a maior interação sinérgica positiva foi para a taxa de aquecimento de 20 K/min na amostra LO25CC75. Isso significa que para a taxa de aquecimento de 20 K/min, a combinação de 75% de casca de café e 25% de lodo da indústria de celulose e papel proporcionou uma maior volatilização dos componentes, em comparação com a pirólise das substâncias puras.

### 3.2.3 Modelos cinéticos isoconversionais

A partir dos dados termogravimétricos da casca de café e do lodo da indústria de celulose e papel, foi possível a estimação dos parâmetros cinéticos das reações de pirólise das amostras puras e suas misturas, de acordo com os modelos cinéticos isoconversionais exibidos na Tabela 1 (OZAWA, 1965; STARINK, 1996; AKAHIRA e SUNOSE, 1971; KISSINGER, 1956). Os resultados das energias de ativação estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 - Energias de ativação da pirólise de todas as amostras calculadas pelos modelos cinéticos Ozawa, Starink e K.A.S.

Amostra	Conversão (x)(%)	Modelos cinéticos isoconvercionais					
		Ozawa		Starink		K.A.S.	
		$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
LO0CC100	0,30	158,54	0,89	157,55	0,88	157,75	0,88
	0,35	155,39	0,90	154,08	0,89	154,24	0,89
	0,40	161,64	0,92	160,43	0,91	160,61	0,91
	0,45	163,01	0,96	161,71	0,96	161,88	0,95
	0,50	159,59	0,98	157,99	0,98	158,12	0,98
	0,55	156,58	0,99	154,74	0,99	154,83	0,99
	0,60	153,76	0,99	151,67	0,99	151,73	0,99
	0,65	155,60	0,99	153,48	0,99	153,54	0,99
	0,70	160,73	0,99	158,72	0,99	158,80	0,99
	0,75	166,21	0,87	164,26	0,86	164,36	0,86
	$E_{am}$	159,11		157,46		157,59	
LO25CC75	0,30	131,54	0,86	129,31	0,85	129,31	0,85
	0,35	143,07	0,91	141,16	0,90	141,21	0,90
	0,40	146,63	0,93	144,69	0,92	144,76	0,92
	0,45	149,91	0,94	147,97	0,93	148,03	0,93
	0,50	155,34	0,96	153,49	0,96	153,58	0,96
	0,55	159,23	0,97	157,42	0,97	157,52	0,97
	0,60	165,57	0,97	163,91	0,97	164,05	0,97
	0,65	186,56	0,97	185,69	0,97	185,96	0,97
		$E_{am}$	154,73		152,95		153,05
LO50CC50	0,30	128,70	0,91	126,43	0,90	124,42	0,90
	0,35	135,97	0,96	133,79	0,95	133,81	0,95
	0,40	140,32	0,98	138,15	0,98	138,17	0,98
	0,45	145,68	0,98	143,57	0,98	143,61	0,98
	0,50	147,13	0,99	144,93	0,99	144,96	0,99
	0,55	147,25	0,99	144,91	0,99	144,92	0,99
	0,60	151,41	1,00	149,11	0,99	149,13	0,99
	0,65	157,90	0,99	155,74	0,99	155,79	0,99
		$E_{am}$	144,30		142,08		142,10
LO75CC25	0,35	148,99	0,90	147,33	0,88	147,43	0,88
	0,40	156,18	0,94	154,65	0,94	154,78	0,94
	0,45	155,69	0,95	153,96	0,95	154,07	0,95
	0,50	160,91	0,97	159,25	0,96	159,38	0,96
	0,55	163,22	0,98	161,51	0,98	161,63	0,98
	0,60	168,68	0,99	167,04	0,99	167,18	0,99
	0,65	184,52	0,99	183,40	0,99	183,63	0,99
	0,70	200,62	0,99	199,98	0,99	200,30	0,99
		$E_{am}$	167,35		165,89		166,05

Tabela 5 - Energias de ativação da pirólise de todas as amostras calculadas pelos modelos cinéticos Ozawa, Starink e K.A.S. (cont.)

Amostra	Conversão (x)(%)	Modelos cinéticos isoconvercionais					
		Ozawa		Starink		K.A.S.	
		$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
LO100CC0	0,35	209,29	0,75	210,29	0,73	210,82	0,73
	0,40	205,36	0,83	205,99	0,82	206,48	0,80
	0,45	205,04	0,81	205,48	0,80	205,95	0,80
	0,50	195,87	0,76	195,73	0,75	196,10	0,75
	0,55	176,41	0,70	175,22	0,68	175,43	0,68
	0,60	157,73	0,59	155,51	0,56	155,56	0,56
	$E_{am}$	191,62		191,37		191,72	

De acordo com Xavier (2016), Ma et al. (2019) e Nardella et al. (2020), as retas obtidas por regressão linear simples a partir da aplicação dos modelos cinéticos isoconversionais, com condição de paralelismo entre si, representam uma similaridade no comportamento cinético. As retas que não apresentam essa condição de paralelismo não são consideradas no estudo cinético, pois, estão associadas a um processo físico e não químico de degradação térmica, visto que os modelos cinéticos isoconversionais consideram somente as equações de primeira ordem (BRIDGEWATER, 2004; CHEN et al., 2013). Com isso, considera-se a faixa de conversão na qual é possível observar essa condição de paralelismo entre as retas para a estimação das energias de ativação ( $E_a$ ), com exceção do modelo de Kissinger, no qual se obtém apenas uma reta baseada na temperatura de pico da reação.

Foi observada essa condição de paralelismo para as diferentes amostras testadas, nas seguintes faixas de conversão de: 30 a 75% para a amostra LO0CC100; 30 a 65% para a amostra LO25CC75; 30 a 65% para a amostra LO50CC50; 35 a 70% para a amostra LO75CC25; e 35 a 60% para a amostra LO100CC0. Portanto, a faixa de conversão que apresentou essa condição de paralelismo está apresentada na Tabela 5, com os respectivos valores de ( $E_a$ ) e coeficientes de correlação, além da energia de ativação média, calculados a partir dos modelos cinéticos isoconvercionais de Ozawa, Starink e K.A.S, de todas as amostras.

Na Tabela 5 pode-se observar que os coeficientes de correlação dos modelos cinéticos isoconvercioais de Ozawa, Starink e K.A.S. foram aceitáveis para as amostras LO0CC100, LO25CC75, LO50CC50, LO75CC25, apresentando  $R^2$  superiores a 0,85, indicando alto grau de correlação linear entre as variáveis. Ou seja, tais modelos foram adequados para descrever o comportamento cinético das reações de pirólise. Já para a amostra LO100CC0, os coeficientes de cor-

relação indicam que os modelos adotados possuem uma correlação linear moderada entre as variáveis, indicando que a modelagem cinética linear para esta amostra não é totalmente descritiva. Igualmente, na Tabela 6 são apresentados os valores da energia de ativação e seus coeficientes de correlação para as diferentes amostras, calculados a partir do modelo cinético isoconvercional de Kissinger.

Para as mesmas amostras os modelos cinéticos estimaram valores de ( $E_a$ ) próximos ou similares. Enquanto que entre as amostras houve uma variação das ( $E_a$ ), e isso está relacionado à composição das amostras (SAHOO et al., 2021). Um comportamento que foi possível observar na Tabela 5 é que a energia de ativação diminuiu à medida que se aumentou a fração de lodo da indústria de celulose e papel até 50% em relação à casca de café, até atingir um ponto mínimo de ( $E_a$ ). Porém, nas amostras com fração de lodo superior a 50% a energia de ativação aumentou até seu ponto máximo de cerca de 191 kJ/mol.

Ainda, da mesma forma como os componentes da biomassa lignocelulósica possuem suas respectivas faixas de degradação térmica, pode-se observar faixas para energia de ativação entre eles. De acordo com, Vamvuka et al. (2003) e Chen et al. (2013), a celulose, hemicelulose e lignina apresentam faixa de energia de ativação de 145 a 285, 90 a 125 e 30 a 39 kJ/mol, respectivamente.

Tabela 6 - Energias de ativação das amostras calculadas pelo modelo cinético de Kissinger

Amostra	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
LO0CC100	89,52	0,98
LO25CC75	150,39	0,87
LO50CC50	151,53	0,98
LO75CC25	114,62	0,99
LO100CC0	94,63	0,99

Segundo Riegel et al. (2008), de forma geral, as biomassas lignocelulósicas assumem uma faixa de ( $E_a$ ) de 150 a 200 kJ/mol. Comparado aos resultados obtidos neste trabalho, as amostras LO0CC100, LO25CC75 e LO50CC50 estão próximas ao limite inferior, e para as amostras LO75CC25 e LO100CC0 foram obtidos ( $E_a$ ) de cerca de 166 e 191 kJ/mol.

### 3.3 Parâmetros termodinâmicos

Segundo Wang et al. (2019), os parâmetros termodinâmicos são funções de estado que indicam o comportamento da transição do calor e a mudança de energia do sistema durante uma reação, seja ela

a absorção ou liberação, de acordo com a conversão de uma matéria. A Tabela 7 apresenta os valores dos parâmetros termodinâmicos calculados a partir das energias de ativação média ( $E_{am}$ ), e os fatores de frequência  $k_0$  calculados pelos modelos cinéticos isoconvercionais.

Todos os valores de ( $\Delta H$ ) encontrados foram positivos, indicando que a reação absorve o calor fornecido (WANG et al., 2019). Para os modelos de Ozawa, Starink e (K.A.S.), é possível observar que a amostra LO50CC50 absorve a menor quantidade de calor na reação de pirólise, enquanto essa afirmação não se torna verdadeira para o modelo de Kissinger.

Para os valores de ( $\Delta G$ ) encontrados, todos foram positivos, indicando uma reação não espontânea que precisa do fornecimento de energia para que ocorra (WANG et al., 2019). Para todas as amostras em todos os modelos cinéticos houve um sutil aumento da energia livre de Gibbs à medida que se aumentou a fração de lodo na mistura, variando sempre na faixa de 145 a 151 kJ/mol. Destaca-se que ( $\Delta G$ ) para o lodo da indústria de celulose e papel puro é maior que para a casca de café pura.

Tabela 7 - Estimativa dos parâmetros termodinâmicos de todas as amostras pelos diferentes modelos cinéticos

		Amostra					
		LO0CC100	LO25CC75	LO50CC50	LO75CC25	LO100CC0	
Modelos cinéticos isoconvercionais	Ozawa	$\Delta H$ (kJ/mol)	153,45	146,08	139,35	162,36	186,60
		$\Delta G$ (kJ/mol)	145,46	145,74	147,28	147,93	148,04
		$\Delta S$ (kJ/mol)	0,0136	0,0006	-0,0133	0,0240	0,0639
	Starink	$\Delta H$ (kJ/mol)	151,86	144,23	137,13	160,90	186,35
		$\Delta G$ (kJ/mol)	145,50	145,80	147,36	147,97	148,05
		$\Delta S$ (kJ/mol)	0,0108	-0,0027	-0,0172	0,0215	0,0635
	K.A.S.	$\Delta H$ (kJ/mol)	151,98	144,31	137,16	161,06	186,71
		$\Delta G$ (kJ/mol)	145,50	145,79	147,36	147,96	148,04
		$\Delta S$ (kJ/mol)	0,0110	-0,0025	-0,0172	0,0218	0,0641
Kissinger	$\Delta H$ (kJ/mol)	126,16	145,48	146,58	109,63	89,62	
	$\Delta G$ (kJ/mol)	146,38	145,75	147,04	149,81	151,58	
	$\Delta S$ (kJ/mol)	-0,0343	-0,0005	-0,0008	-0,0670	-0,1027	

A variação de entropia mensura o grau de desordem ou aleatoriedade das reações (WANG et al., 2019). Para o modelo cinético de Kissinger, foram encontrados todos os valores de ( $\Delta S$ ) negativos, já para os modelos de Ozawa, Starink e (K.A.S.) não foi possível identificar um padrão de comportamento para este parâmetro termodinâmico, porém para a amostra LO50CC50, em todos os modelos, foram encon-

trados valores de ( $\Delta S$ ) negativos. Apesar disso, todos os valores absolutos encontrados para ( $\Delta S$ ) foram muito pequenos, não apresentando significativos grau de desordem das reações tanto para mais quanto para menos, podendo afirmar que as reações estão próximas do seu equilíbrio.

#### 4. CONCLUSÕES

As análises imediatas das biomassas possibilitaram a identificação das frações de umidade e sólidos voláteis e fixos, em que ambas apresentaram resultados desejáveis na destinação para fins energéticos, de acordo com a literatura.

A casca de café apresentou alto teor de voláteis e baixa umidade, que são favoráveis para o processo. O lodo, igualmente, apresentou alto teor de voláteis, mas em contrapartida apresentou alto teor de umidade. Porém, qualquer tipo de lodo apresenta teores de umidade elevados tendo em vista que este resíduo está associado ao tratamento de águas e efluentes, mas é comum o emprego de tecnologias de desaguamento e secagem a montante dos processos de aproveitamento energético. Apesar disso, o lodo é altamente indicado para processos termoquímicos de conversão energética, considerando o contraponto entre os benefícios gerados por esta e os possíveis danos ao meio ambiente proporcionados pela destinação final de resíduos desta natureza em aterros sanitários.

As análises termogravimétricas viabilizaram a compreensão do comportamento das reações de pirólise das substâncias puras de lodo e casca de café e suas respectivas misturas. Desta forma, foi possível identificar três diferentes etapas no processo de degradação térmica, sendo elas: perda de umidade e extrativos (até ~450 K); celulose, hemicelulose e parte da lignina (~450 a 710 K) e; lignina remanescente (~710 a 800 K).

A interação entre as biomassas também foi investigada por meio das análises termogravimétricas das substâncias puras e suas misturas. A maioria das misturas nas diferentes taxas de aquecimento apresentou um efeito de interação sinérgico positivo, com destaque para a amostra LO75CC25.

Por fim, tendo em vista que a geração desses resíduos é crescente e a importância de se estudar uma destinação final viável para reduzir os possíveis impactos à sociedade e ao meio ambiente, este estudo concluiu que, a pirólise das substâncias puras e suas misturas é aconselhável e vantajosa com base nas premissas da gestão de resíduos sólidos, sendo que a adição de lodo da indústria de celulose e papel na casca de café ocorreu na diminuição da energia exigida para reação. Desta forma, a amostra que obteve os melhores resultados foi a LO50CC50, com menores valores de  $E_a$  e  $\Delta H$ , indicando

um menor gasto com fornecimento de energia. E para a taxa de aquecimento de 20 K/min obteve-se a terceira maior interação sinérgica positiva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M. S.; MEHMOOD, M. A.; ALAYED, O. S.; YE, G.; LUO, H.; IBRAHIM, M.; RASHID, U.; NEHDI, I. A.; & QADIR, G. (2017). Kinetic analyses and pyrolytic behavior of Para grass (*Urochloa mutica*) for its bioenergy potential. *Bioresource technology*, 224, 708-713. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.090>

AKAHIRA, T.; SUNOSE, T. (1971). Joint convention of four electrical institutes. Report Chiba Institute and Technology, 16, 22-31.

ANDREOLI, C. V. (2006). Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: ABES.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2005). BBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT.

BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W (ED.). (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23a ed.). American Water Works Association.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. (2008). Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. *Ciência & Engenharia*, 17(1-2), 27-32.

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. (1993). Manual de tratamento de águas residuárias industriais. São Paulo: Cetesb.

BRIDGEWATER, A. V. (2004). Biomass fast pyrolysis. *Thermal science*, 8(2), 21-50. <https://doi.org/10.2298/TSCI0402021B>

CEYLAN, S.; TOPÇU, Y. (2014). Pyrolysis kinetics of hazelnut husk using thermogravimetric analysis. *Bioresource technology*, 156, 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.040>

CHANDRASEKARAN, A.; RAMACHANDRAN, S.; SUBBIAH, S. (2017). Determination of kinetic parameters in the pyrolysis operation and thermal behavior of *Prosopis juliflora* using thermogravimetric analysis. *Bioresource technology*, 233, 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.119>

CHEN, D.; ZHENG, Y.; ZHU, X. (2013). In-depth investigation on the pyrolysis kinetics of raw biomass, Part I: Kinetic analysis for the drying and devolatilization stages. *Bioresource Technology*, 131, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.136>

CHEN, N.; REN, J.; YE, Z.; XU, Q.; LIU, J.; SUN, S. (2017). Study on vacuum pyrolysis of coffee industrial residue for bio-oil production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 59, 1-7. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/59/1/012065/meta>

CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A. V. (2004). Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. Energy & fuels, 18(2), 590-598. <https://doi.org/10.1021/ef034067u>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. (2020). Balanço Energético Nacional: ano base 2019. Recuperado de: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/balanco-energetico-nacional-2020-ano-base-2019>.

EMBRAPA. Seis maiores estados produtores dos cafés do Brasil atingiram 98% do volume da safra de 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/31081641/seis-maiores-estados-produtores-dos-cafes-do-brasil-atingiram-98-do-volume-da-safra-de-2017>. Acesso em 22 de Março de 2023

FERRÃO, R.; FONSECA, A. D.; FERRÃO, M.; DE MUNER, L. H. (2017). Café Conilon: atualizada e ampliada. Vitória: Incaper.

FONTS, I.; AZUARA, M.; GEA, G.; MURILLO, M. B. (2009). Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 85(1-2), 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.003>

HU, M.; WANG, X.; CHEN, J.; YANG, P.; LIU, C.; XIAO, B.; GUO, D. (2017). Kinetic study and syngas production from pyrolysis of forestry waste. Energy conversion and management, 135, 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.086>

HUANG, Y. F.; CHIUEH, P. T.; LO, S. L. (2016). A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. Sustainable Environment Research, 26(3), 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.04.012>

HUANG, Y.; LIU, H.; YUAN, H. (2018) Hmill of lignins from crop straw and softwood. Journal of analytical and applied pyrolysis, 134, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.04.008>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2020). Key World Energy Statistics 2019. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>.

JAMALI, M. K.; KAZI, T. G.; ARAIN, M. B.; AFRIDI, H. I.; JALBANI, N.; MEMON, A. R. (2007). Heavy metal contents of vegetables grown in soil, irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Pakistan, using ultrasonic-assisted pseudo-digestion. Journal of Agronomy and Crop Science, 193(3), 218-228. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2007.00261.x>

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126-1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>

KISSINGER, H. E. (1956). Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 57(4), 217-221.

LEWANDROWSKI, J.; ROSENFELD, J.; PAPE, D.; HENDRICKSON, T.; JAGLO, K.; MOFFROID, K. (2020). The greenhouse gas benefits of corn ethanol—assessing recent evidence. *Biofuels*, 11(3), 361-375. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1546488>

LI, H.; LI, J.; FAN, X.; LI, X.; GAO, X. (2019). Insights into the synergistic effect for co-pyrolysis of oil sands and biomass using microwave irradiation. *Fuel*, 239, 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.139>

LIMA, M. D. J. (2018). Determinação da cinética de reação e condições operacionais da pirólise da casca de café em leito fixo. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, Brasil.

LOPES, P. Z. S. (2020). Co-combustão de polietileno e casca de coco: avaliação cinética e termodinâmica. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, Brasil.

MA, J.; LUO, H.; LI, Y.; LIU, Z.; LI, D.; GAI, C.; JIAO, W. (2019). Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of the hydrochars derived from co-hydrothermal carbonization of sawdust and sewage sludge using thermogravimetric analysis. *Bioresource technology*, 282, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.007>

MALLICK, D.;PODDAR, M. K.; MAHANTA, P.; MOHOLKAR, V. S. (2018). Discernment of synergism in pyrolysis of biomass blends using thermogravimetric analysis. *Bioresource technology*, 261, 294-305. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.011>

MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. (2012). Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2566-2582. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.074>

MCKENDRY, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, 83(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)

MURTHY, P. S.; NAIDU, M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>ERR

MÜSELLIM, E.; TAHIR, M. H.; AHMAD, M. S.; CEYLAN, S. (2018). Thermokinetic and TG/DSC-FTIR study of pea waste biomass pyrolysis. *Applied Thermal Engineering*, 137, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.050>

NARDELLA, F.; MATTONAI, M.; RIBECHINI, E. (2020). Evolved gas analysis-mass spectrometry and isoconversional methods for the estimation of component-specific kinetic data in wood pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 145, 104725. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104725>

ONG, H. C.; CHEN, W. H.; SINGH, Y.; GAN, Y. Y.; CHEN, C. Y.; SHOW, P. L. (2020). A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. *Energy Conversion and Management*, 209, 112634. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112634>

OPIA, A. C.; HAMID, M. K. B. A.; SYAHRULLAIL, S.; ABD RAHIM, A. B.; JOHNSON, C. A. (2020). Biomass as a potential source of sustainable fuel, chemical and tribological materials—Overview. *Materials Today: Proceedings*, 39(2), 922-928. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.045>

OZAWA, T. (1965). A new method of analyzing thermogravimetric data. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 38(11), 1881-1886. <https://doi.org/10.1246/bcsj.38.1881>

PIMENTEL, F. S. (2019). Co-pirólise de casca de café e polietileno de baixa densidade. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, Brasil.

QUAN, C.; GAO, N. (2016). Copyrolysis of biomass and coal: a review of effects of copyrolysis parameters, product properties, and synergistic mechanisms. *BioMed research international*, 2016, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2016/6197867>

RIEGEL, I.; MOURA, A. B.; MORISSO, F. D. P.; MELLO, F. D. S. (2008). Thermogravimetric analysis of the pyrolysis of *Acacia mearnsii* de Wild. harvested in Rio Grande do Sul, Brazil. *Revista Árvore*, 32(3), 533-543. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000300014>

SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; WERTHER, J.; OGADA, T.; SIAGI, Z. (2001). Combustion of coffee husks. *Renewable Energy*, 23(1), 103-121. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00106-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00106-3)

SAHOO, A.; KUMAR, S.; KUMAR, J.; BHASKAR, T. (2021). A detailed assessment of pyrolysis kinetics of invasive lignocellulosic biomasses (*Prosopis juliflora* and *Lantana camara*) by thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 319, 124060. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124060>

STARINK, M. J. (1996). A new method for the derivation of activation energies from experiments performed at constant heating rate. *Thermochimica Acta*, 288, 97-104. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(96\)03053-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(96)03053-5)

SUAREZ, J. A.; LUENGO, C. A.; FELFLI, F. F.; BEZZON, G.; BEATÓN, P. A. (2000). Thermochemical properties of Cuban biomass. *Energy Sources*, 22(10), 851-857. <https://doi.org/10.1080/00908310051128156>

TURNER, T.; WHEELER, R.; OLIVER, I. W. (2022). Evaluating land application of pulp and paper mill sludge: A review. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115439>

TRANVAN, L.; LEGRAND, V.; JACQUEMIN, F. (2014). Thermal decomposition kinetics of balsa wood: Kinetics and degradation mechanisms comparison between dry and moisturized materials. *Polymer degradation and stability*, 110, 208-215. <https://doi.org/10.1016/j.polym-degradstab.2014.09.004>

UZOEJINWA, B. B.; HE, X.; WANG, S.; ABOMOHRRA, A. E. F.; HU, Y.; WANG, Q. (2018). Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. *Energy conversion and management*, 163, 468-492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>

VAMVUKA, D.; KAKARAS, E.; KASTANAKI, E.; GRAMMELIS, P. (2003). Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite. *Fuel*, 82(15-17), 1949-1960. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00153-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00153-4)

VAN GEEM, K. (2019). *Mathematical Modelling of Gas-Phase Complex Reaction Systems: Pyrolysis and Combustion* (Cap. 6, pp. 295-362). Amsterdam: Elsevier.

VEIGA, T. R. L. A. (2016). Síntese e caracterização de biocarvões de biomassa de casca de café e de madeira de eucalipto. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.

VELUCHAMY, C.; KALAMDHAD, A. S. (2017). Enhancement of hydrolysis of lignocellulose waste pulp and paper mill sludge through different heating processes on thermal pretreatment. *Journal of Cleaner Production*, 168, 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.040>

WANG, C.; WANG, X.; JIANG, X.; LI, F., LEI, Y.; LIN, Q. (2019). The thermal behavior and kinetics of co-combustion between sewage sludge and wheat straw. *Fuel Processing Technology*, 189, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.02.024>

WANG, L.; HUSTAD, J. E.; SKREIBERG, Ø.; SKJEVRAK, G.; GRØNLI, M. (2012). A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications. *Energy Procedia*, 20, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.004>

WANG, S.; WEN, Y.; HAMMARSTRÖM, H.; JÖNSSON, P. G.; YANG, W. (2021). Pyrolysis behaviour, kinetics and thermodynamic data of hydrothermal carbonization–Treated pulp and paper mill sludge. *Renewable Energy*, 177, 1282-1292. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.027>

XAVIER, T. P. (2016). Contribuições para a pirólise da casca de macadâmia em leito de jorro cônico. (Tese de doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

XIAO, R.; YANG, W.; CONG, X.; DONG, K.; XU, J.; WANG, D.; YANG, X. (2020). Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis. *Energy*, 201, 117537. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117537>

ZHANG, J.; JIN, J.; WANG, M.; NAIDU, R.; LIU, Y.; MAN, Y. B.; LIANG, X.; WONG, M. H.; CHIRISTIE, P.; ZHANG, Y.; SONG, C.; SHAN, S. (2020). Co-pyrolysis of sewage sludge and rice husk/bamboo sawdust for biochar with high aromaticity and low metal mobility. *Environmental Research*, 191, 110034. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110034>

ZHANG, Z.; BEI, H.; LI, H.; LI, X.; GAO, X. (2017). Understanding the co-pyrolysis behavior of indonesian oil sands and corn straw. *Energy & Fuels*, 31(3), 2538-2547. <https://doi.org/10.1021/acs.energy-fuels.6b02863>

## **BARREIRAS PARA ADOÇÃO DE SISTEMAS FV EM CONDOMÍNIOS RESIDENCIAIS: VOZES DE ESPECIALISTAS DO PLANALTO CENTRAL DO BRASIL**

Cláudio Albuquerque Frate<sup>1</sup>  
Paulo Cesar Marques de Carvalho<sup>1</sup>  
Rafael Amaral Shayani<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Universidade de Brasília*

DOI: 10.47168/rbe.v29i2.743

### **RESUMO**

Instalar painéis fotovoltaicos (FV) em telhados é cada vez mais barato, confiável, seguro e bem aceito nas cidades. O Brasil, desde o estabelecimento do mecanismo de compensação de energia em 2012, tem superado as previsões de expansão de sistemas FV em telhados. Entretanto, se observa que mesmo com o suporte do mecanismo de compensação, a expansão ocorre de forma desproporcional entre as diferentes modalidades de geração distribuída. Tal desproporcionalidade tende a se perpetuar, uma vez que não são claras as barreiras e as racionalidades que balizam os potenciais adotantes durante seus processos decisórios. Neste contexto, o objetivo da presente pesquisa é identificar tais barreiras e racionalidades a partir das vozes de diferentes especialistas envolvidos na difusão da tecnologia FV em condomínios residenciais verticais de Brasília. Foram identificadas e avaliadas a relevância de diversas barreiras de diferentes naturezas a partir de uma revisão bibliográfica, de entrevistas e da aplicação de instrumento quali-quantitativo de pesquisa. A presente pesquisa mostra que algumas barreiras e facilitadores vistos em grandes e importantes cidades do mundo também se encontram em Brasília. Conclui-se que os condomínios residenciais têm como barreiras: a crise política-financeira, os aumentos de custos de equipamentos solares e a alta taxa de ocupação por inquilinos em condomínios residenciais. Contudo, se a alta taxa de ocupação por inquilinos representa uma barreira para adoção, a presença de telhados FV em condomínios representa um diferencial para locação de apartamentos. Pode-se também afirmar que, durante o processo de adoção, o argumento de redução do valor da conta de condomínio supera em convencimento os argumentos de cunho ambientais-climáticos.

Palavras-chave: Renováveis; Fotovoltaica; Processo de adoção; Condomínios; Brasil.

## ABSTRACT

Installing photovoltaic (PV) panels on rooftops is increasingly cheap, reliable, safe and well accepted in cities. Brazil, since the establishment of the energy compensation mechanism in 2012, has exceeded forecasts for the expansion of PV systems on rooftops. However, it is observed that even with the support of the compensation mechanism, the expansion occurs disproportionately among the different modalities of distributed generation. Such disproportionality tends to perpetuate itself, since the barriers and rationalities that guide potential adopters during their decision-making processes are not clear. In this context, the objective of this research is to identify such barriers and rationalities by means of the voices of different specialists involved in the diffusion of PV technology in vertical residential condominiums of Brasília. The relevance of several barriers with different natures were identified and evaluated through bibliographic review, interviews and the application of a qualitative-quantitative research instrument. The present research shows that some barriers and facilitators seen in large and important cities of the world are also found in Brasília. It is concluded that residential condominiums have as main barriers: the political-financial crisis, the cost increases of solar equipment and the high occupancy rate by tenants in residential condominiums. However, if the high occupancy rate by tenants represents a barrier to adoption, the presence of PV roofs in condominiums represents a differential for apartment rentals. It can also be stated that, during the adoption process, the argument of reducing the value of the condominium bill outweighs in convincing the environmental-climatic arguments.

Keywords: Renewables; Photovoltaics; Decision-making process; Condominiums; Brazil.

## 1. INTRODUÇÃO

O sucesso do combate às mudanças climáticas por meio de tecnologias de conversão de energia baseadas em recursos energéticos renováveis depende de variáveis econômicas, técnicas, regulatórias, sociais e de mercado. O conhecimento das relações entre tais variáveis e cada tecnologia de conversão de energia é fundamental para a formulação de políticas e estratégias orientadas a facilitar a adoção. Diversos cientistas têm apontado a necessidade de mudar o paradigma técnico-organizacional do setor elétrico: Del Rio e Unruh (2007) atestaram que estruturas físicas e institucionais podem criar constrangimentos para a adoção de novas tecnologias. Wustenhagen et al. (2007) observaram que empresas tradicionais de geração de eletricidade usam seus poderes políticos para constranger a entrada de novas empresas

no mercado. Wolsink (2013) identificou uma forte resistência governamental para mudar normas regulatórias que restringem as oportunidades de acesso à rede. Garlet et al. (2019) constataram que a maior preocupação de potenciais adotantes de sistemas fotovoltaicos (FV) é sua durabilidade e qualidade, uma vez que estão sujeitos à degradação e perda de eficiência. Franzen e Vogt (2013) apontaram o ceticismo de líderes políticos com relação às mudanças climáticas como um fator que pode reduzir fortemente a inclinação de consumidores para adoção de tecnologias baseadas em energia renovável.

Karakaya e Sriwannawit (2015) afirmaram que a complexidade das relações entre as pessoas e os sistemas FV podem restringer a adoção. Drury et al. (2012) mostraram que potenciais adotantes relutam em adotar sistemas baseados em energia renovável devido aos seus riscos e complexidades, mas que essa relutância se reduz quando a posse do sistema é compartilhada com terceiros. FleiB et al. (2017), examinando as motivações para participação em iniciativas de comunidades FV, encontraram que aspectos ambientais consistem um benefício secundário e que a maximização do ganho financeiro pessoal é o fator mais relevante no processo de compra e decisão. Nesse sentido, Rai e Sigrin (2013) afirmaram que desvendar o processo pessoal de adoção pode prover *insights* sobre a lógica embutida nos processos individuais de decisão. Hagen (2016) por sua vez afirmou que governos e reguladores desenham mercados socialmente aceitáveis, mais por meio de tentativas e erros do que por meio de uma teoria ou estratégia bem estabelecida.

Alguns autores têm estudado metodologicamente em quais contextos econômico, de mercado e político, consumidores tendem a adotar telhados solares no meio urbano (BYRNE et al. 2017; ALHAMMAMI e AN, 2021; OLIVELLA et al., 2021; BYRNE et al., 2016; MAH et al., 2018). Byrne et al. (2017) mostraram que políticas públicas e instrumentos financeiros bem formulados, combinados com estratégias de desenvolvimento desenhadas para escala de cidades, apresentam forte poder transformador. Alhammami e An (2021) apontaram que, mesmo com a existência de políticas públicas para promover telhados FV em Abu Dhabi, a forma dessas políticas na realidade atrasa a difusão tecnológica devido a tarifas inapropriadas e políticas mal desenhadas. Olivella et al. (2021), considerando as recentes mudanças regulatórias que fizeram a política pioneira de incentivo *feed-in-tariff* inviável, investigaram como diferentes alterações nas regulamentações impactaram a economia e o grau de autarquia de sistemas residenciais FV com baterias em Londres. Mah et al. (2018) apontaram que existem importantes tendências com relação às mudanças regulatórias, formação de mercados e forma de suporte técnico.

O Brasil, especificamente, tem um enorme potencial solar devido a sua localização geográfica intertropical, com uma irradiação so-

lar global entre 1900 e 2150 kWh/m<sup>2</sup> ao longo do ano (SOLARGIS, 2017). Por meio do acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a aumentar sua participação de energia solar, de biomassa e eólica em pelo menos 23% até 2030 (NDC, 2021). Martins e Pereira (2011) afirmam que aplicações FV têm um futuro promissor na maioria das grandes cidades do Brasil, uma vez que as curvas de demanda para cargas de ar-condicionado seguem normalmente a curva de oferta de irradiação solar. Conforme alguns autores, os principais obstáculos para a expansão tecnológica são a falta de planejamento e regulação por parte dos governos das diversas esferas (FARIAS JR et al., 2017; MIRANDA et al., 2015) enquanto outros (FRATE e BRANNSTROM, 2017) sugeriram que a necessidade de subsídios governamentais foi super valorizada em estudos prévios. Já Miranda et al. (2015) apontaram que o custo de oportunidade é um dos mais relevantes e complexos parâmetros a medir, e que se faz necessário conduzir estudos sobre as múltiplas opções disponíveis para os consumidores brasileiros considerando diversos cenários.

Miranda et al. (2015) apontaram que a introdução de sistemas FV em telhados de residências brasileiras pode ocorrer inicialmente em cidades com alto poder de compra; Brasília ocupa hoje a terceira posição no ranking nacional de expansão urbana (ABSOLAR, 2022). A economia de Brasília é suportada por uma elite do serviço público, pelo comércio varejista e por um recente cluster científico-tecnológico de inovação. Como um poderoso centro de decisão econômica e política, ações bem sucedidas voltadas para inovações tecnológicas podem facilmente ganhar visibilidade nacional e internacional. Portanto, identificar e avaliar a relevância de barreiras de diferentes naturezas para adoção de sistemas FV em telhados pode contribuir para formulação de políticas e estratégias orientadas para a aceleração da expansão da tecnologia.

O objetivo da presente pesquisa é identificar as barreiras e capturar as racionalidades dos adotantes a partir das vozes dos diferentes especialistas envolvidos na difusão de sistemas FV em telhados de condomínios verticais residenciais de Brasília. Esse artigo está dividido em seis partes, além da introdução: uma revisão bibliográfica sobre as barreiras para adoção de energia fotovoltaica e sobre a política de geração distribuída (ii); materiais e métodos, que inclui a descrição da região e o método de estudo (iii), uma seção de resultados (iv), uma de discussão (v) e por fim algumas conclusões e recomendações (vi).

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Políticas para geração distribuída no Brasil**

Ao final de 2022, a capacidade FV instalada em telhados no

Brasil era de 12 GW, que significa 6.17% de um total de 196.6 GW de potência instalada no país (ABSOLAR, 2022). Juarez et al. (2014) descrevem a inserção das tecnologias baseadas em energias renováveis na rede brasileira como uma situação ganha-ganha para a sociedade, para empresas de energia e para o meio ambiente; Ribeiro et al. (2016) apontam que essas tecnologias são vistas pela sociedade como uma boa alternativa de suporte à economia e ao desenvolvimento social. A conversão FV tem grande aceitação pública no Brasil porque é vista como uma fonte de energia renovável que não causa grandes impactos ambientais. Essa ideia foi difundida por instituições de governo, universidades, agências de cooperação internacionais e associações de empreendedores locais que buscam legitimar suas participações nos mercados de energia (CARNEIRO, 2000; LOCATELLI, 2011; FARIAS, 2014).

Por meio da resolução normativa (RN) 482/2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) introduziu o mecanismo de compensação de energia com objetivo de reduzir as barreiras para conexão de tecnologias de conversão de energias renováveis à rede elétrica. O mecanismo de compensação permitiu que pequenos geradores usassem essa energia ou que gerasse créditos na distribuidora, válidos por até 60 meses. Contudo, três anos após a emissão dessa RN, apenas 478 pequenos sistemas FV foram instalados no Brasil, o que levou a emissão da RN 687/2015. Essa RN ampliou as possibilidades de mercado ao incluir as modalidades de múltiplas unidades de consumo, consórcios de pessoas jurídicas e cooperativas de pessoas físicas como possíveis geradores, permitindo que a eletricidade produzida pudesse ser compensada na razão de um-para-um por filiais comerciais, integrantes de condomínios, cooperativas e consórcios. As RN definem micro geração como uma planta com capacidade instalada de até 75 kW, e a mini geração distribuída como uma planta com capacidade instalada maior que 75 kW até 5 MW. Assim, as RN 482/2012 e 687/2015 passaram a permitir a instalação de pequenos geradores baseados em energias renováveis em residências, comércio e instituições do Brasil. Mesmo nesse cenário de expansão, dado o clamor das empresas distribuidoras de energia e a premissa das associações de empreendedores sobre a necessidade de estabelecimento de um marco regulatório para garantir a expansão da geração distribuída, foi votada e sancionada pelo Presidente da República a lei 14300/2022, em vigência desde janeiro de 2023.

Na capital federal, o Programa Brasília Solar, fruto do grupo de trabalho Brasília solar, liderado pela Secretaria de Meio Ambiente do Governo do Distrito Federal (DF), tem como objetivo estabelecer incentivos ao desenvolvimento tecnológico, ao uso e à instalação de sistemas de conversão e/ou aproveitamento de energia solar no DF, no

sentido de tornar Brasília uma cidade mais independente, sustentável e resiliente às mudanças climáticas. O programa conta com a adesão de órgãos de governo, como Secretarias de Estado e Coligadas, Empresas do Setor Privado e Institutos relacionados à cadeia FV, Organizações da Sociedade Civil, Redes da Sociedade Civil e Universidades (SEMA, 2016). Com a publicação do Decreto Nº 37717/2016, de criação do Programa de estímulo ao uso de energia solar fotovoltaica, o governo do DF procurou mostrar ao país que tem interesse em fomentar a expansão dessas tecnologias de conversão de energia. No atual cenário regulatório, a capacidade instalada FV em telhados de Brasília no ano de 2022 chegou à marca de 159,24 MW, distribuídos na proporção de 132,8 MW para a modalidade de geração junto a carga, 22,66 MW na modalidade de autoconsumo remoto, 3,68 MW para geração compartilhada e apenas 0,1 MW para condomínios (ANEEL, 2022).

## **2.2 Barreiras para adoção da energia solar fotovoltaica**

Diversos são os autores que têm discutido sobre como as racionalidades de potenciais adotantes podem acelerar a adoção de sistemas de conversão de energias renováveis, tanto no meio rural como no urbano (RAI e SIGRIN, 2013; VASSEUR e KEMP, 2015; RAI e ROBBINSON, 2013; FLEIB et al., 2017; GOMES, 2018; RATHORE et al., 2018). Rai e Robinson (2013) atestaram que, para tecnologias intensivas em capital como a FV, informações confiáveis advindas de adotantes da família e amigos tomam grande relevância durante seus processos de decisão. Rai e Sigrin (2013) mostraram que o acesso a módulos FV por meio de leasing é uma nova tendência de mercado, e que isso abrirá espaço para expansão de sistemas FV em residências com pequenos orçamentos financeiros. Rathore et al. (2018) chamaram a atenção para a falta de instituições financeiras com linhas de crédito específicas e apropriadas. FleiB et al. (2017) comentaram que estudos tradicionais sobre a participação individual de pessoas em iniciativas FV não são suficientes para influenciar o comportamento dos diferentes tipos de potenciais adotantes.

Existem também esforços de diversos pesquisadores no sentido de acelerar a adoção de telhados solares em grandes centros urbanos (SOVACOOOL, 2009; VASSER e KEMP, 2015; BERGEK e MIGNON, 2017; QURESHI et al., 2017; MAH et al., 2018; ALHAMMAMI e NA, 2021; OLIVELLA et al., 2021). Para Nova York, Sovacool (2009) propôs que, na essência, as ofertas das distribuidoras nem sempre são reais ou acessíveis para todos, mas ao invés disso limitadas a certas tecnologias e a determinados perfis sociais. Bergek e Mignon (2017) apontaram que investimentos em sistemas de conversão de energias renováveis são baseados principalmente em avaliações de lucro e

tempo de retorno. Qureshi et al. (2017) revelaram que a presença de telhados FV em Lahore se deve mais ao interesse de reduzir custos e auferir ganhos financeiros, que por consciência ambiental dos adotantes. Para Hong Kong, Mah et al. (2018) apontaram que as políticas públicas para expansão de telhados FV precisam promover alterações regulatórias, criar novos mercados e melhorar o suporte técnico oferecido aos potenciais adotantes.

Para Seul, desde o término da *feed-in-tariff* os esquemas de carbono obrigaram a certificação da geração de energia renovável, enquanto em Tóquio os governos nacional e da metrópole provêm subsídios e outros incentivos para adotantes residenciais (BYRNE et al., 2016). Bollinger e Gillingham (2012) indicaram que o ‘efeito dos pares’ opera por meio da visibilidade dos painéis, e de boca a boca, e que suas interações sociais levam a uma maior taxa de adoção. De acordo com os autores, tanto a motivação por imagem como a transferência de informação confirmam o efeito dos pares em São Francisco. Moser et al. (2018) apontaram que o setor elétrico de Bolzano se beneficiou da criação de comunidades de geração local e condomínios de consumo coletivo como modelos de negócios emergentes que colocam potenciais adotantes no centro do processo de descarbonização. Zhai e Williams (2012) atestaram que, para a região metropolitana de Phoenix, Arizona, os custos, a manutenção e a preservação da natureza são os fatores mais importantes durante processos de compra e decisão. Balcombe et al. (2014) afirmaram que, para o Reino Unido, além de custo de capital e da economia de operação, potenciais adotantes também fazem um balanço entre esses e os benefícios ambientais. Moezzi et al. (2017) atestaram para Arizona, California, New Jersey e Nova York que a falta de uma racionalidade que instigue financeiramente, seguida pela preocupação de não permanecer no imóvel para ter o *payback*, são motivos para não adoção. Bergesk e Mignon (2017), por sua vez, afirmaram que, se formuladores de política querem incentivar a adoção de tecnologias, eles precisam entender o que motiva a adoção e como potenciais adotantes reagem a diferentes políticas.

Especificamente sobre o Brasil, cientistas têm pesquisado sobre os obstáculos para expansão de sistemas FV nos meios rural e urbano (MIRANDA et al., 2015; FARIA JR et al., 2017; FERREIRA et al., 2018; VILAÇA GOMES, 2018). Sobre regulação governamental, Farias Jr (2017) apontou que as distribuidoras temem perder receitas. Miranda et al. (2015) calcularam a razão entre o custo nivelado da energia e a tarifa residencial local em todos os municípios do Brasil e previu como a expansão FV poderá acontecer ao longo do tempo. Ferreira et al. (2018) sugeriram a securitização de sistemas FV como forma de habilitar diferentes modelos de negócio, como o *leasing*. Faria Jr et al. (2017) relembrou que o Ministério de Minas e Energia estava exami-

nando se o fundo de garantia para trabalhadores desempregados poderia ser usado como fonte de recursos para estimular a geração distribuída. Vilaça Gomes (2018) sugeriu mecanismos financeiros para facilitar o acesso a capital para compra do sistema FV. Existem também pesquisas sobre barreiras e facilitadores para adoção de sistemas FV em telhados de diferentes regiões e lugares do Brasil (GARLET et al., 2019; DAVID et al., 2021). Garlet et al. (2019) afirmaram que o investimento inicial e financiamento dos painéis são percebidos como as maiores barreiras na região Sul. David et al. (2021) encontraram que a falta de conhecimento durante o processo de decisão e compra implica falhas de dimensionamento do sistema e gerenciamento do consumo de energia, fazendo do aumento de custos uma grande barreira em São Paulo.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Região de estudo: Brasília (Distrito Federal)**

Brasília tem uma população de cerca de 2,8 milhões de habitantes, com IDH e PIB per capita bem acima da média brasileira (IBGE, 2019). Brasília foi projetada e construída nos anos 1960 para ser uma moderna capital, em formato de aeroplano, onde as pessoas vivem e trabalham principalmente em suas 128 super quadras distribuídas ao longo da envergadura de suas asas. Cada super quadra possui sua prefeitura e é composta por prédios comerciais e residenciais, com uma altura máxima de seis andares e área de telhado de 1250 metros quadrados. A Asa Norte, a Asa Sul, o Sudoeste, a Octogonal e o Cruzeiro são os principais setores de Brasília e sua população, de cerca de 2 milhões de habitantes, está distribuída em cerca de 30.500 apartamentos que apresentam considerável rotatividade de inquilinos, dada a natureza efêmera dos postos de trabalho temporários da política interna e externa (Figura 1).

A população de Brasília é composta por 53,07% de mulheres. Um percentual de 96,73% de toda a população está conectado à internet, 69,71% têm entre 15 e 59 anos, enquanto a renda média per capita é de R\$ 3.944,00. 20,84% das pessoas têm nível superior, 37,25% completaram ensino médio e 19,06% são pós-graduadas (CO-DEPLAN, 2022). O projeto de Brasília, suas divisões em setores, homogeneidade socioeconômica e padrões de arquitetura consistem em grande facilitador para caracterização da população pesquisada. Embora existam outros bairros em torno da cidade – as chamadas cidades satélites – os autores do presente artigo optaram por não os incluir na presente pesquisa, de modo a facilitar e deixar ainda mais homogênea e confiável a caracterização socioeconômica dos pesquisados.



Figura 1 - Vista aérea de Brasília

Brasília tem um nível de irradiação solar muito alto, com média anual de  $5,8 \text{ kWh/m}^2$ , superior à maior parte dos países da Europa (WWF, 2016). Um prédio típico de Brasília tem oito apartamentos por andar, com uma média de consumo de eletricidade de  $215 \text{ kWh}$  ao mês (CODEPLAM, 2022), o que permite facilmente fazer projeções considerando 48 apartamentos por prédio. Com painéis FV com 20% de eficiência, 75% de *performance ratio*, e uma irradiação solar diária de  $5,8 \text{ kWh/m}^2$ , serão necessários 396 metros quadrados de telhado para suprir a demanda de energia dos apartamentos, o que corresponde a 33% da área dos telhados. Gerenciados pelos síndicos, existem também os equipamentos de propriedade comum do condomínio – como elevadores, iluminação e dispositivos de segurança – que também demandam energia elétrica. Considerando que a média mensal da demanda de energia dos equipamentos comuns é de  $2.000 \text{ kWh}$ , serão necessários cerca de 65 metros quadrados de painéis FV para supri-los.

### 3.2 Metodologia de estudo

Inicialmente foi realizada uma revisão de literatura sobre barreiras e facilitadores para adoção de sistemas FV em telhados de grandes centros urbanos. Posteriormente, para identificar barreiras não contempladas na revisão de literatura, realizamos entrevistas presenciais com especialistas locais envolvidos no assunto de diferentes maneiras. Como resultado, foram identificados diversos aspectos de barreiras financeira, regulatória, técnica, social e de mercado. Para avaliar quantitativamente a relevância de cada aspecto de barreira identificado, os autores desenvolveram um instrumento quali-quantitativo por meio do qual os participantes puderam escolher entre “discordar extremamente” e “concordar extremamente”, sobre uma escala

Likert de sete faixas. A fim de melhorar o conhecimento sobre as barreiras específicas de Brasília, o questionário foi validado por profissionais envolvidos diretamente no assunto: síndicos profissionais, cientistas da área de energia, agentes reguladores de âmbito federal, representantes da distribuidora de eletricidade local e integradores de sistemas solares à unidades residenciais de múltiplas unidades. Após o processo de validação os autores chegaram a um questionário com 11 (onze) diferentes proposições:

Q01 - O valor de entrada para compra de um sistema FV para condomínio é muito alto.

Q02 - O tempo de retorno de um sistema FV em condomínio é muito longo.

Q03 - Inquilinos são obstáculos para que proprietários de apartamentos paguem por telhados solares.

Q04 - O processo de adoção de um sistema FV no telhado é complicado e dá muito trabalho.

Q05 - A manutenção de um sistema FV sobre o prédio é pontual, simples e barata.

Q06 - A oferta de garantia por parte do integrador incentiva a adoção de sistemas FV.

Q07 - É mais fácil locar apartamentos de condomínios que têm sistema FV.

Q08 - Já havia segurança jurídica antes do marco legal da geração distribuída.

Q09 - Uma opção simples para condomínios é poder compartilhar parte de uma fazenda FV.

Q10 - Falta iniciativa dos síndicos para compra de sistemas FV.

Q11 - Para os síndicos, a opinião de outros síndicos é tão importante quanto a dos condôminos.

Numa segunda etapa de pesquisa o questionário desenvolvido foi aplicado por meio da Plataforma Google Forms em um grupo de quarenta e dois especialistas da área FV diretamente envolvidos com a difusão de sistemas FV em condomínios residenciais verticais. Entre esses envolvidos estavam síndicos profissionais, integradores, consultores, reguladores, distribuidores e geradores de energia, especialistas dos governos local, distrital e federal, e representantes dos Ministérios de Minas e Energia e Ciência e Tecnologia. Para conhecer a racionalidade usada por cada participante quando da avaliação das barreiras sob a escala Likert, foi pedida adicionalmente uma justificativa por escrito para cada resposta. Todas as respostas foram empilhadas na ordem da maior discordância (-03) para a maior concordância (+03) com

com ajuda do Software Power BI, com o qual também foram produzidos gráficos da distribuição das respostas a cada proposição de pesquisa. Posteriormente, trechos das respostas foram codificados para análise e estatística semântica, com a finalidade de criar um banco escrito de trechos de justificativas que sirvam para enriquecer qualitativamente os resultados e a discussão de pesquisa. Durante a análise semântica se fez, para cada um dos dois lados da distribuição, uma relação entre o número de trechos que apresentavam o mesmo significado semântico e o número de respostas aderentes dadas para cada proposição de pesquisa. Os questionários foram aplicados entre janeiro e julho de 2022.

#### 4. RESULTADOS

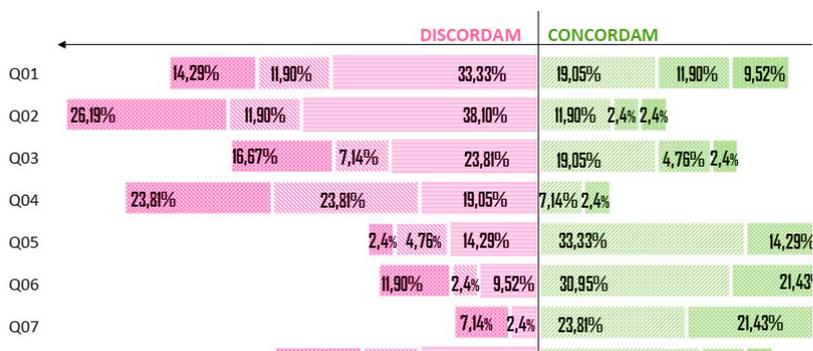


Figura 2 - Distribuição das respostas sobre a escala Likert

##### 4.1 Q01 - O valor de entrada para compra de um sistema FV para condomínio é muito alto

Dos respondentes, 59,52% discordaram e 40,47% concordaram que o valor de entrada para compra de um sistema FV é muito alto. Na voz dos discordantes (-01) se destaca a justificativa dada por um síndico (17): "Na área de condomínios, a administração e seus condôminos veem esse valor como um investimento de retorno rápido". Entre aqueles que apresentaram grande discordância (-02) se destaca a voz de um acadêmico da área de energia (28): "Grosso modo, o pessoal de Brasília pode pagar, uma vez que o custo de oportunidade é muito baixo". Entre os que discordaram extremamente (-03), se destaca um síndico (24) e um integrador (18) que, respectivamente, afirmaram: "A economia gerada viabiliza o negócio em curto espaço de tempo" e "Uma análise minuciosa do custo x benefício para vários cenários mostra que a opção por sistemas fotovoltaicos distribuídos é extremamente vantajosa em face de vida útil de 25 anos".

Entre aqueles que simplesmente concordaram (+01) se destacam um gerador de energia e um síndico (41;14) que, respectivamente, responsabilizaram a conjuntura: “Estamos vivenciando uma grande instabilidade econômica, em que muitos de nossos condôminos foram afetados” e “A capacidade econômica dos condomínios está [circunstancialmente] limitada”. Entre aqueles que mostraram grande concordância (+02) se destaca um integrador (23): “No nosso tipo de negócio, o cliente paga inicialmente o gerador fotovoltaico ao fornecedor do equipamento e depois paga ao integrador pelos serviços”. Por fim, entre aqueles que concordaram extremamente (+03), temos dois integradores (19; 22) que, respectivamente, atestaram: “Como um sistema de energia [equipamento] tem um custo proporcional à energia que produz, o custo é muito alto” e “Caso não tenha cartão de crédito, o valor pago [pelos equipamentos] terá que ser à vista”.

#### **4.2 Q02 - O tempo de retorno de um sistema FV para condomínios é muito longo**

Dos respondentes, 76,19% discordaram que o tempo de retorno de um sistema FV seja muito longo; apenas 16,67% dos respondentes concordaram. Entre aqueles que discordam (-01) se destacam as justificativas de um regulador (10), de um síndico (17), e de um integrador (23) que, respectivamente, afirmaram: “Em Brasília, considerando a tarifa de energia, alto nível de irradiação, financiamentos acessíveis e isenções fiscais, o tempo de retorno não é elevado”, “Aqui financiamos em 60 meses e depois, o adotante tem 20 anos usufruindo da economia”, e “Não é longo, considerando que esse retorno vem sem grandes custos e serviços adicionais ao longo da vida útil”. Dentre aqueles que mostraram grande discordância (-02) se destacam os argumentos de dois integradores e um produtor de energia (19; 27; 08) que, respectivamente, afirmaram: “Entre 3 a 5 anos é um curto período, frente a uma garantia de 30 anos para os painéis solares”, “O *payback* do sistema tem ficado entre 3 e 5 anos” e “Para um sistema de carga relevante, o *payback* é relativamente curto. No extremo da discordância (-03), dois distribuidores (03;18) afirmaram que “Com a atual tarifa de eletricidade e uma vida útil de 25 anos, o *payback* é de aproximadamente 3 anos” e “Mesmo captando recursos no mercado, com juros de 2,00% ao mês e prazo de pagamento de 60 meses, teremos um TIR acima de 30%”. Ainda dentre os que discordam extremamente, três integradores (31; 35; 22) afirmaram: “Tipicamente, em Brasília, o tempo de retorno do investimento de um sistema fotovoltaico é estimado entre 3 e 5 anos, sendo que a vida útil do sistema é de no mínimo 25 anos”; “O *payback* do projeto tem sido menos de 4 anos, o que é muito atrativo perto do resultado energético em 25 anos. É um tempo muito curto para um retorno econômico tão

atrativo” e “O preço do kWh tem que ser levado em consideração na hora de calcular o retorno; é uma variável que ninguém consegue prever, mas que sabemos que aumenta com o tempo, fazendo com que o tempo de retorno diminua cada vez mais”.

Na voz dos que concordaram (+01) se destaca a justificativa dada por um acadêmico da área de energia (29) que afirma que “O tempo de retorno talvez seja uma barreira pois moradores não sabem quanto tempo vão permanecer no imóvel”, enquanto um integrador (01) propôs que “Para a cultura empresarial nacional, quatro ou mais anos de *payback* não é razoável”.

#### **4.3 Q03 – Inquilinos são obstáculos para que proprietários paguem por telhados solares**

Dos respondentes, 47,62% discordaram que a presença de inquilinos é obstáculo para que proprietários de apartamentos paguem por sistemas FV em condomínios; 26,19% não têm opinião, e uma parte menor acredita que inquilinos são obstáculos. Na voz daqueles que apresentaram discordância (-01) e grande discordância (-02), respectivamente, dois integradores (20; 22) afirmaram que “A assembleia pode deliberar que a taxa extra deve ser paga pelo proprietário, não pelo inquilino” e “Para o proprietário que busca agregar valor ao imóvel [a taxa extra] não é um problema”. Na voz de um síndico (24): “Eventual taxa extra sai do bolso do proprietário”.

Na voz daqueles que apresentaram simples concordância (+01), um representante do Governo Federal (13) e de um regulador (10), respectivamente, afirmaram: “Sim, se houver a cobrança de taxa extra” e “No caso de condomínios, a instalação de painéis reduzirá o custo de energia do prédio, que é pago pelo inquilino; portanto, o proprietário paga a taxa extra, mas não usufrui dos benefícios do investimento que fez”. Na mesma linha um integrador (23) resumiu: “O proprietário não quer investir, porque quem terá o benefício imediato será o inquilino”.

#### **4.4 Q04 - O processo de adoção de um sistema FV no telhado é complicado e dá muito trabalho**

Discordaram 66,67% dos respondentes que o processo de adoção de um telhado FV é complicado e dá trabalho; 23,81% não têm opinião, e uma parte menor (9,52%) acredita que a instalação é complicada e trabalhosa.

Na voz daqueles que apresentaram simples discordância (-01), dois síndicos (17; 25) atestaram: “Extremamente simples e rápido, fiquei impressionada!” e “Não é complicado e não dá muito trabalho, pois todo o trabalho fica por conta da empresa executora”. Na voz dos

que apresentaram grande discordância (-02), um acadêmico da área de energia (32) afirmou: “As instalações são modulares, com pouca intervenção de engenharia civil. Rápidas e limpas, sem incomodar muito”. Dois integradores (23, 22) afirmaram: “As concessionárias têm agilizado as aprovações e a instalação é rápida” e “O cliente só faz assinar alguns papéis. O trabalho dele é praticamente nulo”. No extremo das discordâncias (-03), dois integradores (27; 19), respectivamente, afirmaram: “A parte burocrática do sistema FV fica a cargo do responsável pelo projeto e pela instalação” e “Com o tempo e a expertise dos tecnocratas, tudo fica descomplicado”. Atribuindo o mesmo grau de discordância, um gerador de energia (14), um síndico (24) e um consultor (11), respectivamente, afirmaram: “É simples de implantar, uma equipe bem treinada rapidamente instala”; “Muito simples, sem grandes obras civis, sem alterar a fachada, sem trazer ruídos, radiação ou incômodos”; “Não é complicado e não dá muito trabalho. Depende apenas das informações que o integrador forneça ao seu cliente”.

#### **4.5 Q05 - A manutenção de um sistema FV sobre o prédio é pontual, simples e barata**

Dos respondentes, 21,43% discordaram que a manutenção de um sistema FV sobre o prédio é pontual, simples e barata; 11,9% não têm opinião e a maior parte deles (66,67%) concorda. Na voz daqueles que apresentaram discordância (-01), trazemos a justificativa de um consultor (11) e de um síndico (17) que afirmaram respectivamente que “Se [a manutenção] ocorrer em intervalos longos, pode não ser simples, nem barata e nem pontual” e “Não creio que seja pontual, mas pude perceber durante todo processo que é extremamente simples!”. Mesmo entre os que apontaram não ter opinião (00), um síndico (41) justificou que não tem informações sobre o custo de manutenção: “Recebi orçamentos apenas de aquisição do sistema. As empresas não informaram sobre custos de manutenção”. Outro síndico (25) disse: “O nosso sistema ainda não está pronto, então não tenho como emitir opinião sobre este tema”.

Dentre aqueles que apresentaram concordância (+01), um integrador (27) e um distribuidor (07), respectivamente, afirmaram: “Uma limpeza por ano. Se comparado ao valor do sistema, o custo de manutenção é extremamente baixo” e “A manutenção é simples, porém a forma como é instalado pode encarecer a mão de obra devido à dificuldade de acesso, trabalho em altura, etc.”. Na visão de outro integrador (31) “É pontual e barata, mas não é simples, pois trata-se de um sistema de geração de energia”. Dentre os que demonstraram grande concordância (+02), se destaca a justificativa de um acadêmico e de um integrador (16; 20) que, respectivamente, afirmaram: “A manutenção é basicamente a limpeza semestral de particulados acumulados na

superfície dos painéis e eventuais substituições de inversores de frequência” e “Se a instalação for bem feita, a manutenção consistirá apenas de uma limpeza semestral dos módulos fotovoltaicos”. Finalmente, entre aqueles que concordaram extremamente (+03), um integrador e um gerador (36; 14), respectivamente, afirmaram: “A manutenção consiste em uma limpeza com água - que o próprio condomínio pode fazer -, além da inspeção anual que precisa ser feita em qualquer sistema elétrico” e “Os materiais aplicados na usina solar são de longa vida útil, e a manutenção se resume a limpeza superficial dos painéis”.

#### **4.6 Q06 - A oferta de garantia por parte do integrador incentiva a adoção de sistemas FV**

Dos respondentes, 23,80% discordaram que a oferta de garantia por parte do integrador incentiva a adoção FV; 7,15% não tem opinião, enquanto a maioria (69,05%) concordou que a garantia incentiva a adoção. Na voz daqueles que apresentaram discordância (-01), um integrador (22) afirma: “Não necessariamente, pois os equipamentos já possuem ótimas garantias. Caso o integrador dê uma garantia de serviço igual à do equipamento, o preço final teria que aumentar”. Na voz daqueles que apresentaram discordância extrema (-03), se destacam as falas de dois integradores (36; 19) que apontaram, respectivamente: “A garantia [já] é muito elevada, não há produto hoje com garantia tão longa igual ao solar” e “Não tem necessidade porque os fornecedores e fabricantes já oferecem essa garantia”.

Dentre aqueles que apresentaram concordância e grande concordância (+01; +02) se destacam dois integradores (23; 27) e um acadêmico da área de energia (28) que, respectivamente, afirmaram: “Acreditamos que sim e, por isso, oferecemos um ano de garantia para os serviços de integração” e “Garantias maiores passam mais confiança para o cliente em relação ao investimento” e “Certamente eu me sentiria mais seguro quanto ao retorno do investimento”. Finalmente, entre aqueles que concordaram extremamente (+03), um gerador de energia (08) afirma que “Dado o desconhecimento do público comum, a garantia sempre serve para dar segurança a quem está contratando o serviço e material”. Um integrador (20) atestou: “Considerando que os módulos, inversores e a estrutura têm garantia dos respectivos fabricantes, se o integrador der garantia de cinco anos para o serviço - que é o prazo esperado do *payback* -, com certeza isso incentiva”.

#### **4.7 Q07 - É mais fácil locar apartamentos de condomínios que tem sistemas FV**

Apenas 9,52% dos respondentes discordaram que a presença de sistemas FV em prédios facilita o processo de locação de aparta-

mentos; 19,5% não têm opinião (apesar de alguns justificarem), enquanto a maior parte da amostra (71,43%) acredita que a presença de sistemas FV facilita o processo de locação. Na voz dos que apresentaram discordância (-01) um integrador (30) afirmou que um sistema FV “Agrega valor apenas ao custo de energia das áreas comuns, não atendendo as unidades residenciais” enquanto um regulador (10) comentou que “Não se toma decisão com base nessa informação, mas sim no valor do aluguel”. Entre os que assinalaram não ter opinião (00), também existem justificativas discordantes, como a de um representante do governo federal (13) que afirmou: “A minha experiência indica que isso não tem relevância pois o beneficiário é o condomínio e não os condôminos”.

Na voz daqueles que apresentaram concordância (+01) dois acadêmicos da área de energia (16; 28), respectivamente, afirmaram: “Os inquilinos saberão que as despesas [com energia] não aumentarão descontroladamente” e “Sim, desde que fique mais barato e com menor emissão de gases de efeito estufa”. Dentre os que apresentaram grande concordância (+02), dois integradores (20; 18) afirmaram, respectivamente: “Reduzir os gastos com energia com certeza é um incentivo para qualquer inquilino” e “Sem dúvida este apelo ajuda na venda/locação, pois pode ser explorado com relação ao custo recorrente de energia e com relação ao aspecto de ser amigo do meio ambiente”. Por fim, dentre os que demonstraram extrema concordância (+03), se destaca a justificativa de um consultor da área de energia (15): “Sim, porque a pessoa, ao escolher o apartamento, seja pagando aluguel ou adquirindo o imóvel, sempre atenta ao valor do condomínio que, assim como o valor do IPTU, são decisivos no processo de escolha”.

#### **4.8 Q08 - Já havia segurança jurídica antes do marco legal da geração distribuída**

Dos respondentes, 40,48% discordaram que havia segurança jurídica antes do marco legal; 23,81% não têm opinião, enquanto 35,71% concordaram que já havia segurança jurídica. Na voz daqueles que apresentaram discordância (-01) um síndico, um consultor e um distribuidor (17; 15; 03), respectivamente, afirmaram: “Depende do tipo de contratação, algumas modalidades não eram aconselhadas pelo jurídico”, “Não havia segurança, mas os incentivos compensaram e falaram mais alto que a insegurança jurídica” e “Resolução não traz direito adquirido”. No caso de grande discordância (-02), um integrador (23) justifica: “Havia simplesmente Resoluções Normativas da ANEEL, que poderiam mudar a qualquer momento”. No extremo da discordância (-03), dois integradores (22; 30) afirmaram respectivamente: “Com o marco legal estamos protegidos pela lei brasileira”, “Não existia [segu-

rança jurídica], tanto que em 2019 houve um grande debate sobre projetos implantados”. Um terceiro (35) integrador acrescenta: “A lei foi fundamental e necessária para manter os investimentos como acordado. Isso melhora a qualidade de negociação no setor e segura o efeito especulativo do mercado junto aos investidores, ampliando a oferta e o interesse do governo em leis que expandem o setor”.

Concordando simplesmente (+01), dois integradores (33; 18) e um acadêmico (32), respectivamente, afirmaram: “O marco legal veio para garantir a permanência das distribuidoras em um mercado que caminhava para liberalização” e “Se ficássemos com o que foi decidido nas resoluções normativas, seria ótimo”, e “O marco legal é uma política fazendária, que atende ao *lobby* das concessionárias de energia”. Com concordância (+02), um regulador (10) declarou: “Não se pode confundir segurança jurídica com eterna manutenção de subsídios cruzados que servem para onerar a conta dos consumidores”. Por fim, dentre os que demonstraram extrema concordância (+03), um síndico (24), que afirma “Sim, as resoluções eram conhecidas e respeitadas”.

#### **4.9 Q09 - Uma opção para condomínios é compartilhar uma fazenda FV**

Apenas 9,52% dos respondentes discordam que poder compartilhar e receber um percentual da eletricidade produzida em uma fazenda FV é uma boa opção para condomínios; 19,05% não têm opinião e 71,42% acreditam ser bom. Na voz daqueles que apresentaram discordância (-01), um síndico (17) e um consultor de energia (15), respectivamente, atestaram: “Algumas cláusulas contratuais nessa modalidade são questionadas pelo jurídico do condomínio” e “É uma opção mais simples, porém, mais cara, que instalar seu próprio sistema sobre o telhado, porque terá que pagar uma demanda contratada (potência > 75 kW)”.

Concordando (+01), um gerador de energia (08) afirmou: “[É] uma possibilidade mais simples do que realizar a própria planta e fazer a manutenção” enquanto um regulador (10) disse: “É uma alternativa com baixo custo inicial, mas com menor retorno”. Por sua vez, um representante do governo federal (13) apontou que “Isso facilitaria a introdução da energia FV, principalmente em prédios que têm restrições de área disponível”. Dentre aqueles com grande concordância (+02), um gerador de energia (14) especificou: “Os investidores já perceberam que o mercado de energia solar é alvissareiro e que a demanda por essa modalidade tende a se expandir”. Entre os que demonstraram extrema concordância (+03), se destacam, respectivamente, três integradores (30; 31; 21): “Basta assinar o contrato com o fornecedor da energia”, “É pagar sem ter que fazer uma estrutura”, e “É a solução mais simples, mas a que dá menor retorno”.

#### **4.10 Q10 - Falta iniciativa dos síndicos para compra de sistemas FV**

Apenas 23,81% dos respondentes discordaram que falta iniciativa dos síndicos para compra de sistemas FV; 23,81% não têm opinião, enquanto 52,38% acredita que falta iniciativa. Na voz daqueles que apresentaram discordância (-01), dois síndicos (17; 41), respectivamente, afirmaram: “Falta informação, e por isso as vezes falta iniciativa” e “O interesse existe, mas há falta de tempo para conhecer os processos”. No mesmo grau de discordância, um representante do governo federal (13) colocou: “No meu caso, o síndico tomou iniciativa em função dos valores crescentes da tarifa de energia”. Na voz de um acadêmico da área de energia (04): “É preciso ter em mente que os síndicos não têm informações”. Por fim, no extremo das discordâncias (-03), respectivamente, um acadêmico da área de energia (28) e um integrador (19) justificaram: “Convencer os diferentes condôminos é um laboratório” e “O problema é sempre o advogado”.

Dentre aqueles concordantes (+01), dois síndicos (24; 25) afirmaram: “Muitos não querem se envolver, pois selecionar fornecedores, buscar linhas de crédito, convencer condôminos, acompanhar obras e implantar são atividades adicionais” e “Muitos síndicos [sem informações] sequer consideram essa possibilidade”. Com o mesmo grau de concordância, um gerador de energia e um regulador federal (14; 10) afirmaram: “Faltam conhecimento e iniciativa” e “Depende do nível do conhecimento do síndico sobre o assunto”. Por fim, dentre os que demonstram extrema concordância (+03), um integrador (21; 31) atesta: “Se o síndico não está extremamente motivado a fazer a aquisição de sistema solares, o condomínio não adquire”.

#### **4.11 Q11 - Para síndicos a opinião de outros síndicos é tão importante quanto a dos condôminos**

Pode-se observar na distribuição que 14,28% dos respondentes discordaram que para os síndicos a opinião de outros síndicos é tão importante quanto a dos condôminos; cerca de 16,67% não têm opinião, e uma parte maior (69,05%) acredita que as opiniões dos síndicos são as mais relevantes. Na voz dos que concordaram (+01) trazemos respectivamente as justificativas de dois síndicos (17; 41): “A opinião de síndicos que já adotaram o sistema é importante! Quem não faz o uso do sistema não tem nada a compartilhar no processo” e “As experiências são os fatores mais importantes”. Ainda concordando (+01) trazemos um acadêmico da área de energia (16) e um integrador (20) que disseram, respectivamente: “Vale a propaganda boca a boca feita por quem já passou pela experiência prática” e “Com certeza, pois, se a palavra inspira, o exemplo arrasta”. Dentre aqueles respon-

dentos que apresentaram grande concordância (+02) destacamos um síndico (25) que afirmou que “Sim, pois o síndico que já construiu uma usina pode muito bem compartilhar sua experiência e, assim, encorajar outros síndicos a também construírem”. Por fim, entre aqueles que concordaram extremamente (+03), um integrador (23) e um consultor (15) declararam: “Porque os outros síndicos, muitas vezes, já têm uma ideia das opiniões de vários condôminos e, até, as consequências obtidas em experiências anteriores” e “Não acho que só a opinião, mas uma experiência positiva e comprovada em outro condomínio com certeza inspirará e encorajará um outro síndico a fazer o mesmo, uma vez que os riscos e ameaças já são muitos conhecidos, foram mensurados e podem ser devidamente monitorados”.

## 5. DISCUSSÃO

Entre os participantes que discordam que o custo inicial de um sistema FV é alto [Q01] 35,71% justificaram que a compra do sistema consiste em investimento e não custo; 14,28% afirmaram que o alto padrão de renda de Brasília, e conseqüente o baixo custo de oportunidade, reduzem a importância do alto valor inicial. Dentre aqueles que concordam que o valor de entrada é alto, 50% declararam que a forma de pagamento dos equipamentos é a razão do custo de entrada ser considerado alto; 40% afirmaram que o motivo é a pequena capacidade econômica dos condomínios em tempo de crises político-econômicas, nos moldes do que apontam Franzen e Vogli (2013). Com relação ao *payback* dos sistemas FV [Q02], entre aqueles que discordam ser longo, 29,16% justificaram que o tempo é muito curto em relação à vida útil do sistema. Apesar de não serem encontrados pontos comuns nas argumentações usadas nas justificativas daqueles que concordam ser o tempo de retorno longo, argumentos plausíveis como não saber quanto tempo as pessoas vão permanecer no imóvel ganham relevância em face dos achados de Moezzi et al. (2017) para o Arizona, a Califórnia, New Jersey e Nova York.

No bojo das justificativas, tanto daqueles que discordam quanto daqueles que concordam que inquilinos são obstáculos para que proprietários de apartamentos paguem por telhados solares [Q03], 100% das justificativas trazem no bojo as taxas extras. Entre os que discordam, o fato da taxa extra ser paga pelo proprietário serve para negar que o inquilino seja um obstáculo. Já para aqueles que concordam que inquilinos são obstáculos, o argumento de que o proprietário paga a taxa extra, mas não usufrui do benefício da redução da conta de energia, desestimula a adoção por parte dos proprietários. Entre as justificativas daqueles que discordam que o processo de adoção de um sistema FV no próprio telhado é complicado e dá muito trabalho [Q04], 30,76% declararam que a experiência do integrador é fundamental;

23,07% afirmaram que toda a parte complicada do processo fica também a cargo dos integradores, o que é diverso de Drury et al. (2012), que afirmam que sistemas baseados em energias renováveis apresentam certos riscos e complexidades.

Entre aqueles que concordam que a manutenção de um sistema FV é pontual, simples e barata [Q05], 43,75% afirmaram que isso depende da periodicidade da manutenção; 25% declararam que depende da qualidade da instalação realizada. Portanto, tal qual acontece na proposição que trata sobre o trabalho e a complexidade do processo de instalação de um sistema FV sobre o telhado [Q04], as tônicas encontradas nas justificativas dadas novamente remetem à importância da expertise e da qualidade de serviço do integrador. Entre as justificativas dadas por aqueles que discordam que a oferta de garantia por parte do integrador incentiva a adoção de sistemas FV [Q06], 83,33% afirmaram que a garantia ofertada pelos fabricantes já é muito longa e suficiente; entre aqueles que concordam, 36,36% justificaram que a garantia dada pelo integrador sobre os serviços traz mais confiança e segurança no processo de compra.

Entre os que discordam que é mais fácil locar apartamentos de condomínios que têm sistemas FV [Q07], 100% alegaram que sistemas FV atendem apenas ao condomínio e não aos condôminos individualmente e que, portanto, não facilitam a locação. Entre os que concordam, 56,25% afirmaram que a redução da conta de eletricidade do condomínio motiva a locação, por menor que seja. Ainda entre aqueles que concordam, 18,75% declararam que se mostrar amigo do meio ambiente também motiva a locação. Tais afirmações vão de encontro aos achados de Qureshi et al. (2017) e FleiB et al. (2017) que, respectivamente, revelaram que “a presença de telhados FV em Lahore se deve mais ao interesse de reduzir custos e auferir ganho financeiro, que por consciência ambiental dos adotantes” e “Aspectos ambientais consistem um benefício secundário e que a maximização do ganho financeiro pessoal é o fator mais relevante no processo de compra e decisão”. Entre os que discordam já haver segurança jurídica antes do marco legal da geração distribuída [Q08], 22,22% declararam que resoluções não trazem segurança por serem facilmente mutáveis. Já entre os concordantes, 20% justificaram que resoluções já oferecem segurança, enquanto 70% afirmaram que o marco regulatório serve apenas ao lobby das distribuidoras, o que vai ao encontro do proposto por Wustenhagen et al. 2007; Wolsink 2013; Farias Jr, 2017. Tais achados sugerem uma dúvida a ser dirimida com o tempo, pois uma maior segurança virá apenas a partir de 2023, quando se revelará o balanço entre a relevância dos incentivos e o lobby das distribuidoras na forma da lei 14300/2022.

Entre os que concordam que uma opção plausível para condomínios é poder compartilhar em parte de uma fazenda FV [Q09],

42,85% apontaram ser essa solução uma boa opção para quem não tem área de telhado; 25% se preocuparam com uma maior carga tributária e um menor retorno financeiro. Entre os discordantes, não foram identificados pontos comuns relevantes; tal achado vai ao encontro de Moser et al. (2018), que apontaram que o setor elétrico de Bolzano se beneficiou com a criação de novos modelos de negócio como comunidades de geração local e condomínios de consumo coletivo. Convém evidenciar que 19,05% dos respondentes não expressaram opinião, fato que evidencia a necessidade de campanhas informativas junto aos síndicos, integradores e prefeituras de quadras. Dentre as justificativas daqueles que discordam que há falta de iniciativa dos síndicos para compra de sistemas FV [Q10], 28,58% afirmaram que, mais que falta de iniciativa, há completa falta de informação. Entre os que concordam, 53,84% declararam também que há falta de informação, enquanto 23,07% justificaram que a sobrecarga de atividade do síndico é a principal razão. Entre os que concordam que, para síndicos, a opinião de outros síndicos é tão importante quanto a dos condôminos [Q11], 75% justificaram que a experiência e o exemplo de já ter instalado uma planta é preponderante sobre todas as outras opiniões. Nos mesmos moldes dos achados de Bollinger e Gillingham (2012) para a cidade de São Francisco, tal ideia confirma a presença do efeito dos pares (boca a boca) para Brasília.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa mostra que certas barreiras e facilitadores observados em grandes e importantes cidades do mundo - como a falta de informação, custos de entrada e o efeito dos pares -, também estão presentes em Brasília. Evidencia que, na visão dos especialistas, tanto um processo de instalação rápido e descomplicado quanto uma manutenção pontual e barata dependem mais da expertise e da qualidade de serviço dos integradores do que da estrutura do telhado ou da qualidade dos equipamentos e que, portanto, mesmo com as longas garantias de equipamentos ofertadas pelos fabricantes, a garantia dada por integradores faz toda a diferença no processo de adoção. Evidencia também que o tempo de retorno pode não consistir em uma argumentação convincente de adoção, apesar de pequeno em relação à vida útil dos equipamentos, uma vez que a análise depende de fatores imprevisíveis, como a longevidade das pessoas e o tempo de permanência de inquilinos. Nesse contexto, uma conclusão é que os condomínios residenciais verticais de Brasília têm na crise política-financeira e nos respectivos aumentos de custos de equipamentos solares, barreiras comparáveis apenas à alta taxa de ocupação e rotatividade de inquilinos em condomínios residenciais.

Os autores recomendam o desenvolvimento de campanhas

sobre a preponderância do argumento financeiro sobre argumentos ambientais-climáticos no âmbito do processo de adoção-decisão. Fica patente a necessidade do governo local considerar as prefeituras de quadra, síndicos e integradores como atores centrais no processo de expansão, lhes dando oportunidades para compartilharem experiências. Finalmente, a pesquisa propõe que a opção pela geração compartilhada em consórcio, apesar da maior carga tributária e do menor retorno financeiro, pode acelerar a adoção de energia renovável FV em condomínios.

Adicionalmente, a pesquisa mostra que, a depender do aumento de *payback*, a entrada em vigor do marco legal da geração distribuída pode vir a desacelerar a expansão tecnológica, o que remete a necessidade de desenvolver novos modelos de negócios comunitários para geração distribuída.

## 7. AGRADECIMENTOS

À Fundação Cearense de Apoio Ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela outorga PD2-0175-00351.03.01/20 Edital 03/2020, e aos síndicos, integradores, reguladores, distribuidores e geradores de energia, acadêmicos, especialistas servidores dos governos local, distrital e federal pela confiança e boa vontade de participação. Ao CNPq pela bolsa de pesquisa concedida ao segundo autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR - Infográfico - (2022). São Paulo. <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/> Acesso em: 2 set 2022

ANEEL (2020). Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Distribuída por Fonte. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp)>. Acesso em: 1 setembro de 2022.

BALCOMBE P.; RIGBY D.; AZAPAGIC, A. (2013). Motivations and barriers associated with adopting microgeneration energy technologies in the UK. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;22 :655–66. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.012>.

BERGEK, A.; MIGNON, I. (2017). Motives to adopt renewable electricity technologies: Evidence from Sweden. *Energy Policy* 106 (2017) 547–559

BOLLINGER, B.; GILLINGHAM, K. (2012). Peer effects in the diffusion of solar photovoltaic panels. *Mark. Sci.* 31 (6), 900–912.

BYRNE, J.; TAMINIAU, J.; KIM, KN.; SEO, J.; LEE, J. (2016). A solar city strategy applied to six municipalities: integrating market, finance, and policy factors for infrastructure scale photovoltaic development in Amsterdam, London, Munich, New York, Seoul and Tokyo. *Wiley Interdisciplinary Rev: Energy Environment* 2016; 5:68–88.

BYRNE, J.; TAMINIAU, J.; SEO, J.; LEE, J.; SHIN, S. (2017). Are solar cities feasible? A review of current research. *International Journal of Urban Sciences*, DOI: 10.1080/12265934.2017.1331750

CARNEIRO, R. (2000). Estado, mercado e o desenvolvimento do setor elétrico brasileiro. Ph.D dissertation. School of Philosophy and Human Sciences, Universidade Federal de Minas Gerais.

CODEPLAN - Companhia de Planejamento do Distrito Federal - (2022). <http://www.metropolitana.codeplan.df.gov.br>. Acesso em: 8 julho 2021)

DAVID, T. M.; BUCCIERI, G. P.; SILVA ROCHA RIZOL, P. M. (2021). Photovoltaic systems in residences: A concept of efficiency energy consumption and sustainability in brazilian culture. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126836. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126836

DEL RÍO, P.; UNRUH, G., (2007) Overcoming the lock-out of renewable energy technologies in Spain: The cases of wind and solar electricity. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 2007, 11, 1498–1513.

DRURY, E.; MILLER, M.; MACAL, C. M.; GRAZIANO, D. J.; HEIMILLER, D.; OZIK, J. (2017). The transformation of southern California's residential photovoltaics market through third-party ownership. *Energy Policy* 2012;42: 681.

FARIAS, M. B. (2014)., Práticas Discursivas Sobre Sustentabilidade Ambiental: uma Interpretação Sobre a Ótica Do Discurso Crítica (M.Sc. Thesis). Universidade Federal de Lavras.

FARIAS, T. M. (2017). Afetividade e resistência: vínculo, transformações socioambientais e oposição capital-lugar na cidade de Galinhos-RN. Tese (doutorado) do Programa de Pós-Graduação em Psicologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal 367pp.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; DE SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; DOS SANTOS, G. R.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. (2018). Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 181–191. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.102

FLEIB, E.; HATZL, S.; SEEBAUER, S.; POSCH, A. (2017). Money, not morale: the impact of desires and beliefs on private investment in photovoltaic citizen participation initiatives. *Journal of Cleaner Production*. 141, 920–927.

FRANZEN, A.; VOGL, D. (2013) Two decades of measuring environmental attitudes: A comparative analysis of 33 countries. *Global Environmental Change*, 23 (2013) 1001–1008

FRATE, C. A.; BRANNSTROM, C. (2017). Stakeholder subjectivities regarding barriers and drivers to the introduction of utility-scale solar photovoltaic power in Brazil. *Energy Policy* 111, 346–352 2017.

GARLET, T. B.; RIBEIRO, J. L. D.; DE SOUZA SAVIAN, F.; MAIRESSESILUK, J. C. (2019). Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 157–169. doi: 10.1016/j.rser.2019.05.013

HAGEN, K. P. *Future of Utilities - Utilities of the Future.*, (2016). How Technological Innovations in Distributed Energy Resources will Reshape the Electricity Power Sector, by Fereidoon P. Sioshansi, (Ed). (Elsevier, 2016). XLIV plus 447 pages. ISBN 978-0-12-804249-6

DE FARIA JR, H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. (2017). Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 75, August 2017, Pages 469-475

ALHAMMAMI, H.; An, H. (2021). Techno-economic analysis and policy implications for promoting residential rooftop solar photovoltaics in Abu Dhabi, UAE, *Renewable Energy*, Volume 167,2021, Pages 359-368.

IBGE (2019). *Atlas do Censo Demográfico 2010*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro. Acesso em: 9 janeiro 2022

JUAREZ, A. A.; ARAÚJO, A. M.; ROHATGI, J. S.; OLIVEIRA FILHO, O. D. Q. (2014). Development of the wind power in Brazil; Political, social, and technical issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 39, 828–834.

KARAKAYA, E.; SRIWANNAWIT, P. (2015). Barriers to the adoption of photovoltaic systems: the state of the art. *Renewable Sustainable Energy Reviews* 2015; 49:60–6.

LOCATELLI, C. A. (2011). *Comunicação e Barragens: o Poder da Comunicação das Organizações e da Mídia na Implantação da Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó* (Ph.D.Dissertation). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MAH, D. N.; WANG, G.; LO, K.; LEUNG, M. K. H.; HILLS, P.; LO, A.Y. (2018). Barriers and policy enablers for solar photovoltaics (PV) in cities: Perspectives of potential adopters in Hong Kong. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92 (2018) 921–936

- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E.B. (2011) Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. *Energy Policy*, 39, 4378–4390.
- MIRANDA, R. F. C.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. (2015). Technical-economic potential of PV systems on Brazilian rooftops. *Renewable Energy*, 75, 694–713. doi:10.1016/j.renene.2014.10.037
- MOEZZI, M.; INGLE, A.; LUTZENHISER, L.; SIGRIN, B. O. (2017). A non-modeling exploration of residential solar photovoltaic (PV) adoption and non-adoption. <http://dx.doi.org/10.2172/1379469>.
- MOSER, D.; LOVATI, M.; MATURI, L. (2018). 2.8 - Photovoltaic City: Effective Approaches to Integrated Urban Solar Power, *Urban Energy Transition*, second edition, 313-333,
- NDC (2021). Nationally Determined Contribution Convention on Climate Change (UNFCCC).
- OLIVELLA, J.; DOMENECH, B.; CALLEJA, G. (2021). Potential of implementation of residential photovoltaics at city level: The case of London. *Renewable Energy* 180 (2021) 577-585.
- RAI, V.; SIGRIN, B. (2013). Diffusion of environmentally-friendly energy technologies: buy versus lease differences in residential PV markets. *Environ. Res. Lett.* 8 (2013) 014022.
- RAI, V.; ROBINSON, S. A. (2013). Effective information channels for reducing costs of environmentally friendly technologies: evidence from residential PV markets. *Environ. Res. Lett.* 8 (2013) 014044 (8pp) doi:10.1088/1748-9326/8/1/014044
- RATHORE, P. K. S.; CHAUHAN, D. S.; SINGH, R. P. (2018). Decentralized solar rooftop photovoltaic in India: On the path of sustainable energy security, *Renewable Energy* (2018), doi: 10.1016/j.renene.2018.07.049
- RIBEIRO, A. E. D.; AROUCA, M. C.; COELHO, D. M. (2016). Electric energy generation from small-scale solar and wind power in Brazil: the influence of location, area and shape. *Renewable Energy* 85, 554–563.
- SEMA - Secretaria de Meio Ambiente do Governo do Distrito Federal - (2016). Programa Brasília Solar quer instalar painéis fotovoltaicos em todas escolas públicas - Consultor de Segurança Eletrônica (diogenes-bandeira.com.br). Acesso em 26 setembro de 2022
- SOLARGIS. (2017). Brazil global horizontal irradiation. Yearly sum of global horizontal irradiation. Retrieved December 29, 2017, from (<https://solargis.com/assets/graphic/free-map/GHI/Solargis-Brazil-GHI-solar-resource-map-en.png>)

SOVACOOOL, B. K. (2009). Rejecting renewables: The socio-technical impediments to renewable electricity in the United States. *Energy Policy* 37, 4500–4513.

QURESHI, T. M.; ULLAH, K.; ARENTSEN, M. J. (2017). Factors responsible for solar PV adoption at household level: A case of Lahore, Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78, 754–763.

VASSEUR, V., KEMP, R. (2015). The adoption of PV in the Netherlands: a statistical analysis of adoption factors. *Renewable Sustainable Energy Review* 2015; 41: 483–94.

VILAÇA, P.; KNAK NETO, N.; CARVALHO, L.; SUMAILI, J.; SARAIVA, J.; DIAS, B. H.; MIRANDA, V.; DE SOUZA, S. M. (2018). Technical-economic analysis for the integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues, *Energy Pol.* 115(2018) 199-206.

WWF-BRASIL., (2016). *Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília*. Programa Mudanças Climáticas e Energia, Brasília, Distrito Federal.

WOLSINK, M. (2013). The next phase in social acceptance of renewable innovation. *EDI Q.* 5 (1), 8-13.

WUSTENHAGEN, R.; WOLSINK, M.; BURER, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: an introduction to the concept. *Energy Policy* 35, 2683–2691.

ZHAI, P.; WILLIAMS, E. D. (2012). Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. *Renewable Energy* 41, 350–357

## BLECAUTES EM REATORES NUCLEARES REFRIGERADOS A ÁGUA: 2A E 4A GERAÇÕES

Frederico Emidio Wu<sup>1</sup>  
Thadeu das Neves Conti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*

DOI: 10.47168/rbe.v29i2.748

### RESUMO

Com o acidente de Fukushima, em 2011, e as pressões social e política contra a energia nuclear em diversos países, projetos com maior segurança potencial se tornaram importantes para responder a uma das maiores preocupações acerca dessa fonte de energia. Assim, o presente artigo procura estabelecer uma comparação entre os reatores mais comuns no mundo, hoje, os refrigerados a água, e o equivalente mais avançado em desenvolvimento, o SCWR (*Supercritical Water Reactor*), da geração IV, por meio de uma pesquisa bibliográfica. Um blecaute na estação, por afetar a parte elétrica da usina, tem a maior probabilidade de anular as redundâncias de um reator da Geração II, e é este o foco do artigo. Estudos mostram que a intervenção humana ainda se faz necessária. A simplificação do projeto e uso de tecnologias desenvolvidas nos reatores da Geração III/III+ são as vantagens que o SCWR tem em termos de segurança, caso as lacunas de conhecimento acerca das interações da água supercrítica com os diversos componentes do reator sejam preenchidas. Estudos simplificados atestam a segurança do reator, porém os projetos requerem maturação e estudos mais completos.

Palavras-chave: SCWR; BWR; PWR; CANDU; Progressão de acidentes.

### ABSTRACT

After the Fukushima Daiichi nuclear disaster, in 2011, and growing political and social pressure against nuclear power in several countries, designs with great safety potential have become crucial to respond to concerns regarding this energy source. Therefore, the present article seeks to establish a comparison between the most common reactors in the world today, water reactors, and the most advanced of the type in development, the Generation IV SCWR (*Supercritical Water Reactor*),

through a documentary research. A station blackout, which affects the electrical systems of a power plant and therefore has the highest chance to nullify the redundancies of a Generation II reactor, is the focus of this article. Design simplification and technologies developed in reactors Generation III/III+ are the main advantages the SCWR possesses in terms of safety, if the knowledge gaps regarding supercritical water interactions with different reactor components are addressed. Simplified studies attest the concept's safety, but projects in development need to be refined with more complete studies.

Keywords: SCWR; BWR; PWR; CANDU; Accident progression.

## 1. INTRODUÇÃO

A geração elétrica nuclear começou a se disseminar no início dos anos 1960, quando os primeiros reatores nucleares comerciais entraram em operação, até aproximadamente meados da década de 1980, quando entrou em estagnação (WORLD NUCLEAR, 2021). Um período de renascimento começou na virada do século, mas se encerrou após o acidente nuclear de Fukushima, em 2011, o mais grave desde Chernobyl. Desde então, países como Alemanha e Itália têm adotado posições desfavoráveis à energia nuclear (DW, 2015) (BBC, 2015).

Hoje, 435 reatores nucleares comerciais operam no mundo, em 31 países (WORLD NUCLEAR, 2023). A maioria pertencente à Geração II, e os mais avançados à Geração III+. Em 2001, o Fórum Internacional da Quarta Geração (GIF), composto por 13 países, escolheu seis conceitos de reatores para substituírem os atuais (GIF FORUM, 2017). A pressão acerca da energia nuclear se concentra principalmente nas áreas de segurança e resíduos radioativos. Em 2011, um terremoto e subsequente tsunami no Japão causaram um blecaute total na usina de Fukushima, derrubando inclusive as baterias disponíveis, o que resultou no derretimento de três dos seis reatores da usina, liberação de material radioativo e evacuação de 154 mil pessoas. Pressões levaram a mudanças nos projetos dos novos reatores, atrasando a fase preparatória em alguns casos.

Com isso em mente, a pesquisa bibliográfica feita focou na comparação da segurança dos reatores da Geração IV com os mais abundantes, da Geração II. O ponto de interesse no artigo é apresentar e discutir os resultados de simulações de blecautes, encontrados em duas publicações. Um deles aborda reatores de água da Geração II, e o segundo, seu sucessor direto, da Geração IV. Com os resultados é possível demonstrar a diferença na capacidade dos reatores refrigerados a água da Geração IV de lidar com blecautes, comparando o desempenho com os reatores da Geração II.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Os resultados discutidos foram encontrados a partir de uma pesquisa bibliográfica feita em várias etapas. Primeiramente, o acidente de Fukushima, documentos da AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica) e da NRC (*Nuclear Regulatory Commission*), com foco nos conceitos de segurança. Com essas informações, finalmente, a pesquisa se voltou para os tipos de reatores nucleares refrigerados a água, das gerações II e IV, a fim de estabelecer uma comparação entre eles quanto à segurança.

Os reatores da Geração II pesquisados são:

- Reator de água pressurizada (PWR)
- Reator de água vaporizada (BWR)
- Reator de água pesada pressurizada (PHWR)

Enquanto o reator da Geração IV pesquisado é o:

- Reator de água supercrítica (SCWR).

O conceito de Defesa em Profundidade (DiD) é a forma como a segurança é organizada, com barreiras múltiplas, independentes e redundantes entre si, na medida do possível, arranjadas em níveis que vão da prevenção de falhas até a redução das consequências da liberação de material radioativo (OCDE, 2010) (OCDE, 2016).

É bom salientar quais fatores influenciam a segurança de um reator. A AIEA recomenda que se façam avaliações periódicas da segurança (PSR). Essas análises são feitas geralmente pelo próprio operador da usina e são revisadas pelo órgão regulador. A segurança física do reator, ou seja, contra atos maliciosos, fica à parte dessas análises devido à sensibilidade do tópico. Nas recomendações para as análises, 14 fatores de segurança são listados (AIEA, 2013).

Para a presente pesquisa, o foco foi o projeto das usinas. A discussão e conclusões se basearam em resultados probabilísticos e progressões de cenários postulados.

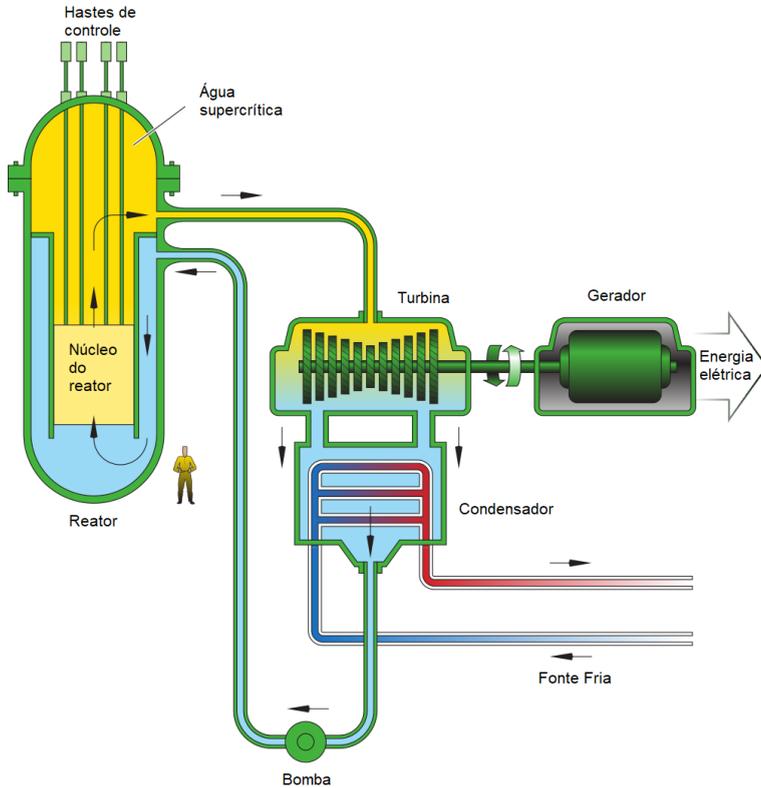


Figura 1 - Esquema geral de um SCWR

Como mostra a Figura 1 (WIKI, 2020), o SCWR utiliza um circuito único, assim como o BWR, porém, não necessita de separadores de vapor ou de um sistema de recirculação, simplificando o projeto da usina. Além disso, a água supercrítica inibe a formação de bolhas. O espaço liberado é utilizado para a implementação de sistemas passivos de refrigeração, podendo até dispensar inteiramente os sistemas ativos. Os sistemas dos projetos de SCWR em desenvolvimento se baseiam nas tecnologias implementadas na Geração III, como ABWR (*Advanced Boiling Water Reactor*) e ESBWR (*Economic Simplified Boiling Water Reactor*) (LEUNG, 2017), e têm como objetivo obter valores de CDF (Core Damage Frequency) abaixo de  $1E-5/RY$ , isto é, a possibilidade do núcleo do reator sofrer danos severos menor do que  $1E-5$  por ano de operação.

Os componentes do circuito onde a água se encontra no estado líquido podem usar os mesmos materiais e tecnologias dos reatores atuais, refrigerados a água. O mesmo não ocorre com os componentes

que entram em contato com a água supercrítica, como por exemplo as ligas de zircônio, devido à ação corrosiva da água. Outro desafio é entender o comportamento do reator, dadas as propriedades termodinâmicas da água supercrítica junto com um fluxo de nêutrons (IRSN, 2015).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Geração II

Os resultados de 75 IPEs (*Individual Plant Examination*) feitos em 1988, nos Estados Unidos, revelam o grau de segurança dos principais tipos de reatores da Geração II (DINGMAN et al., 1996). Um grande destaque foi dado à vulnerabilidade a blecautes. O resultado era esperado devido à dependência elétrica dos sistemas de refrigeração da época. Desde então os reatores vêm passando por atualizações visando um aumento da segurança contra blecautes. Estima-se que, antes desses esforços, 61 reatores tinham um CDF acima de  $2E-5$  devido a blecautes, por ano. Em 2005, todos os reatores haviam diminuído a contribuição de blecautes para abaixo desse patamar (DE CARVALHO et al., 2011). Análises probabilísticas simplificadas do SCWR canadense indicam que o reator é mais seguro do que a geração atual, com valores de CDF ao menos uma ordem de magnitude abaixo dos reatores atuais para cenários como LOCA (*Loss Of Coolant Accident*) e perda de energia (LEUNG, 2017).

Um estudo feito após o acidente de Fukushima demonstra a progressão de um blecaute em reatores típicos dos tipos BWR, PWR e PHWR. Os reatores utilizados nas simulações foram o OPR-1000 PWR, derivado dos reatores da *Combustion Engineering*, um BWR/4 da GE com contenção Mark I e um CANDU 6, com seus principais parâmetros descritos na Tabela 1, obtida da referência (PARK, 2012).

Utilizando programas similares para as simulações, ações humanas não foram levadas em conta a fim de descobrir qual a robustez dos sistemas dos reatores. Os eventos principais ocorreram como apresentado na Tabela 1 (PARK, 2012):

Tabela 1 - Progressão dos blecautes, em horas

Evento	PWR	CANDU 6	BWR
Baterias esgotadas	4,0	N/A	6,0
Válvulas de descompressão abertas	7,3	2,6	<0,1
Geradores de vapor secos	7,5	2,5	N/A
Núcleo descoberto	8,5	3,7	7,7

Tabela 1 - Progressão dos blecautes, em horas (cont.)

Evento	PWR	CANDU 6	BWR
Derretimento do núcleo (PWR, BWR); ruptura dos canais de combustível (CANDU 6)	10,2	4,1	8,9
Realocação do cório	11,7	6,4	11,8
Vaso ou calandria secos	11,9	12,8	12,0
Falha no vaso ou calandria	12,0	47,0	12,3
Falha na contenção ou no prédio do reator	113,1	28,2	17,9

Um resultado importante da simulação é o momento de início do derretimento do núcleo ou dos tubos de pressão. A partir desse ponto, o reator dificilmente pode ser recuperado e o investimento muito provavelmente estará perdido. Observa-se que, apesar do PWR ter uma certa vantagem nesse ponto, todos os reatores oferecem apenas algumas horas para os operadores atuarem.

O CANDU tem uma vantagem em relação aos reatores refrigerados a água leve. A calandria consegue manter a integridade do material dos tubos de pressão por quase quatro vezes mais em comparação aos vasos do BWR e PWR.

A falha na contenção indica quando os materiais radioativos podem ser liberados na atmosfera. Nesse ponto, o PWR demonstra uma larga vantagem em relação ao BWR e CANDU. O grande volume vazio na contenção e do refrigerante disponível, comparados aos outros reatores, se tornam vantagens no longo prazo e a contenção do PWR se mostra uma barreira mais robusta.

Os gráficos 1 a 5 (PARK, 2012) de pressão e temperatura dos núcleos dos reatores são particularmente interessantes para comparação com o SCWR.

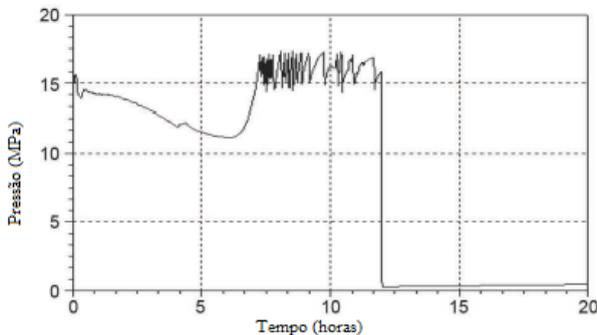


Gráfico 1 - Progressão da pressão no sistema de refrigeração (RCS) do reator PWR

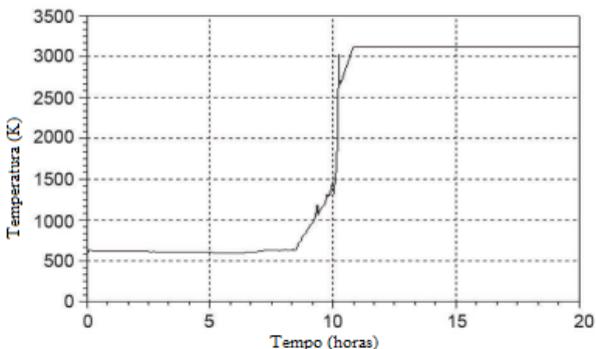


Gráfico 2 - Progressão da temperatura no nódulo mais quente do PWR

O perfil de pressão no Gráfico 1 mostra como o RCS funciona, diminuindo a pressão no vaso, já que outros sistemas de injeção de água não funcionam em altas pressões. A partir das 6,2 horas, quando o nível da água nos geradores de vapor começa a cair, a pressão no sistema de refrigeração (RCS) aumenta até que as válvulas de alívio começam a abrir e fechar intermitentemente. O núcleo eventualmente começa a derreter e o vaso falha às 12 horas. O gráfico de temperatura mostra como a refrigeração não é capaz de diminuir a temperatura do núcleo, mas apenas mantê-la estável, até que ele fica descoberto e começa a aquecer.

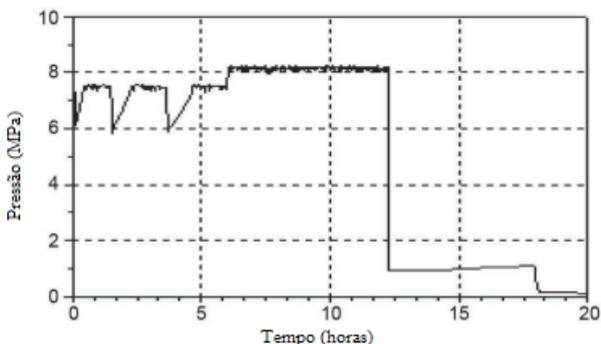


Gráfico 3 - Progressão da pressão no núcleo do reator BWR

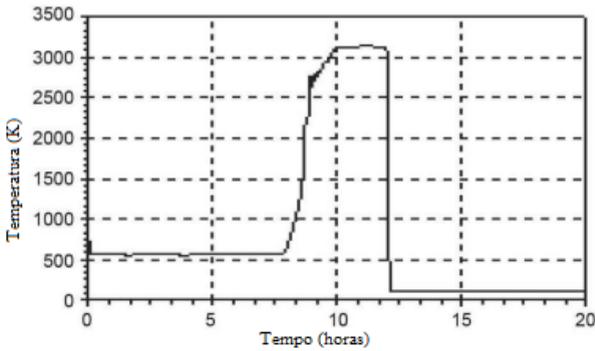


Gráfico 4 - Progressão da temperatura no nódulo mais quente do BWR

Os sistemas de refrigeração emergencial do BWR funcionam por 6 horas, injetando água no núcleo, enquanto as válvulas de alívio impedem a pressão de aumentar, como mostra o Gráfico 3. Após 6 horas sem a refrigeração, a pressão começa a aumentar e o nível da água a diminuir no núcleo, que fica descoberto e derrete, causando a falha do vaso na marca das 12,3 horas. Assim como no caso do PWR, a refrigeração emergencial apenas mantém a temperatura do núcleo estável enquanto acionada.

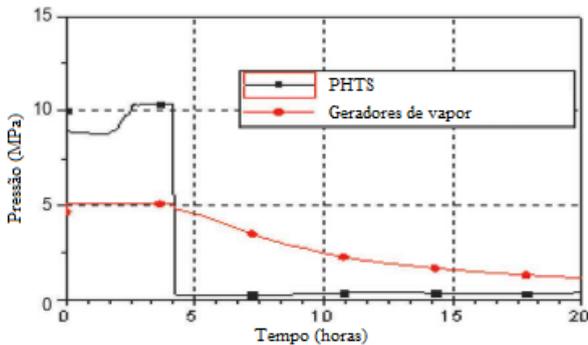


Gráfico 5 - Progressão da pressão no sistema primário de transporte de calor (PHTS) e geradores de vapor do CANDU

A pressão no PHTS do reator CANDU começa a aumentar quando os geradores de vapor secam, e a ruptura ocorre como mostra o Gráfico 5, na marca das 4,1 horas.

### 3.2 SCWR

O SCWR canadense é um projeto que combina as características de um BWR e do reator CANDU. Prevê o uso de apenas sistemas passivos para refrigeração de emergência, um para a água supercrítica refrigerante e outro para a água pesada usada como moderador, o ICS (*Isolation Condenser System*) e o PMCS (*Passive Moderator Cooling System*), respectivamente (GAUDET et al., 2013). O código CATHENA, desenvolvido pela estatal canadense AECL (*Atomic Energy of Canada Limited*), em 1985, e utilizado para análise dos reatores CANDU, foi utilizado em um modelo preliminar do reator para testar o funcionamento dos dois sistemas refrigeradores passivos (HUANG, 2014). De natureza determinística, o código simula um sistema termohidráulico através de um modelo unidimensional de dois fluidos, empregando seis equações diferenciais parciais para a conservação de massa, quantidade de momento e energia (HANNA, 1998), três para cada fase. O cenário testado foi de um blecaute parcial na usina, que prossegue das seguintes formas (HUANG, 2014):

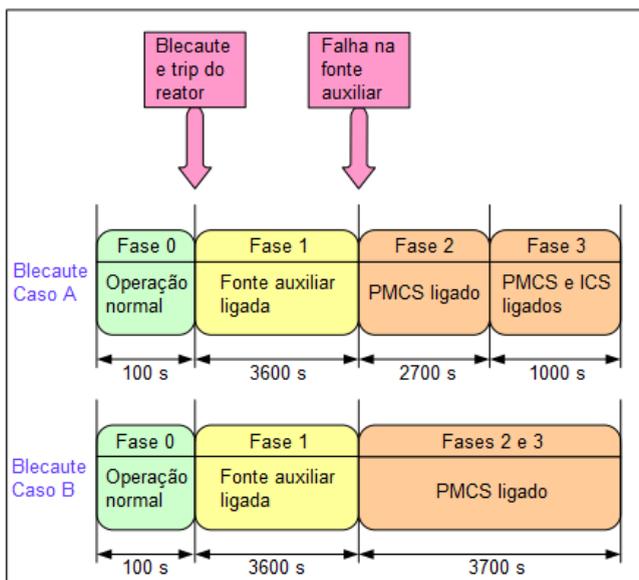


Figura 2 - Cronologia da simulação de um blecaute

- A fase 0 simula o reator operando em capacidade máxima, dura 100 s e termina com o blecaute.
- Na fase 1, o reator e as bombas principais de transporte de calor e refrigeração do moderador são desligados. As bombas auxiliares

passam a funcionar, com 10% da capacidade, movidas pela energia emergencial (geradores diesel ou turbinas), durante 3600 s.

- Na fase 2 as bombas auxiliares param de funcionar e o PMCS é ativado, enquanto o ICS permanece desativado devido a uma falha postulada na iniciação.

- A fase 3 separa o cenário em dois casos. No caso A, o ICS é ativado e funciona em conjunto com o PMCS. No caso B, o PMCS continua atuando sozinho.

O cenário progride como mostram os Gráficos 6 a 14 (HUANG, 2014).

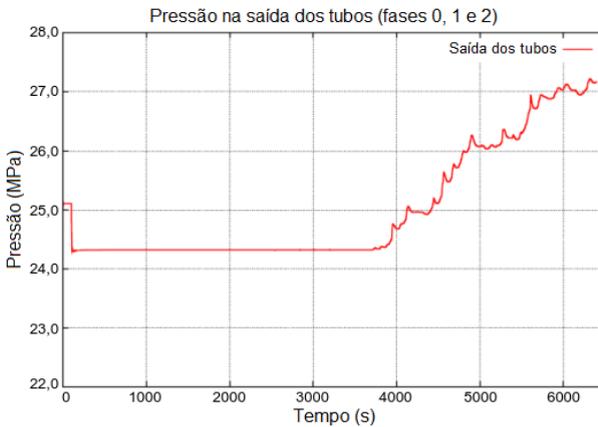


Gráfico 6 - Pressão nos tubos nas fases 0, 1 e 2

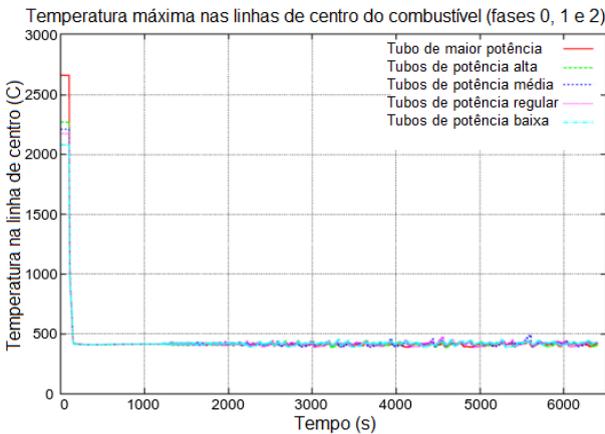


Gráfico 7 - Temperatura máxima nas linhas de centro do combustível nas fases 0, 1 e 2

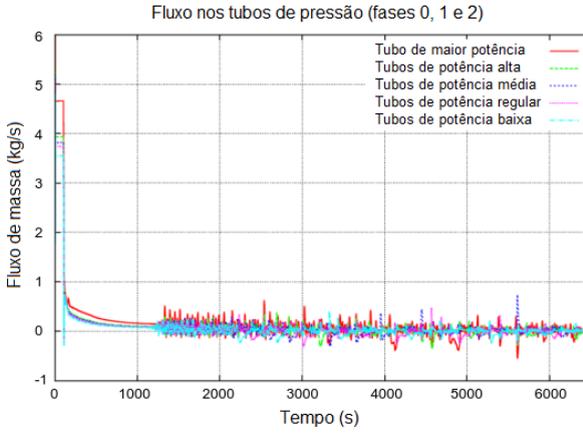


Gráfico 8 - Fluxo nos tubos de pressão nas fases 0, 1 e 2

Os resultados das fases 0, 1 e 2 mostram que as bombas auxiliares são capazes de manter o reator estável. Enquanto o PMCS funciona, apesar da temperatura do combustível ficar abaixo dos 500°C, a pressão nos tubos começa a subir.

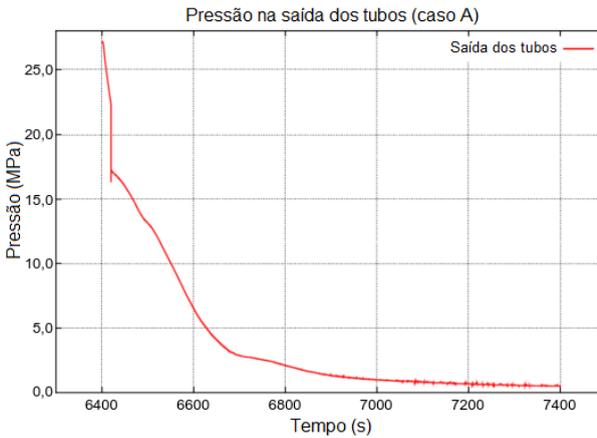


Gráfico 9 - Pressão nos tubos no caso A

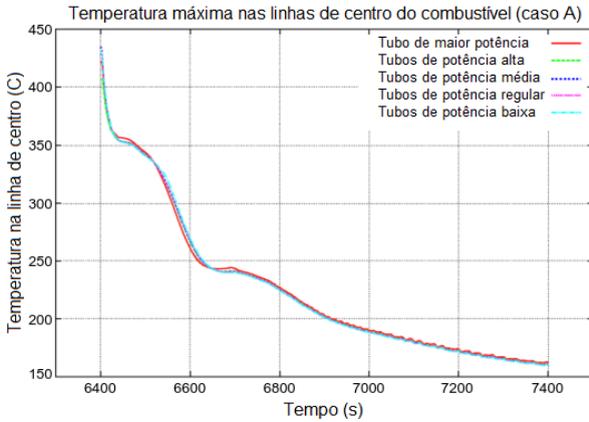


Gráfico 10 - Temperatura máxima nas linhas de centro do combustível no caso A

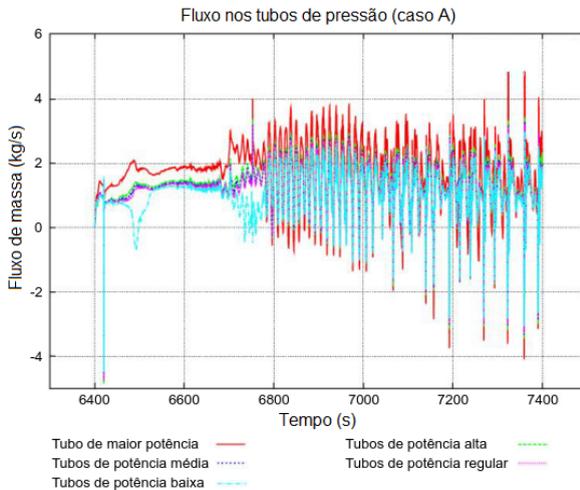


Gráfico 11 - Fluxo nos tubos de pressão no caso A

Os gráficos do caso A mostram que a introdução do ICS permite que a temperatura e pressão do reator caiam na maneira prevista em um desligamento bem-sucedido. Presume-se que continuariam caindo caso a simulação se estendesse.

O contraste entre os sistemas de refrigeração do SCWR canadense e os reatores da Geração II fica claro ao comparar os Gráficos 10 e 11 com os perfis de pressão e temperatura dos Gráficos 1, 2, 3, 4 e 5.

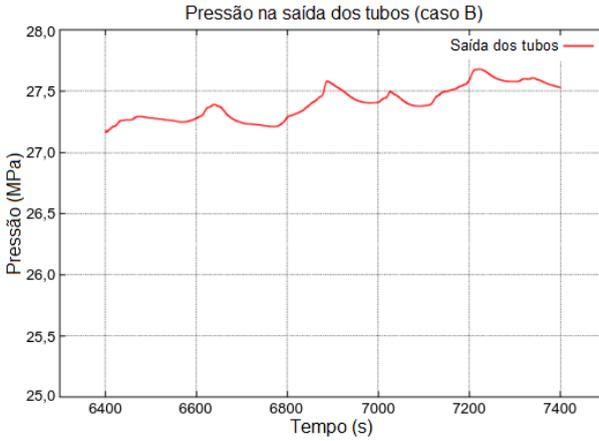


Gráfico 12 - Pressão nos tubos no caso B

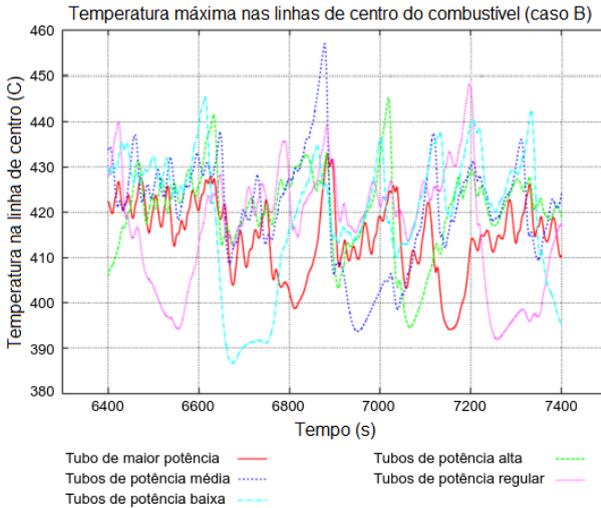


Gráfico 13 - Temperatura máxima nas linhas de centro do combustível no caso B

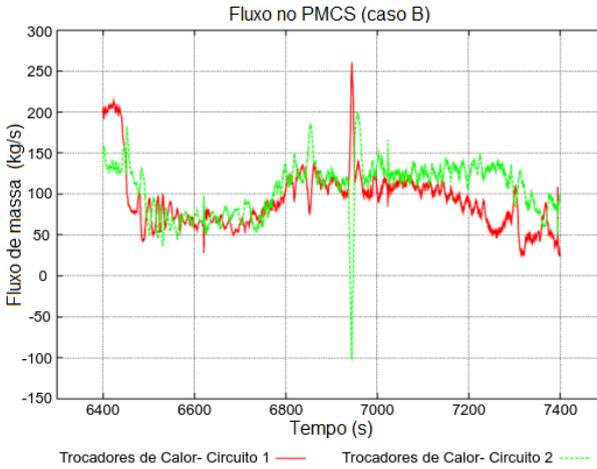


Gráfico 14 - Fluxo no PMCS no caso B

No caso B, o PMCS não é capaz de parar a elevação da pressão, que ultrapassa os 27,5 MPa na marca dos 6800 s (1,88 hora) após o começo do blecaute.

A diferença na efetividade dos dois sistemas de refrigeração é previsível, já que a água pesada refrigerada pelo PMCS não entra em contato com o combustível, refrigerando apenas o exterior dos tubos de pressão.

#### 4. CONCLUSÃO

O contraste entre as curvas de pressão e temperatura nos Gráficos 15 e 16 e aquelas dos Gráficos 3 a 7 demonstram a eficácia da refrigeração passiva do SCWR canadense comparada aos sistemas implementados na Geração II. Enquanto os sistemas de refrigeração dos reatores da Geração II conseguem apenas manter a temperatura e pressão do núcleo estáveis durante seu funcionamento, o ICS do SCWR canadense consegue efetivamente resfriar o reator. Devido à fase precoce em que se encontram os diversos projetos de SCWR, ainda há poucos resultados probabilísticos, porém, análises simplificadas indicam que o conceito é mais seguro do que os reatores atuais. Assim, o SCWR mostra ter um potencial para aprimorar a segurança além da Geração II, porém ainda existem muitas lacunas a serem preenchidas em seu desenvolvimento, especialmente em termos dos materiais utilizados nos núcleos dos reatores.

A simulação do SCWR feita dura apenas duas horas. Resta

saber como o reator se comportaria em cenários mais longos, a fim de verificar a robustez do ICS. O código CATHENA usado ainda não é capaz de simular a transição de fase da água entre os estados líquido e supercrítico. Além disso, o SCWR ainda é um conceito em desenvolvimento, sendo que seus componentes e sistemas podem sofrer alterações à medida que a predição das transferências de calor e corrosão associadas a uso de água supercrítica se aprimore.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro através do processo nº 2016/06664-6.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIEA. Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-25, IAEA. Vienna. 2013. Disponível em: <Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants | IAEA >. Acessado em: 21/01/2021.

BBC. Italy nuclear: Berlusconi accepts referendum blow. Disponível em: <Italy nuclear: Berlusconi accepts referendum blow - BBC News>. Acessado em: 21/01/2021.

DE CARVALHO, L. S. et al. Station Blackout Core Damage Frequency Reduction-The Contribution of an AC Independent Core Residual Heat Removal System. Proceedings of an International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21. Century. 2011.

DEUTSCHE WELLE (DW). German cabinet approves 2022 nuclear shutdown. Disponível em: <<http://www.dw.com/en/german-cabinet-approves-2022-nuclear-shutdown/a-15134028-1>>. Acessado em: 21/01/2021.

DINGMAN, S. E.; CAMP, A. L.; LACHANCE, J. L.; DROUIN, M. T. Core damage frequency perspectives based on IPE results. Sandia National Laboratories. University of North Texas Libraries, Digital Library e UNT Libraries Government Documents Department. Disponível em: <<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc664662/>>. Acessado em: 29/04/2019

GAUDET, M.; YETISIR, M.; HAQUE, Z. Physical aspects of the Canadian Generation IV supercritical water-cooled pressure-tube reactor plant design. Atomic Energy of Canada Limited, 2013.

GIF FORUM. Generation IV International Forum. Disponível em: <GIF Portal - Portal Site Public Home (gen-4.org)>. Acessado em: 21/01/2021.

HANNA, B. N. CATHENA: A thermalhydraulic code for CANDU analysis. Nuclear Engineering and Design, v. 180, n. 2, p. 113-131, 1998.

HUANG, X.; GAUDET, M.; YETSIR, M.; WANG, D.F.; WANG, S. Analysis of passive residual heat removal systems for the Canadian Supercritical Water-Cooled Reactor. Atomic Energy of Canada Limited (AECL-CW—126410-CONF-001), 2014.

IRSN. Review of Generation IV Nuclear Energy Systems. 2015. Disponível em: <Review of Generation IV Nuclear Energy Systems (irsn.fr)>. Acessado em: 10/07/2020.

LEUNG, L. Supercritical Water Reactors. Webinar series. 2017. 48 slides. Disponível em:<GIF Portal - Gen IV Webinar Series 7: Supercritical Water Reactors (SCWR), Laurence Leung (gen-4.org) >. Acessado em: 21/01/2021.

OCDE. Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources. Nuclear Development, OECD Publishing, Paris. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/9789264097995-en>>. Acessado em: 21/01/2021.

OCDE. Implementation of Defense in Depth at Nuclear Power Plants. Nuclear Regulation, OECD Publishing, Paris. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/9789264253001-en>>. Acessado em: 21/01/2021.

PARK, Soo-Yong; AHN, Kwang-II. Comparative analysis of station blackout accident progression in typical PWR, BWR, and PHWR. Nuclear Engineering and Technology, v. 44, n. 3, p. 311-322, 2012.

SUPERCritical WATER REACTOR. In: Wikipédia: a enciclopédia livre. [São Francisco, CA: Fundação Wikimedia], 2017. Disponível em: <Supercritical water reactor - Wikipedia>. Acessado em: 31/07/20.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power in the World Today. Disponível em: <Nuclear Power Today | Nuclear Energy - World Nuclear Association (world-nuclear.org)>. Acessado em: 03/05/2023.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Outline History Of Nuclear Energy. Disponível em: <History of Nuclear Energy - World Nuclear Association (world-nuclear.org) >. Acessado em 21/01/2021.

## DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES ELÉTRICOS PARA A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE LOCAL

Carla de Abreu D'Aquino<sup>1</sup>  
Fernando Réus da Rosa<sup>1</sup>  
Giuliano Arns Rampinelli<sup>1</sup>  
Luciano Lopes Pfister<sup>1</sup>  
Carlyle Bezerra de Menezes<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Universidade do Extremo Sul Catarinense

DOI: 10.47168/rbe.v29i2.780

### RESUMO

O presente artigo desenvolve uma metodologia para determinação do Índice de Sustentabilidade Local (ISL) incluindo parâmetros relacionados a qualidade de energia elétrica. O objetivo é adequar a inserção de aspectos elétricos na realidade de pequenas comunidades. Foi realizado um estudo de caso na comunidade de Balneário Ilhas, inserida no município costeiro de Araranguá, sul do estado de Santa Catarina, que se caracteriza como uma comunidade tradicional. A metodologia consiste da criação de índice de sustentabilidade baseado em indicadores, que incluem aspectos ambientais, socio econômicos e elétricos. A construção dos índices foi realizada com base em pesquisa bibliográfica e nas características da comunidade, obtidas a partir de visitas e questionários. O ISL obtido resultou da média aritmética dos Índices de Sustentabilidade Ambiental, Socio econômico e Elétrico, os quais apresentaram valores de 87,2, 49,9 e 59,1 respectivamente. Foi possível identificar um Índice de Sustentabilidade Local médio, o qual foi recalculado considerando um sistema fotovoltaico de geração distribuída residencial. O Índice de Sustentabilidade Elétrica obteve então um valor máximo, que refletiu em um incremento de 13,6% no ISL. Esse resultado demonstra o papel da energia elétrica na sustentabilidade local de pequenas comunidades, e reforça a importância dos ODS 7 e 11 da agenda 2030. O artigo contribui com a inserção de parâmetros elétricos residenciais em índices de sustentabilidade dedicados a pequenas comunidades.

Palavras-chave: Índice de Sustentabilidade; Comunidade tradicional; Energia elétrica, Energias renováveis.

## ABSTRACT

This article develops a methodology to determining the Local Sustainability Index (LSI) including parameters related to the quality of electricity. The objective is to adjust the insertion of electrical aspects in the reality of small communities. A case study was carried out in the community of Balneário Ilhas, located in the coastal municipality of Aranguá, in the south of the state of Santa Catarina, which is characterized as a traditional community. The methodology consists of creating a sustainability index based on indicators, which includes environmental, socio-economic and electrical aspects. The construction of the index was carried out based on bibliographical research and on the characteristics of the community, obtained from visits and questionnaires. The ISL resulted from the mean of the Environmental, Socioeconomic and Electric Sustainability Indexes, which presented values of 87.2, 49.9 and 59.1, respectively. It was possible to identify an average LSI, which was recalculated considering a residential distributed generation photovoltaic system. The Electric Sustainability Index then obtained a maximum value, which reflected in an increase of 13.6% in the ISL. This result demonstrates the role of electricity in the local sustainability of small communities, and reinforces the importance of SDGs 7 and 11 of the 2030 agenda. The article contributes with the inclusion of residential electrical parameters in sustainability indexes dedicated to small communities.

Keywords: Sustainability Index; Traditional Community; Electrical Energy, Renewable Energies.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo Moraes, Santos e Baldissera (2013), um dos caminhos encontrados para promover o desenvolvimento sustentável consiste em explorar as potencialidades das fontes renováveis de energia. A utilização de energia é essencial para o desenvolvimento da sociedade, pois a mesma é fundamental para a execução de muitas atividades no cotidiano. O uso de energia é inevitável para o desenvolvimento econômico e social, interferindo diretamente na qualidade de vida (LUCENA, OLIVEIRA e BEZERRA, 2015).

Atualmente, a palavra desenvolvimento está constantemente associada à palavra sustentabilidade. O desenvolvimento sustentável (DS) está apoiado em três pilares fundamentais (PURVIS, MAO e ROBINSON, 2019): a sustentabilidade econômica, a sustentabilidade social e a sustentabilidade ambiental (MENSAH, 2019). De acordo com Mensah (op cit), o conceito de DS procura a equidade intergeracional, que reconhece as implicações da sustentabilidade tanto no curto quanto no longo prazo, para atender às necessidades das gerações

atuais e futuras. Em 2015 foi proposto pelas Nações Unidas, na Plataforma da Agenda 2030, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS (UNITED NATIONS, 2015).

Considerando que a energia é um fator chave para a economia dos países, mas também exerce grande pressão sobre o meio ambiente, a sustentabilidade energética, conforme Grigoroudis et al. (2021), está relacionada ao fornecimento de serviços adequados, confiáveis e acessíveis de energia, em conformidade com os requisitos sociais e ambientais. Este conceito é alinhado ao Objetivo 7 (ODS 7 Energia limpa e acessível), e no contexto do presente estudo, ele também está alinhado com o Objetivo 11 (ODS 11 Cidades e Comunidades Sustentáveis), ambos propostos pela Organização das Nações Unidas na agenda 2030 (UNITED NATIONS, 2015).

De acordo com Molina (2019) os indicadores de sustentabilidade passaram a ser utilizados como instrumentos de mensuração com a finalidade de avaliar, monitorar e medir a situação atual de uma sociedade em relação aos objetivos pré-determinados. Os indicadores consistem em um conjunto de índices capazes de mensurar aspectos qualitativos e quantitativos das sociedades.

Pintér et al. (2012) detalharam os oito princípios de Bellagio (Visão orientadora; Considerações essenciais; Escopo Adequado; Estrutura e indicadores; Transparência; Comunicação Efetiva; Ampla Participação; Continuidade e capacidade) para avaliação e mensuração de sustentabilidade. Conforme de Oliveira Sartori e da Silva Siloto, (2013); Penteado e Duarte (2014), esses princípios norteiam a construção de indicadores de sustentabilidade. Diante desta perspectiva, é cada vez mais importante a idealização de métodos de mensuração que possam ser utilizados para uma análise sistemática de desenvolvimento socioeconômico e ambiental. Para McCool e Stankey (2004) os indicadores de sustentabilidade energética podem ser usados como ferramentas pelos formuladores de políticas públicas para avaliar o nível de sustentabilidade de diferentes áreas, setores e atividades de energia. Assim, as decisões políticas são importantes para implementar medições eficazes para alcançar o DS ao longo do tempo (HEZRI e HASAN, 2004).

Os indicadores elétricos têm sido utilizados para comparação do DS entre países (NARULA e REDDY, 2016; SHAH et al. 2019; RAZMJOO, SUMPER e DAVARPANAH, 2019), por meio de índices complexos, de forma que não é possível replicar esses métodos em pequenas localidades (, por exemplo, vilas com menos de 1000 habitantes). Assim, o presente trabalho desenvolve uma metodologia inovadora, que abrange indicadores elétricos para estimar o Índice de DS de pequenas localidades. Uma contribuição relevante desse conjunto de indicadores com uma escala adequada a pequenas comunidades é que ele pode ser replicado. No caso da localidade na qual foi desenvol-

vido o presente estudo, ela corresponde a uma comunidade que possui ainda uma forte presença de pescadores e pescadoras artesanais, os quais por meio de suas práticas e saberes tradicionais contribuem para o uso e conservação dos recursos naturais de forma sustentável.

Na perspectiva da sustentabilidade, o envolvimento comunitário na elaboração, implementação e avaliação de projetos de desenvolvimento e gestão de recursos naturais, abre espaço para o desenvolvimento de forma participativa, com o objetivo de buscar a sustentabilidade no uso dos recursos, com a valorização do conhecimento comunitário e saberes dos povos tradicionais. O saber local muitas vezes dialoga com o saber dominante em um processo que culmina com a hibridização dos saberes para construir suas formas de resistência. Ao valorizar o lugar com o seu conhecimento local, possibilita-se uma contraposição ao discurso dominante que a economia desenvolvimentista encontrou nas últimas décadas (DIEGUES e VIANA, 2004; VIEIRA et al, 2010).

Descentraliza-se assim a fala do desenvolvimento como apenas crescimento econômico e volta-se o olhar para outras dimensões presentes no lugar, tais como gênero, raça, etnia, relação com a natureza. Esta perspectiva configura-se como um processo em construção na busca de alternativas ao atual modelo hegemônico de desenvolvimento, por meio de uma relação solidária, equitativa e justa entre as pessoas e em suas relações com a natureza. Diante dos efeitos cada vez mais frequentes das mudanças climáticas e da evolução dos processos de degradação ambiental em escala local, regional e global, vários autores vêm apontando para a urgente necessidade de mudanças de paradigmas nos modos atuais de produção e consumo, a partir da perspectiva e do olhar sobre as relações históricas dos povos e comunidades tradicionais existentes nos países periféricos do hemisfério Sul (ACOSTA e BRANDT, 2018; SANTOS, 2019). Neste contexto, o uso de energias limpas e renováveis, tais como sistemas fotovoltaicos de geração distribuída, aponta para a perspectiva de uma significativa contribuição para a sustentabilidade socioambiental de uma comunidade tradicional da pesca artesanal, que vem sofrendo nos últimos anos a pressão devido à ocupação desordenada do território, à especulação imobiliária e ao turismo de massa, a exemplo da localidade deste estudo.

O artigo apresenta a metodologia em detalhes, um estudo de caso que englobou aspectos qualitativos de percepção de uma comunidade, e informações quantitativas para investigar a influência de indicadores elétricos na determinação da sustentabilidade. Para tal, foram levantados dados ambientais, elétricos, sociais e econômicos na comunidade de Balneário Ilhas, na região costeira do município de

Araranguá, Santa Catarina, Brasil.

## 2. METODOLOGIA

Conforme Diegues & Arruda (2001), as comunidades tradicionais podem ser caracterizadas pela relação com recursos naturais com os quais constroem seu modo de vida, pelo profundo conhecimento da natureza, que é transmitido de geração a geração, a partir da oralidade; pela noção de território e espaço; pela ocupação do mesmo território por várias gerações; pela importância das atividades de subsistência; entre outras. Comunidades tradicionais e pequenas localidades estão muitas vezes inseridas em locais de natureza ímpar, como a zona costeira.

A relação entre os serviços ambientais fornecidos pelo meio ambiente na qual estão inseridas, o modo de vida da comunidade e o seu desenvolvimento precisam estar em equilíbrio dinâmico. Isso é, manter uma sustentabilidade forte, as tradições do modo de vida da comunidade e possibilitar seu desenvolvimento. Comunidades tradicionais estudadas na zona costeira do Brasil, normalmente, carecem de acesso à energia elétrica de qualidade e demais serviços públicos (MENEZES et al. 2019) como água encanada, tratamento de esgoto e vias de acesso.

A operacionalização do conceito de DS na construção de indicadores não ocorre de forma imparcial (GUIMARÃES e FEICHAS, 2009); no entanto, sendo o DS multidimensional (STOFFEL e COLOGNESE, 2015), cada proposta de indicador deve tentar incluir ao máximo os aspectos que representam a realidade de determinado local. Dessa forma, a proposta de desenvolvimento de um Índice de Sustentabilidade Local (ISL) se faz necessário para considerar a realidade das pequenas comunidades, que muitas vezes são comunidades tradicionais. Um único indicador pode estar atrelado a diversas variáveis e, assim, um conjunto de variáveis foi organizado em índices e o conjunto de índices em indicadores. Os indicadores por fim, fornecem informações relevantes que podem auxiliar na tomada de decisão sobre o desenvolvimento de comunidades locais. A partir dessa consideração se estabeleceu a proposta metodológica para uma avaliação de sustentabilidade em uma localidade tradicional, onde seja possível aliar a questão energética local aos pilares de desenvolvimento sustentável.

A pesquisa utilizou diferentes abordagens no levantamento de dados, incluindo conversas com os moderadores, questionários, levantamento bibliográfico, informações do poder público, análise de dados cartográficos e visitas de campo para registros fotográficos. A proposta metodológica apresentada foi desenvolvida no estudo de Rosa (2019) e aprimorada no presente artigo. É inovadora, uma vez que adaptou indicadores de sustentabilidade já conhecidos à realidade de pequenas localidades e, incluiu variáveis elétricas na composição do ISL.

## 2.1 Determinação do Índice de Sustentabilidade Ambiental

O Índice de Sustentabilidade Ambiental (ISA) foi obtido por meio da Equação 1. Os indicadores e suas variáveis foram estabelecidos com base nas características de comunidades tradicionais, considerando a pressão que exercem sobre o meio físico com relação a uso do solo, utilização de recursos naturais e destinação adequada de resíduos líquidos e sólidos (ROSA, 2019).

$$ISA = \frac{IO + CR + STES + AA + URN}{5} \quad (1)$$

Na qual, IO representa o indicador de ocupação; CR, a coleta de resíduos; STES, o sistema de tratamento de esgoto sanitário; AA, abastecimento de água e; URN, o uso de recursos naturais. Assim, o ISA com valor igual a 100 equivale a uma localidade com alta sustentabilidade ambiental, e um ISA próximo de 0, a um local com tendência a uma baixa sustentabilidade ambiental.

Os critérios que compõem o ISA seguiram o embasamento proposto por Pereira, Sauer e Fagundes (2016), os quais estabelecem uma metodologia para o estado do Mato Grosso do Sul e formam um conjunto de informações que possibilita delinear a qualidade ambiental de determinada região. Os indicadores que consideram taxas de ocupação regular, coleta de resíduos, acesso a tratamento de esgoto e abastecimento de água foram considerados por Réus e Andion (2018) para estimar a dimensão ambiental dos indicadores de sustentabilidade dos municípios catarinenses.

O indicador IO (Equação 2) consiste na utilização de uma carta de uso do solo a qual é conflitada com as áreas de proteção ambiental de determinada região (ROSA, 2019). O critério para a identificação de construções em Áreas de Preservação ou protegidas obedeceu ao Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012). Foi realizada a verificação das residências que estão inseridas em locais inadequados, seja em áreas de reserva legal, preservação permanente ou áreas de risco de inundação.

$$IO = \frac{RR.100}{NTR} \quad (2)$$

Onde RR corresponde ao número de residências em áreas regulares e, NTR ao número total de residências da área. Quanto mais próximo do valor 100, maior o número de ocupações em áreas permitidas.

Para avaliação do indicador Coleta de Resíduos (CR), foram obtidos dados junto à prefeitura do município em estudo e por meio de questionários aplicados aos moradores. O indicador CR foi obtido pela Equação. 3.

$$CR = \frac{RA \cdot 100}{NTR} \quad (3)$$

Considerando RA o número de residências atendidas por sistema de coleta de resíduos.

O Sistema de tratamento de esgoto sanitário (STES), Equação 4, foi avaliado de acordo com a NBR 13969 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), a qual define os parâmetros para unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos. Foram considerados sistemas adequados aqueles que estiverem dentro das normas. As residências que não utilizam nenhum tipo de tratamento para seus efluentes, lançando-os diretamente no solo ou recursos hídricos locais, foram consideradas inadequadas.

$$STES = \frac{RA \cdot 100}{NTR} \quad (4)$$

Na qual, RA corresponde ao número de residências atendidas com sistema de tratamento de esgotamento sanitário.

O diagnóstico do indicador AA foi construído a partir de dados coletados juntamente à fornecedora de água para o local de estudos e pela aplicação de questionário (ROSA, 2019). Foram consideradas atendidas pelo abastecimento de água as residências que possuem ligação com o ramal de distribuição da fornecedora do município, e não atendidas aquelas que utilizam outras formas de captação, como poços, por exemplo.

O indicador de Abastecimento de Água foi obtido por meio da Equação 5.

$$AA = \frac{RA \cdot 100}{NTR} \quad (5)$$

Onde RA é o número de residências atendidas pelo sistema de abastecimento de água municipal.

A definição do indicador Uso de Recursos Naturais (URN) foi obtida por meio de questionários, buscando compreender as principais relações dos moradores com os recursos naturais locais. Foram considerados mais sustentáveis aqueles que utilizam os recursos naturais como meio de sobrevivência, a exemplo da pesca artesanal e lazer, as quais exercem menos pressão sobre o meio ambiente (ROSA, 2019).

Os parâmetros para o indicador URN receberam valores de acordo com a Tabela 1, e foram multiplicados pelo número de famílias que interagem com cada um, conforme a Equação 6. O parâmetro referente aqueles moradores que afirmaram não utilizar ou interagir com os recursos naturais locais foi atribuído um valor um, uma vez que não há interação positiva ou negativa. O turismo foi considerado atividade de interação com impacto negativo. Conforme o relato dos moradores, durante a alta temporada a população triplica, exercendo grande pressão sobre os recursos naturais e serviços da comunidade. Assim, foi atribuído um menor valor a esse parâmetro.

Tabela 1 - Valor dos parâmetros que compõem o indicador URN

Categoria (n)	Uso dos Recursos Naturais	URN <sub>n</sub>
1	Pesca Artesanal	100
2	Lazer	100
3	Turismo	50
4	Não se relaciona com os recursos naturais locais	1

$$URN = \frac{\sum N_n \cdot URN_n}{NP_{am}} \tag{6}$$

Sendo N<sub>n</sub> o número da categoria “n”, URN<sub>n</sub> o valor do parâmetro para a respectiva categoria, e NP<sub>am</sub> o total de pessoas avaliadas na amostra. Destaca-se que durante a aplicação do questionário cada morador só poderia escolher uma das opções de interação com os recursos naturais

Dentre os critérios desenvolvidos buscou-se um enquadramento da realidade do local, de forma que a verificação do ISA como macro indicador de desenvolvimento pudesse considerar os aspectos mais relevantes para definição de sustentabilidade de pequenas comunidades.

## 2.2 Determinação do Índice de Sustentabilidade Socioeconômico

De acordo com Soligo (2012), a utilização da informação como instrumento de interpretação da realidade social requer a criação de meios de quantificação de alguns aspectos importantes dessa realidade de forma clara e simplificada. Assim, para obtenção do diagnóstico socioeconômico o Índice de Sustentabilidade Socioeconômico (ISS) foi obtido por meio da Equação 7. A escolha dos critérios que compõem o ISS foi embasada em Rabelo e Lima (2008), os quais desenvolveram uma metodologia de indicadores de sustentabilidade e destacaram como principais variáveis do meio socioeconômico: trabalho e renda, bem como suas derivações.

$$ISS = \frac{MR + TR + FR + RD}{4} \quad (7)$$

Onde MR é o número de moradores por residência; TR, número de moradores que trabalham por residência; FR, fonte de renda e; RR é a renda. Os valores para cada um destes indicadores foram obtidos a partir dos questionários aplicados durante as visitas a comunidade. Um ISS de valor 100 corresponde a uma localidade com alta sustentabilidade socioeconômica, enquanto os valores próximos a 0 indicam uma baixa sustentabilidade.

Os indicadores que compõem o ISS foram obtidos pela combinação de dados obtidos através de questionário e dados fornecidos pela prefeitura do município. O indicador MR foi calculado pela Equação 8 e objetivou identificar a permanência de pessoas na comunidade após a idade adulta. Neste caso, consideram-se sustentáveis comunidades onde não há migração maciça de membros da família para busca de oportunidades em outros locais (ROSA, 2019).

Comunidades que apresentam um número reduzido de famílias com poucos membros tendem ao decréscimo da população local, levando a uma regressão de fatores econômicos e sociais, o que pode representar uma baixa sustentabilidade local. Desta forma, comunidades com mais pessoas por residência tendem a ter maior sustentabilidade socioeconômica. Foram atribuídos valores para diferentes números de moradores por residência, considerando essas quantidades como variáveis, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Valores do indicador MR (Moradores por Residência)

<b>Categoria (n)</b>	<b>Moradores por Residência</b>	<b>MR<sub>n</sub></b>
5	Acima de quatro moradores	100
4	Quatro moradores	80
3	Três moradores	60
3	Dois moradores	40
1	Um morador	20

$$MR = \frac{\sum NR_n \cdot MR_n}{NR_{am}} \quad (8)$$

Sendo  $NR_n$  o número de residências na categoria “n”,  $MR_n$  o valor do parâmetro para a respectiva categoria, e  $NR_{am}$  o total de residências avaliadas na amostra.

O indicador TR (Equação 9) buscou estimar as oportunidades de geração de renda dentro da própria comunidade, o que pode evidenciar uma maior possibilidade de oportunidades locais. Considera-se que quanto mais pessoas trabalham dentro de cada residência, maior é o poder econômico e a tendência de sustentabilidade (ROSA, 2019). Os valores atribuídos a cada variável desse indicador são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valor atribuído às variáveis para o indicador TR

<b>Categoria (n)</b>	<b>Número de moradores que trabalham por residência</b>	<b>TR<sub>n</sub></b>
5	Mais que três moradores trabalham	100
4	Três moradores trabalham	80
3	Dois moradores	60
2	Um morador trabalha	40
1	Nenhum morador trabalha	20

$$TR = \frac{\sum NP_n \cdot TR_n}{NP_{am}} \quad (9)$$

Onde  $NP_n$  o número de pessoas na categoria “n”,  $TR_n$  o valor do parâmetro para a respectiva categoria, e  $NP_{am}$  o total de pessoas avaliadas na amostra.

Uma avaliação qualitativa das ofertas de trabalho disponíveis na comunidade foi realizada por meio do indicador FR expresso na

Equação 10. Um aspecto de pertencimento está relacionado ao envolvimento das pessoas com o local onde vivem. Assim, oportunidades de renda dentro da comunidade tradicional favorecem a sustentabilidade da mesma, e o trabalho fora da comunidade traduz uma baixa sustentabilidade. A aposentadoria, apesar de ser um fator relevante para a manutenção da economia local, foi considerado uma fonte de renda externa (ROSA, 2019).

A pesca é uma atividade importante na comunidade estudada e está diretamente relacionada ao indicador fonte de renda. No entanto, a atividade é artesanal, demanda profissionais autônomos, não agregando geração de emprego e renda a maiores núcleos. Já o comércio local gera um consumo cíclico de bens, materiais e renda, o que pode ser um fator determinante para evitar a migração de pessoas e atrair novos moradores. A Tabela 4 lista as variáveis para o indicador FR e os respectivos valores atribuídos.

Tabela 4 - Variáveis para o indicador FR e os valores atribuídos

<b>Categoria (n)</b>	<b>Fonte de Renda</b>	<b>FR<sub>n</sub></b>
4	Comércio Local	100
3	Pesca	75
2	Aposentadoria	50
1	Trabalho Fora da Comunidade	25

$$FR = \frac{\sum N_n \cdot FR_n}{NP_{am}} \quad (10)$$

Sendo  $N_n$  o número da categoria "n",  $FR_n$  o valor do parâmetro para a respectiva categoria, e  $NP_{am}$  o total de pessoas avaliadas na amostra.

Por fim, o indicador de renda por residência (RR) foi obtido considerando o número de salários mínimos por residência (Equação 11). Os valores atribuídos às variáveis estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis e valores atribuídos para o indicador RD

<b>Categoria (n)</b>	<b>Renda mensal</b>	<b>RR<sub>n</sub></b>
5	Acima de 4 Salários Mínimos	100
4	Até 4 Salários Mínimos	80
3	Até 3 Salários Mínimos	60
2	Até 2 Salários Mínimos	40
1	Até 1 Salário Mínimo	20

$$RR = \frac{\sum N_n \cdot RR_n}{NP_{am}} \quad (11)$$

Na qual  $N_n$  o número da categoria “n”,  $RR_n$  o valor do parâmetro para a respectiva categoria, e  $NP_{am}$  o total de pessoas avaliadas na amostra.

### 2.3 Determinação do Índice de Sustentabilidade Elétrica

Segurança Energética Sustentável (SES) é definida como “aprovisionamento de serviços de energia ininterruptos de forma acessível, equitativa e eficiente, e ambientalmente benigna” (NARULA, 2014; NARULA e REDDY, 2016). Esses autores propuseram um índice para medir a SES em países em desenvolvimento, no qual incluíram indicadores relacionados ao uso doméstico de energia, incluindo os recursos naturais e econômicos, emissões e resíduos e perdas de energia. Grigoroudis et al. (2021), em seu estudo de indicadores de sustentabilidade de energia, também definiram parâmetros para classificar países. A maior parte dos trabalhos que relacionam sustentabilidade, energia e eletricidade abrange a larga escala.

O presente trabalho procurou inovar na inclusão da energia dentro do desenvolvimento sustentável, e assim propor um Índice de Sustentabilidade Elétrica (ISE) de forma simples, considerando aspectos relevantes no dia a dia de uma residência em uma localidade pequena. Esse fator comporá o ISL de uma comunidade, a fim de fornecer parâmetros que podem ser monitorados ao longo do tempo e auxiliar na trajetória para manter as comunidades tradicionais crescendo em equilíbrio com o meio ambiente.

O diagnóstico do fornecimento de energia elétrica objetivou a obtenção de dados da percepção da população local com relação à energia elétrica fornecida pela distribuidora. Desta forma, o ISE foi obtido por meio da Equação 12.

$$ISE = \frac{ANEE + FIF + FFEE}{3} \quad (12)$$

Onde ANEE corresponde a um indicador de Atendimento das Necessidades de Energia Elétrica com relação a atual disponibilidade; FIF, Frequência da Interrupção do Fornecimento e FFEE, a Falhas no Fornecimento de Energia Elétrica.

A escolha dos critérios que compõem o ISE foi inspirada no ODS 7, o qual relaciona desenvolvimento sustentável a um acesso

universal à energia, de custo razoável, confiável e limpa. Foi também concentrada em parâmetros elétricos que influenciam a vida dos moradores de forma direta nas suas residências. Assim, um ISE de valor 100 equivale a uma localidade com alta sustentabilidade elétrica, enquanto os valores próximos a zero indicam uma baixa sustentabilidade elétrica.

O indicador ANEE, Equação 13 procurou quantificar a satisfação do morador com relação à qualidade de energia fornecida. Os valores foram definidos conforme a sensação de atendimento da demanda de energia elétrica pelos moradores da comunidade (Tabela 6). Quando o morador julga que o sistema atual de fornecimento não atende à demanda necessária para o desenvolvimento de suas atividades diárias, há indicação de menor sustentabilidade.

Tabela 6 - Variáveis e seu valores para o cálculo do indicador ANEE

Categoria (n)	Atendimento das necessidades de energia elétrica	ANEE <sub>n</sub>
1	Atendimento Suficiente	100
2	Atendimento Insuficiente	75
3	Atende com Falhas	50
4	Não Atende	25

$$ANEE = \frac{\sum N_n \cdot ANEE_n}{NR_{am}} \quad (13)$$

Sendo  $N_n$  o número da categoria “n”,  $ANEE_n$  o valor do parâmetro para a respectiva categoria, e  $NR_{am}$  o total de residências avaliadas na amostra.

O FIF avalia a percepção dos moradores quanto à frequência na interrupção do fornecimento de energia elétrica na comunidade. Desta forma, quanto mais frequente são as interrupções no fornecimento, menos sustentável é o sistema atualmente disponível (Tabela 7). O FIF foi obtido segundo a Equação 14.

Tabela 7 - Variáveis e valor atribuído para FIF

Categoria (n)	Frequência na Interrupção do fornecimento	FIF <sub>n</sub>
1	Não Ocorre	100
2	Raramente Ocorre	75
3	Periodicamente Ocorre	50
4	Frequentemente Ocorre	25

$$FIF = \frac{\sum N_n \cdot FIF_n}{NR_{am}} \quad (14)$$

Onde FIFn o valor do parâmetro para a respectiva categoria.

A forma como as quedas de energia impactam na qualidade de vida da comunidade e na economia foi mensurada através do FFEE. A Tabela 8 apresenta as variáveis consideradas e seus valores, e a Equação 15 apresenta o cálculo do índice.

Tabela 8 - Valores do indicador FFEE  
(Falhas no Fornecimento de Energia Elétrica)

Categoria (n)	Falhas no Fornecimento de Energia Elétrica	FFEE <sub>n</sub>
1	Não afetam a qualidade de vida e economia	100
2	Às vezes afetam a qualidade de vida e economia	75
3	Frequentemente afetam a qualidade de vida e economia	50
4	Sempre afetam a qualidade de vida e economia	25

$$FFEE = \frac{\sum NR_n \cdot FFEE_n}{NR_{am}} \quad (15)$$

Sendo FFEE<sub>n</sub> o valor do parâmetro para a respectiva categoria.

De acordo com Borba e Gaspar (2010), um acesso à energia de qualidade é essencial para o desenvolvimento sustentável. O ISE quantifica a relação entre o acesso à energia elétrica de qualidade e o desenvolvimento, conforme a realidade vivida pela comunidade. Assim, considera-se importante levantar junto à comunidade sua opinião quanto a possibilidade de melhorias no fornecimento de energia elétrica.

Foi proposto então o indicador de Sistemas Complementares de Energia Elétrica (SCEE), calculado por meio da Equação 16, com as variáveis mostradas na Tabela 9. Esse indicador buscou retratar a percepção da comunidade perante uma eventual proposta de sistema de geração distribuída de energia elétrica e, se este sistema traria benefícios econômicos e qualidade de vida local.

Tabela 9 - Variáveis e valores para o índice Sistemas Complementares de Energia - SCEE

Categoria (n)	Sistemas Complementares de Energia Elétrica	SCEE <sub>n</sub>
1	Traria Benefícios Significativos	100
2	Traria Poucos Benefícios	75
3	Nada Mudaria	50
4	Traria Efeitos Negativos	25

$$SCEE = \frac{\sum N_n \cdot SCEE_n}{NP_{am}} \quad (16)$$

Onde  $N_n$  é o número da categoria “n”,  $RR_n$  o valor do parâmetro para a respectiva categoria, e  $NP_{am}$  o total de pessoas avaliadas na amostra.

Este indicador não foi utilizado no cálculo final do ISE, por representar a percepção a uma projeção futura, e não retratar a atual situação do sistema elétrico da comunidade. Mas representa um importante indicador para discutir a futura aceitação da comunidade a essa tecnologia renovável.

## 2.4 Índice de Sustentabilidade Local

A avaliação da sustentabilidade local foi estimada a partir do ISL, o qual foi composto pela média aritmética entre ISA, ISS e ISE, conforme a Equação 17.

$$ISL = \frac{ISA + ISS + ISE}{3} \quad (17)$$

A proposta é que cada um dos índices apresente o mesmo peso, sem que seja estabelecido uma hierarquia entre eles, de forma que ISA, ISS e ISE ocupem o mesmo nível de importância dentro do desenvolvimento sustentável em uma comunidade tradicional. Quando o ISL apresenta um valor próximo de 100, equivale a uma localidade com maior sustentabilidade, e quando ISL se aproxima de zero, representa a inexistência de sustentabilidade na comunidade

## 2.5 Estudo de caso

A localidade de Balneário Ilhas está situada à margem esquerda do rio Araranguá e é parte integrante do Distrito de Hercílio Luz, situado no município de Araranguá, Santa Catarina, conforme Figura 1,

adaptada de Cristiano et al. (2018). A comunidade possui uma população fixa de aproximadamente 270 pessoas, boa parte composta por aposentados, comerciantes locais e pescadores. Foi o núcleo de pesca que deu origem à localidade e que ainda apresenta suas características tradicionais. Balneário Ilhas está inserida na Área de Preservação Ambiental da Costa de Araranguá, criada pelo Município de Araranguá, através do Decreto Nº 7828, e faz interface com a RESEX do rio Araranguá (Decreto Nº 7830), remetendo a importância ecológica e ao capital ambiental da região.

Recentemente a Lei Complementar Municipal nº 0417/2022 revogou o Decreto nº 7.828/2016, que havia criado a Área de Proteção Ambiental (APA) da Costa de Araranguá, e alterou a Lei 7.829/2016, que havia criado o Monumento Natural (MONA) Morro dos Conventos, reduzindo substancialmente e em mais da metade a área desta unidade de conservação. No entanto, a Reserva Extrativista do Rio Araranguá foi mantida.

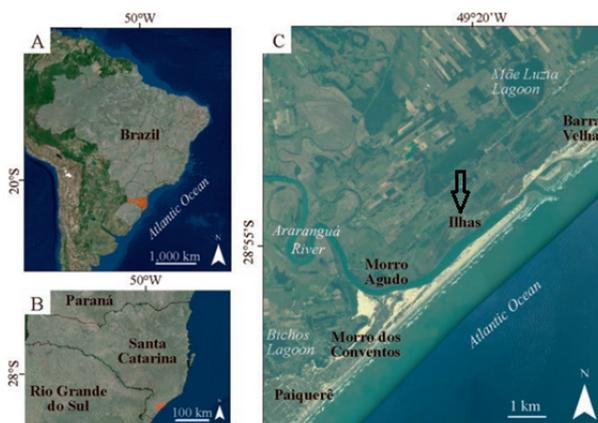


Figura 1 - Área de estudo

As belezas naturais contrastam com uma grande pressão físico-territorial. O uso dos recursos naturais locais como forma de subsistência tem dado lugar a uma crescente demanda exploratória por turismo. Ao mesmo tempo, observa-se uma demanda por manutenção de estradas, abastecimento de água, rede de coleta e tratamento de efluentes sanitários e melhorias no fornecimento de energia elétrica. A soma destes fatores faz com que quem visita Balneário Ilhas tenha a impressão de que a comunidade parou no tempo, apesar do grande potencial turístico da região.

A comunidade abriga casas simples e praticamente com pouca infraestrutura, nos meses de verão recebe grande quantidade de turis-

tas, com a população chegando 4.500 pessoas (de acordo com a associação de moradores). Os turistas dividem com os moradores fixos todos os recursos ambientais e infraestrutura disponíveis.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram realizadas duas visitas iniciais na comunidade de Balneário Ilhas contando com apoio das lideranças locais, como os representantes da Associação de Moradores de Balneário Ilhas e da Colônia de pesca. O objetivo das visitas preliminares foi apresentar os pesquisadores a comunidade e buscar identificar as principais necessidades destacadas pelos moradores. Nessa etapa as questões de qualidade de energia, evasão dos jovens da comunidade e acesso foram indicadas como prioritárias para a comunidade (ROSA, 2019).

As visitas à comunidade foram essenciais para o desenvolvimento dos questionários, os quais foram aplicados em três idas à comunidade, nos dias 24 de novembro, 09 e 17 de dezembro de 2018. Os questionários consistiram em pesquisa de opinião, sem identificação dos respondentes. Foram aplicados 53 questionários (53 famílias), atingindo cerca de 140 pessoas (51,8% da população fixa).

Para avaliar a qualidade da energia e do fornecimento de energia elétrica foi instalado um analisador de qualidade de energia elétrica, na residência de um morador na comunidade. O objetivo foi avaliar os parâmetros técnicos que definem a qualidade de energia elétrica disponibilizada pela empresa fornecedora da região do município de Araranguá. O analisador de qualidade de energia elétrica do fabricante IMS, modelo PowerNet P-600, foi posicionado logo após o medidor de consumo da residência, e antes da distribuição da carga na unidade consumidora. E foi configurado para registrar os dados de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente, componentes harmônicas e fator de potência em um intervalo de 10 minutos.

A coleta de dados foi realizada a partir do dia 17 de novembro de 2017, por doze dias ininterruptos. A obtenção dos dados técnicos foi utilizada para comparar com as informações obtidas através do questionário referentes ao sistema elétrico. As duas formas de avaliação da qualidade de energia devem representar a realidade da qualidade de distribuição de energia elétrica na comunidade.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 Índice de Sustentabilidade Ambiental**

A determinação do indicador IO foi resultado da combinação de visitas a campo com o geoprocessamento de imagens, o qual gerou mapa apresentado na Figura 2. A partir do desenho elaborado foi possível definir as linhas que demarcam as Áreas de Preservação Per-

manente (APP) e áreas alagáveis, e assim determinar o número de residências que ocupam áreas consideradas irregulares, de acordo com a legislação ambiental vigente (BRASIL, 2012). Essa informação foi também verificada durante as saídas de campo realizadas na comunidade, nas quais pode-se constatar que há uma grande quantidade de residências nessas áreas e as mesmas são ocupações já consolidadas (Figura 3).

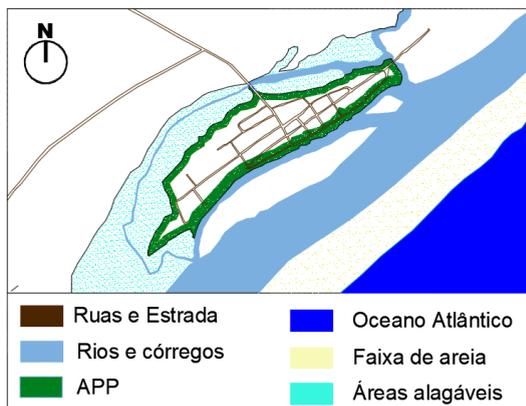


Figura 2 - Delimitação das Áreas de Preservação Permanente – APP

A comunidade possui um total de 327 residências, das quais 132 estão em áreas consideradas irregulares pela legislação, totalizando 40,3%. Dessa forma, o indicador de Ocupação calculado foi de 62,3, valor que representa um nível mediano de ocupações em situação ambiental sustentável. Esse indicador foi o mais baixo dentre os componentes do ISA; a interação destas ocupações irregulares com o ecossistema estuarino representa um impacto ambiental negativo.



Figura 3 - A – Ocupação irregular às margens do canal de ligação com a área de mangue (APP). B – Ocupação e deposição irregular de resíduos de construção civil em área de mangue (APP)



Figura 3 (cont.) - C – Aterro com resíduos de construção civil em APP para o estabelecimento de novas edificações. D – Ocupação irregular em área de APP do rio Morto

A composição dos valores dos demais indicadores ambientais foi obtida por meio de aplicação do questionário. O valor obtido para o indicador CR foi de 96,1, uma vez que das 53 residências visitadas, 51 são atendidas pelo sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares do município de Araranguá, com periodicidade de duas vezes por semana. As exceções são residências que se instalaram de maneira irregular no limite sul de Balneário Ilhas, onde o poder público não reconhece a ocupação.

Na avaliação para o atendimento pelo sistema de tratamento de esgoto sanitário municipal, o valor obtido de 98,1 foi porque apenas uma das residências pesquisadas não possui qualquer tipo de tratamento de efluentes. O sistema comum na comunidade é o uso do sistema fossa, filtro e sumidouro. Outro indicador bastante positivo foi o de AA, com valor igual a 100, pois todas as residências visitadas são abastecidas pelo sistema de água tratada do município. Esses fatores contribuíram para elevação do ISA.

Complementa o diagnóstico ambiental o indicador URN, no qual a pesca artesanal foi a forma de interação de destaque indicada por 49% dos respondentes. Seguida então pelo lazer com 26%. O comércio local foi indicado por cerca de 7% dos respondentes. O interessante foi que aproximadamente 17% dos respondentes indicaram não fazer qualquer tipo de uso ou interação com os recursos naturais (Figura 5). Assim, URN apresentou um valor final de 79,4. Menezes et al. (2019) também observaram em uma comunidade costeira essa relação próxima com a pesca artesanal, no entanto, conseguiram identificar certa vulnerabilidade da comunidade no acesso aos recursos naturais locais.

O ISA obtido foi de 87,2% e demonstra que a comunidade é atendida por um sistema de saneamento básico adequado, através de coleta de resíduos sólidos, abastecimento de água, disposição adequada de efluentes sanitários e uma relação sustentável com os recur-

tos naturais disponíveis na região.

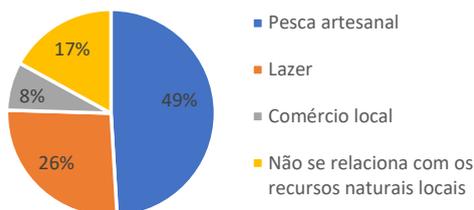


Figura 5 - Uso dos recursos naturais

No entanto, devido ao grande potencial natural, foi observada a ocorrência de uma expansão urbana desordenada, o que aumenta a pressão sobre as áreas que deveriam ser preservadas no ecossistema local, para manutenção dos serviços ambientais prestados. De acordo com de Carvalho e Barcellos (2009) “a economia ecológica, a sustentabilidade do capital natural é de especial importância, pois é ela que garante a existência de vida humana na Terra”.

Além do exposto acima, o ambiente estuarino recebe águas impactadas pela mineração de carvão (que ocorre a montante), pela presença de diversas cidades, pelas atividades de agricultura e criação de animais ao longo dos principais afluentes do rio Araranguá. Silvestrini e D’Aquino (2020) monitoraram ao longo de um ano o comportamento do estuário diante a influência destas atividades. Eles verificaram que na porção onde se insere a comunidade de Ilhas, o ecossistema ainda é capaz de atuar com um filtro de propriedades, entregando para o oceano uma água de qualidade. No entanto, essas pressões ambientais vão se somando e tendem a aumentar ao longo do tempo, e caso nenhuma medida de proteção seja realizada, em algum momento o ambiente poderá ficar saturado e não consiga mais atuar na manutenção da sua saúde.

### 3.2 Índice de Sustentabilidade Social

O número de moradores por residência indicou que predominam famílias com poucos membros (Figura 6); o indicador MR calculado foi de 50,9%. Conforme o líder da comunidade, existem cerca de 270 moradores fixos na comunidade, e esse fato aliado a um baixo número de moradores por residência, pode indicar uma baixa sustentabilidade social. A quantidade de membros que trabalham por família é baixa, e a presença de um número significativo de aposentados indi-

ca que não há oportunidades de geração de trabalho e renda dentro da comunidade (Figura 6). Dificultando a permanência de membros jovens na comunidade, os quais não encontram em seu meio condições para permanecer e manter a família. O indicador TR foi 46.

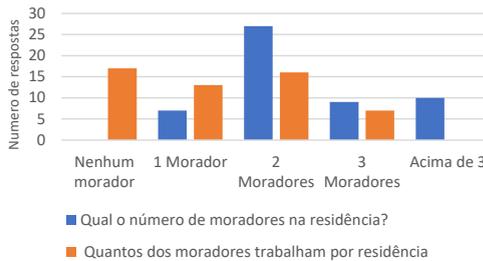


Figura 6 - Resultado da aplicação de questionário nas 53 famílias visitadas quanto ao número de moradores por residência e o número de moradores que trabalham por residência

O indicador fonte de renda buscou avaliar de maneira mais direta a relação das duas variáveis anteriores, MR e TR, e relacioná-las com a capacidade de absorção de mão de obra local. Assim, quanto mais pessoas trabalham e geram renda localmente, melhores serão os índices de sustentabilidade social local. Os resultados obtidos para renda e fonte de renda (Figura 7) evidenciam que a comunidade de Balneário Ilhas é composta em sua maioria por pessoas de baixo poder aquisitivo (até 2 salários mínimos), aposentados, e os que trabalham em sua maioria o fazem fora da comunidade. Assim, o FR obtido foi de 54,7% e o RR de 47,9%.

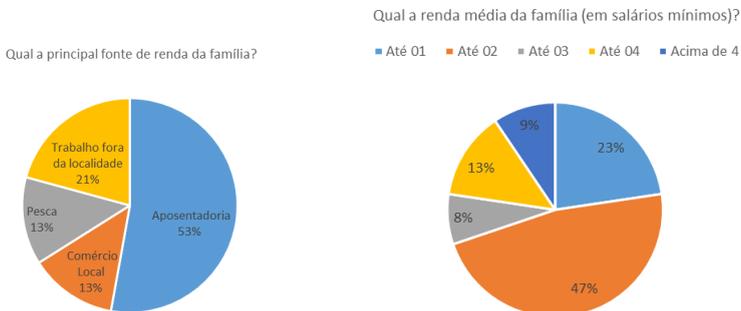


Figura 7 - Resultados obtidos para fonte de renda e renda

O ISS calculado a partir dos indicadores foi de 49,9, e reflete uma comunidade onde a estrutura atual não é capaz de fornecer subsídios que possam favorecer o desenvolvimento social local. No entanto, destaca-se que durante as conversas muitos moradores expressaram que nada mudariam na comunidade (incluindo as ruas sem pavimentação e a dificuldade de acesso) e que apreciam a tranquilidade do local. Esse também foi o motivo de muitos terem estabelecido residência permanente lá após a aposentadoria.

### 3.3 Índice de Sustentabilidade Elétrica

Os resultados para o diagnóstico do fornecimento de energia elétrica foram obtidos através de questionário, nos quais foram levantados dados primários sobre a percepção da comunidade com relação ao fornecimento atual de energia elétrica. Para o indicador de Atendimento das Necessidades de Energia Elétrica, o valor obtido foi de 74,1. A Figura 8 mostra que a maior parte dos entrevistados se consideram atendidos, no entanto, 66% deles apontam atendimento com falhas e, 19% afirmam que o fornecimento pode melhorar. Um percentual de 45% dos respondentes afirmou que as interrupções no fornecimento de energia elétrica ocorrem frequentemente. Uma causa provável é que a comunidade de Balneário Ilhas está na ponta da rede, o que é associado a baixa qualidade da energia e quedas frequentes. Este fato reflete no indicador FIF, calculado em 46,7, apontando uma lacuna a ser preenchida com relação aos níveis de qualidade de energia elétrica na comunidade.



Figura 8 - Resposta à pergunta: O fornecimento de energia elétrica atende as necessidades da sua residência?

Uma vez verificada que as interrupções no fornecimento de energia elétrica são frequentes, é importante que seja verificado se isto é fator relevante na qualidade de vida dos moradores, bem como se

prejudica a economia local. Para 77% dos respondentes, as falhas no fornecimento de energia afetam sua qualidade de vida. Eles relacionaram esse fato a dificuldades de realização de tarefas comuns, principalmente no período noturno, como a queima de equipamentos e perda de alimentos que necessitam de refrigeração. O valor do indicador FFEE, foi de 56,6 e confirma a insatisfação das famílias com relação aos danos causados por sucessivas interrupções no fornecimento de energia elétrica.

O ISE obtido foi de 59,1 e representa um diagnóstico da percepção da comunidade com relação a situação atual do fornecimento de energia elétrica. De forma geral o ISE conseguiu refletir o fato de a comunidade ser atendida em relação ao fornecimento de energia, no entanto, a baixa qualidade da energia e as quedas frequentes são problemas reais que geram insatisfação com esse serviço.

O analisador de energia elétrica instalado em uma residência na localidade em estudo detectou, no período de 12 dias, três ocorrências de falhas no suprimento de energia. Nos demais dias do período monitorado houve significativas variações nos níveis de tensão, que indicam que a qualidade da energia elétrica fornecida à comunidade pode ser melhorada. Uma das alternativas seria a implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, pois a inserção de energia no sistema elétrico contribui na melhoria de níveis de tensão e estabilização do sistema (LIMA, MENDES e Batista, 2020).

Os moradores foram também questionados sobre se SCEE trariam benefícios a comunidade. Para 85% dos respondentes os benefícios seriam significativos, 6% expressaram que nada mudaria e 2% que teria efeitos negativos (Figura 9). Este indicador apresentou um valor de 93,9 e apontou o desejo de melhorias e também certo conhecimento sobre sistemas alternativos como a energia solar. Leodoro Silva et al. (2019), em seu estudo sobre a percepção das energias renováveis em Araranguá, apontaram que 92,3% dos respondentes já tinham ouvido falar sobre energia solar.

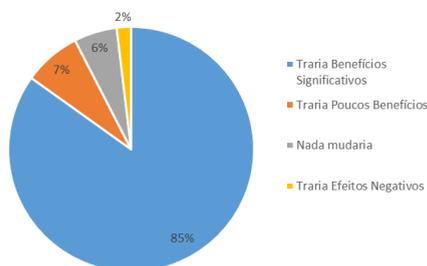


Figura 9 - Na sua opinião sistemas complementares de energia trariam benefício para a comunidade?

### 3.4 Índice de Sustentabilidade Local

O ISL buscou relacionar aspectos qualitativos em dados que representassem numericamente a realidade da comunidade de Balneário Ilhas e a relação dos moradores com o ambiente no entrono. Os resultados obtidos para o ISL estão sumariados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valor obtido para o Índice de Sustentabilidade Local

Índices	Valores	ISL
Sustentabilidade Ambiental - ISA	87,2	65,4
Sustentabilidade Socioeconômica - ISS	49,9	
Sustentabilidade Elétrica – ISE	59,1	

O ISL reflete uma comunidade que apresenta condições de saneamento básico relativamente adequado e uma relação íntima com o meio ambiente. Demonstrado uma co-dependência dos recursos naturais locais como forma de auto sustentação, por apresentar toda sua dinâmica embasada na pesca de subsistência e nas características naturais como atração turística, o que permite a movimentação do sistema econômico local.

A oferta de oportunidades de emprego e renda, melhorias na infraestrutura e na qualidade de energia precisam de atenção do poder público, principalmente para manter as famílias e seus dependentes na localidade. Assim, a presente pesquisa, baseada na crença positiva dos respondentes em relação a energia solar, realizou a modelagem e simulação de um sistema fotovoltaico como alternativa de energia elétrica na comunidade e recalculou então o ISE, para avaliar seu impacto no ISL. Conforme Purvis, Mao e Robinson (2019), o uso de indicadores e a própria discussão de sustentabilidade através de suas origens históricas complexas e díspares, permanece tanto específica do contexto quanto ontologicamente aberta e, portanto, qualquer a descrição detalhada do conceito utilizado se faz relevante.

### 3.5 Proposta de Geração Distribuída com sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico de geração distribuída foi modelado e simulado na intenção de verificar se parâmetros elétricos mais adequados contribuem para uma maior sustentabilidade. Foi utilizada a ferramenta on-line disponibilizada pelo Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina – IDEAL. O simulador de energia solar fotovoltaica AMERICADOSOL fornece dados preliminares de

projeto, como, a área a ser coberta pelos módulos fotovoltaicos, inclinação, capacidade de produção de energia e estimativa de geração e consumo. Todos os dados necessários para a simulação do sistema proposto foram retirados da fatura de energia e da Central Elétrica de Santa Catarina – CELESC.

O levantamento do consumo médio anual de energia elétrica da unidade residencial, quanto de energia deseja-se produzir com o sistema em relação ao consumo médio, parcial ou total, dados de irradiação disponíveis para o local da instalação e, inclinação dos módulos fotovoltaicos, foram embasados na fatura de energia de uma residência padrão, localizada na comunidade de Balneário Ilhas. A partir da fatura, foi obtido o consumo de energia elétrica de um período de 12 meses (2018/2019).

O consumo médio foi em torno de 100 kWh e o período de maior consumo foi nos meses de fevereiro, março e abril. Os dados mensais de irradiação solar foram obtidos no Instituto para o Desenvolvimento das Energias Alternativas na América Latina – IDEAL (2017). A simulação considera os módulos fotovoltaicos instalados para o Norte e com uma inclinação ótima de 29°, a qual corresponde à latitude da localidade de Ilhas. As características do sistema simulado foram: potência de 1,0 kWp; área de 6 a 9 m<sup>2</sup>; inclinação de 29°; rendimento anual 1.234 kWh/kWp; emissões evitadas 361 kgCO<sub>2</sub>/ano, considerando um consumo total de 1.827 kWh, dos quais 584 Wh supridos pela rede elétrica e 1.243 kWh da geração fotovoltaica.

O sistema simulado seria capaz de atender de maneira satisfatória as necessidades da residência, suprimindo cerca de 1.243 kWh da demanda de energia elétrica da residência. Assim, a residência obteria uma economia de 68% na fatura de energia no período de um ano. A economia na fatura de energia elétrica seria significativa em todos os meses. Os dados apresentados demonstram que é possível uma economia de R\$ 647,52 por ano, caso o sistema fosse implantado, Sem considerar o tempo de retorno do investimento; isto representaria um ganho significativo de capital para as residências que seriam atendidas pelo sistema.

Com base nos resultados da simulação, o Índice de Sustentabilidade Elétrica foi recalculado, considerando que: a inserção do excedente de energia na rede poderia trazer melhorias na qualidade de energia elétrica local, melhorando a qualidade de vida dos residentes da comunidade. Com isso, as variáveis do ISE referentes a falhas no fornecimento e qualidade de energia elétrica seriam melhorados. Assim, os indicadores ISA e ISS foram mantidos inalterados. Assumiu-se que o sistema geração distribuída conectado à rede solucionou a insatisfação com o fornecimento de energia e deixou de influenciar negativamente na qualidade de vida dos moradores. Principalmente através

da estabilidade de tensões, adequação no fator de potência e, principalmente, suprimento da demanda nos períodos de interrupções no fornecimento.

Foram então atribuídos os melhores cenários aos indicadores de sustentabilidade elétrica, considerando um ISE igual a 100. A Tabela 11 apresenta o ISL recalculado, onde observa-se um incremento de 13,6% no ISL em consequência a melhorias no fornecimento de energia. Esse resultado demonstra o papel da energia elétrica na sustentabilidade local da comunidade, e reforça a importância dos ODS 7 e 11 da agenda 2030.

Tabela 11 - Valor obtido para o Índice de Sustentabilidade Local, após as melhorias no sistema elétrico das residências

Índices iniciais	Valores	ISL
Sustentabilidade Ambiental - ISA	87,2	65,4
Sustentabilidade Socioeconômica - ISS	49,9	
Sustentabilidade Elétrica - ISE	59,1	
Índices recalculados		
Sustentabilidade Ambiental - ISA	87,2	79
Sustentabilidade Socioeconômica - ISS	49,9	
Sustentabilidade Elétrica - ISE	100	

Conforme o estudo de Réus e Andion (2018) o município de Araranguá apresenta um índice médio de desenvolvimento sustentável se comparado aos demais municípios Catarinenses. A comunidade de Ilhas, pertencente ao município de Araranguá, de acordo com os índices da Tabela 11 está inserida nesse contexto, apresentando uma sustentabilidade local superior a 50 (ou seja, acima da média). No entanto, o trabalho de Réus e Andion (op cit) não inclui nenhum fator relacionado a energia. O que reforça a importância do desenvolvimento de ferramentas para mensurar e monitorar esses parâmetros, como a metodologia proposta no presente artigo.

De acordo com Molina (2019) a contribuição da soma da conscientização coletiva com o compromisso dos órgãos governamentais na institucionalização de indicadores de sustentabilidade pode empreender em crescimento econômico por meio de ações sustentáveis. Conforme Shah et al. (2019) as questões de segurança energética e sustentabilidade ambiental podem levar a menor desenvolvimento econômico e maior pobreza. O resultado observado na Tabela 11 é um indicativo de que fontes confiáveis de energia elétrica renovável e custos baixos podem trazer benefícios importantes, melhorando a qualidade de vida das pessoas com acesso a ela, agregando desenvolvimento

e sustentabilidade.

A relação estabelecida no método proposto busca evidenciar o mesmo nível de importância entre os indicadores ambientais, socio-econômicos e também os elétricos. Nestes termos, um acesso confiável e barato a fontes de energia, de preferência renovável, possui a mesma significância de um sistema ambiental em equilíbrio dentro de uma comunidade tradicional. Por isso os indicadores se equivalem, possuindo o mesmo peso para as suas variáveis.

Nesse estudo não foi possível relacionar os benefícios diretos na economia, uma vez que a redução dos gastos com energia poderia representar um impacto positivo na renda da comunidade, incentivando também o comércio local.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A pesquisa foi desenvolvida a partir da percepção de necessidade de criação de indicadores que pudessem ser transformados em índices de sustentabilidade para pequenas comunidades, as quais muitas vezes se caracterizam como comunidades tradicionais. Através do estudo de caso na comunidade tradicional de Ilhas foi possível perceber sua interação com o meio ambiente, as principais atividades de subsistência e traçar um perfil geral da comunidade. A principal pressão ao meio ambiente destacada foram as construções em locais irregulares e o aumento da população durante a alta temporada, resultado em ISA de 87,2. Em relação ao ISS, baixa renda da população, dificuldade de permanência dos jovens e poucas oportunidades de emprego, refletiram em um ISS de 49,9. A maioria dos residentes apontou insatisfação com o fornecimento de energia elétrica, e a principal queixa foi relacionada as quedas de fornecimento e a baixa qualidade; o ISE obtido foi de 59,1. Considerando o objetivo de propor um ISL que integrasse os aspectos elétricos da localidade, o ISE foi recalculado considerando-se que todas as necessidades elétricas foram atendidas com a implantação de um sistema de GD. Com isso, observou-se um incremento de 13,6% no ISL.

Conclui-se que a metodologia proposta e testada pode ser replicada em outras localidades. O ISL representa uma relevante contribuição na inclusão de indicadores elétricos como fator de sustentabilidade de pequenas comunidades.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ACOSTA, A.; BRAND, U. Pós-extrativismo e decrescimento: saída do labirinto capitalista. São Paulo: Ed. Elefante, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1997). NBR 13969: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro.

BORBA, M. C. V.; GASPAR, N. F. (2010). Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil.

BRASIL. (2012) Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; e dá outras providências.

CARVALHO, P. G. M.; BARCELLOS, F. C. (2009). Construindo indicadores de sustentabilidade. Indicadores Econômicos FEE, 37(1).

CRISTIANO, S. C.; PORTZ, L.; NASSER, P. C.; PINTO, A. C.; SILVA, P. R. D.; BARBOZA, E. G. (2018). Strategies for the management of the marine shoreline in the orla Araranguá project (Santa Catarina, Brazil). In Beach Management Tools-Concepts, Methodologies and Case Studies (pp. 735-754). Springer, Cham.

DIEGUES, A. C.; ARRUDA, R. S. V. (2001). Saberes Tradicionais e Biodiversidade no Brasil [Traditional knowledge and biodiversity in Brazil]. Brasília, Brasil: Ministério do meio Ambiente.

DIEGUES, A. C.; VIANA, V. M. (2004). Comunidades Tradicionais e Manejo dos Recursos Naturais da Mata Atlântica. 2ª ed. São Paulo: HUCITEC NUPAUB/CEC.

GRIGOROUDIS, E.; KOUIKOGLU, V. S.; PHILLIS, Y. A.; KANELLOS, F. D. (2021). Energy sustainability: a definition and assessment model. Operational Research, 21(3), 1845-1885. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00492-2>

GUIMARÃES, R. P.; FEICHAS, S. A. Q. (2009). Desafios na construção de indicadores de sustentabilidade. Ambiente e sociedade, 12, 307-323. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2009000200007>

HEZRI, A. A.; HASAN, M. N. (2004). Management framework for sustainable development indicators in the State of Selangor, Malaysia. Ecological indicators, 4(4), 287-304. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2004.08.002>

INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA. (2017). O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica: edição. 68 p. Disponível em: [https://issuu.com/idealeco\\_logicas/docs/estudoidealmercadofv2017\\_web](https://issuu.com/idealeco_logicas/docs/estudoidealmercadofv2017_web). Acesso em 7 out 2018

LEODORO SILVA, L. L.; CRISTIANO, S. C.; SUNG, C. L.; DA ROSA, F. R.; D'AQUINO, C.A. (2019). Percepção da comunidade de Araranguá (SC, Brasil) sobre energias renováveis. In: Anais do 8º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul. Santa Rosa do Sul, v1. p. 843 – 1125.

LIMA, C. M.; MENDES, M. A.; BATISTA, O. E. (2020, December). Estudo da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Distribuição com Alta Penetração de Geração Distribuída. In Congresso Brasileiro de Automática-CBA (Vol. 2, No. 1).

LUCENA, M. A. A. DE; OLIVEIRA, M. G. B.; BEZERRA, I. S. (2015). Consórcio de Energia Solar e Eólica em Áreas Isoladas no Semiárido Paraibano: um estudo de caso em Picuí – PB. Revista Ambiental, [S.I.], v.1, n. 3, p. 115-124.

MCCOOL, S. F.; STANKEY, G. H. (2004). Indicators of sustainability: challenges and opportunities at the interface of science and policy. *Environmental management*, 33(3), 294-305. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0084-4>

MENEZES, C. T. B.; CENI, G.; MARTINS, M. C.; VIRTUOSO, J. C. (2019). Percepção de impactos socioambientais e a gestão costeira: estudo de caso em uma comunidade de pescadores no litoral Sul de Santa Catarina. Brasil. *Revista de Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, v. 8, n. 3, p. 457-481. DOI: 10.19177/rgsa.v8e32019457-481

MENSAH, J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences*, 5(1), 1653531. <https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531>

MOLINA, M. C. G. (2019). Desenvolvimento sustentável: do conceito de desenvolvimento aos indicadores de sustentabilidade. *Revista Metropolitana de Governança Corporativa* (ISSN 2447-8024), 4(1), 75-93.

DE MORAES, D. C.; DOS SANTOS, M. L.; BALDISSERA, L. B. (2013) A implementação da geração de energia elétrica de forma distribuída como vetor na busca pelo desenvolvimento sustentável. In: Congresso internacional de direito e contemporaneidade: mídias e direitos da sociedade em rede, 2., 2013, Santa Maria. Anais... Santa Maria: [s.n.]. p. 613 - 625.

NARULA, K. (2014). Is sustainable energy security of India increasing or decreasing? *International Journal of Sustainable Energy*, 33(6), 1054-1075. <https://doi.org/10.1080/14786451.2013.811411>

NARULA, K.; REDDY, B. S. (2016). A SES (sustainable energy security) index for developing countries. *Energy*, 94, 326-343. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.106>

OLIVEIRA SARTORI, A. G.; DA SILVA SILOTO, R. (2013). Análise da compatibilidade de indicadores de desenvolvimento humano e sustentável do sistema das Nações Unidas com o Bellagio STAMP. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, (30), 99-110.

PENTEADO, E. J. D. S.; DUARTE, C. G. (2014). Uma avaliação dos Indicadores Ethos a partir dos Princípios de Bellagio. XVI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 13p.

PEREIRA, M. D. S.; SAUER, L.; FAGUNDES, M. B. B. (2016). Mensurando a sustentabilidade ambiental: uma proposta de índice para o Mato Grosso do Sul. *Interações (Campo Grande)*, 17, 327-338. <https://doi.org/10.20435/1984042X2016215>

PINTÉR, L.; HARDI, P.; MARTINUZZI, A.; HALL, J. (2012). Bellagio STAMP: Principles for sustainability assessment and measurement. *Ecological Indicators*, 17, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.07.001>

PURVIS, B., MAO, Y.; ROBINSON, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustain Sci*, 14 (3): 681–695. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>

RABELO, L. S.; LIMA, P. V. P. S. (2008). Indicadores de sustentabilidade: a possibilidade da mensuração do desenvolvimento sustentável. *REDE-Revista Eletrônica do Prodema*, 1(1).

RAZMJOO, A. A.; SUMPER, A.; DAVARPANAH, A. (2019). Development of sustainable energy indexes by the utilization of new indicators: A comparative study. *Energy reports*, 5, 375-383. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.03.006>

RÉUS, I.; ANDION, C. (2018). Gestão municipal e desenvolvimento sustentável: panorama dos indicadores de sustentabilidade nos municípios catarinenses. *Desenvolvimento em Questão*, 16(45), 97-117. <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2018.45.97-117>

ROSA, F. R. D. (2019). Uso de indicadores para a avaliação da sustentabilidade com enfoque na energia elétrica: estudo de caso da comunidade tradicional de Balneário Ilhas, Araranguá-SC. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 84p.

SHAH, S. A. A.; ZHOU, P.; WALASAI, G. D.; MOHSIN, M. (2019). Energy security and environmental sustainability index of South Asian countries: A composite index approach. *Ecological Indicators*, 106, e105507. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105507>

SANTOS, B. S. (2019). O Fim do império cognitivo: a afirmação das epistemologias do Sul. Belo Horizonte: Autêntica Editora. 478 p.

SILVESTRINI, T. A.; D'AQUINO, C. A. (2020). Dinâmica dos parâmetros oceanográficos em um estuário impactado por atividades de mineração de carvão. *Pesquisas em Geociências*, 47(3), e103404. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.109992>

SOLIGO, V. (2012). Indicadores: conceito e complexidade do mensurar em estudos de fenômenos sociais. *Estudos em Avaliação Educacional*, 23(52), 12-25. <https://doi.org/10.18222/eaee235220121926>

STOFFEL, J. A.; COLOGNESE, S. A. (2015). O desenvolvimento sustentável sob a ótica da sustentabilidade multidimensional. *Revista da FAE*, 18(2), 18-37.

UNITED NATIONS (2015). General Assembly. Resolution 70/1, 25 september 2015. "Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development". Disponível em: [http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_RES\\_70\\_1\\_E.pdf](http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf)

VIEIRA, P. V.; CAZELLA, A.; CERDAN, C.; CARRIÈRE, J. P. (2010). Desenvolvimento territorial sustentável no Brasil: subsídios para uma política de fomento. Florianópolis: APED/Secco. 488 p. <https://agritrop.cirad.fr/564067/>

## THE FUTURE OF LIGHT-DUTY VEHICLES IN BRAZIL: TENDENCIES AND CHALLENGES FOR A GREENER FLEET

Rafael Luis Sacco<sup>1</sup>  
Murilo Miceno Frigo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade de São Paulo*

<sup>2</sup>*Instituto Federal de Mato Grosso do Sul*

DOI: 10.47168/rbe.v29i2.783

### ABSTRACT

This work aims to analyze the possible Brazilian solutions for a cleaner light-duty vehicles fleet and discuss the challenges of adopting the main alternatives: (i) natural gas and biomethane, (ii) electrification and hybrids, and (iii) biofuels, consisting of qualitative analysis through bibliographic and exploratory research. A table shows the landmarks, future perspectives, and challenges for developing each alternative tackled in this work. The Petroleum Crisis in 1973 was a landmark for energetic Brazilian history. Due to the high petroleum prices in the mid-1970s, the Brazilian government and entrepreneurs took concrete actions toward alternative fuel solutions. Brazil has peculiar characteristics that can make electrification not the best or the only solution for a greener fleet. Brazil must find its path toward a low-carbon economy without throwing away its already know-how and traditional experienced trajectory.

Keywords: Light-duty vehicles; Regulation; Cleaner transportation; Alternative-fuel vehicles.

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar as possíveis soluções brasileiras para uma frota de veículos leves mais limpa e discutir os desafios da adoção das principais alternativas: (i) gás natural e biometano, (ii) eletrificação e híbridos, e (iii) biocombustíveis, consistindo de análise qualitativa por meio de pesquisa bibliográfica e exploratória. Uma tabela mostra os marcos, as perspectivas futuras e os desafios para o desenvolvimento de cada alternativa abordada neste trabalho. A Crise do Petróleo em 1973 foi um marco para o setor energético brasileiro. Devido aos altos preços do petróleo em meados da década de 1970, o governo brasileiro e os empresários

tomaram medidas concretas para viabilizar soluções com combustíveis alternativos. O Brasil tem características peculiares que podem fazer com que a eletrificação não seja a melhor ou a única solução para uma frota mais verde. O Brasil deve encontrar o caminho para uma economia de baixo carbono sem jogar fora o seu *know-how* e sua tradicional trajetória experiente.

Palavras-chave: Veículos leves; Regulação; Transporte mais limpo; Veículos com combustível alternativo.

## 1. INTRODUCTION

Over recent years, pollutants and greenhouse gas (GHG) emissions to the atmosphere have been increasing substantially. According to the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the concentration of carbon dioxide in the atmosphere reached 412.5 ppm (parts per million) in 2020, the highest level in the last 800.000 years. Compared to pre-industrial periods, the carbon dioxide level has never achieved more than 300 ppm (LINDSEY, 2021). The energy sector is responsible for approximately 73% of the world's equivalent carbon dioxide emissions, including transportation, electricity generation, heat generation, industrial activities, and construction. In 2016, the transport sector alone sent to the atmosphere around 7.9 GtCO<sub>2e</sub> (GE and FRIEDRICH, 2020).

In light of the Paris Agreement, where signatory countries assumed the responsibility of taking action against climate change (UNITED NATIONS, 2021), governments and technical institutions have been elaborating restriction policies against fossil fuels and supporting policies for alternative transportation fuels to develop cleaner transportation. Many solutions are being developed worldwide, such as biofuel, electrification, hydrogen, and biomethane, which can potentially assume protagonism in the future as technology advances. In this sense, some countries instituted support policies for electric vehicles over the last decade, trying to reduce pollutants and GHG emissions. Subsidies and electrification targets were implemented in the United States, China, and most European countries (IEA, 2021). In Britain, the sale of new petrol and diesel light-duty vehicles will be banned from 2030. In Norway, this deadline is even earlier: 2025. The state of California (US) and the province of Quebec (Canada) assumed the commitment to ban the sale of new gasoline-powered passenger cars from 2035 (REUTERS, 2020).

Cleaner transportation is also a concern for the Brazilian government, even more because Brazil is one of the 2015 Paris Agreement signatories' countries, ratifying the agreement at the 26<sup>th</sup>

UN Climate Change Conference of the Parties (COP26), held in Glasgow, UK, in 2021 (UNITED NATIONS, 2021). For the Brazilian energy transition towards a cleaner future, the government is assessing several viable alternatives for road transportation, including increasing energy efficiency, alternative sources of energy, and an internal combustion engine phase-out program. In the meantime, Brazil will keep following up on existing efficiency policies already implemented in the country, such as the Brazilian Motor Vehicle Air Pollution Control Program (PROCONVE) and the Brazilian Vehicle Labeling Program (PBVE). Alternative technologies for light-duty vehicles are flex-fuel vehicles, already widespread in Brazil for the usage of gasoline and ethanol, electrification of the fleet, plug-in hybrid vehicles, biomethane, hydrogen, and others (EPE, 2020).

Motor vehicles in Brazil include a wide variety of on-road vehicle types used primarily for passenger transport and goods movement applications. This work aims to analyze the possible Brazilian solutions for a cleaner light-duty vehicles fleet, classified and regulated differently from heavy-duty vehicles (DALLMANN and FAÇANHA, 2017), and discuss the challenges of adopting the main alternatives. We undertook a qualitative analysis through bibliographic and exploratory research. Section 2 will tackle the main regulation to reduce greenhouse gas emissions from light-duty vehicles in Brazil, and section 3 will discuss the Brazilian vision for a greener fleet and its challenges to adopting the most viable solutions for the country's actuality: (i) natural gas and biomethane, (ii) electrification and hybrids, and (iii) biofuels. Finally, section 4 will discuss the final remarks and conclusion.

## **2. THE BRAZILIAN REGULATION TO REDUCE AIR POLLUTION**

In 1986, the Brazilian Government launched the Brazilian Motor Vehicle Air Pollution Control Program (PROCONVE), the first coordinated effort to protect air quality from carbon monoxide, hydrocarbons, nitrogen oxides, soot, and aldehydes, especially in larger urban areas. The main objectives of this regulation are to promote national technological development, create inspection programs for vehicles already in use, promote population awareness about motor vehicles' air pollution, implement follow-up measures, and improve liquid fuels quality to reduce pollutant emissions (CONAMA, 1986).

PROCONVE's target for controlling pollution from Otto Cycle light-duty vehicles is based on the US Programs LEV and CARB, enforcing the adoption of increasingly restrictive emission limits (SZWARCFITER et al., 2005). Vehicle manufacturers must demonstrate compliance with these limits through laboratory testing of cars (DALLMANN

and FAÇANHA, 2017). The program is divided into phases, in which each one of them fosters new limits on exhaust emissions from light-duty vehicles (represented by the letter “L”) and heavy-duty vehicles (represented by the letter “P”). The first phase of PROCONVE L1 was implemented on 1<sup>st</sup> January 1989 by the Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (CONAMA, 1986). Since then, PROCONVE has continued to set more stringent emission limits in its subsequent phases. The CONAMA Resolution No. 492, published on 20<sup>th</sup> December 2018, set new phases for the program, called PROCONVE L7 and L8, valid for all domestic and imported vehicles commercialized in Brazil. The L7 phase entered into effect on 1<sup>st</sup> January 2022, and the L8 phase will be applicable from 1<sup>st</sup> January 2025 (CONAMA, 2018).

In general terms, PROCONVE L7 has established the following emission limits for passenger new cars: particulate material - 6 mg/km, carbon monoxide - 1.000 mg/km, aldehydes - 15 mg/km, and non-methane organic gases (NMOG) plus nitrogen oxides (NOx) - 80 mg/km. Figure 1 shows the evolution of PROCONVE mass emission limits of carbon monoxide, nitrogen oxides, and aldehydes for Otto Cycle passenger vehicles from the beginning of the program, in 1986, until today (CONAMA, 2018; DALLMANN and FAÇANHA, 2017).

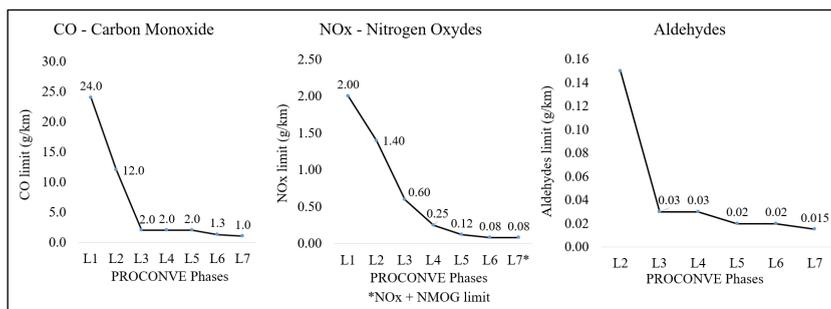


Figure 1 - Emission limits of carbon monoxide, nitrogen oxides, and aldehydes for Otto Cycle passenger vehicles per PROCONVE Phases

As emission restrictions grow, internal combustion engine manufacturers become more under pressure to develop cleaner motors while at the same time keeping the economic feasibility of projects. In this sense, new vehicles and fuels begin to show up as an alternative to the high costs of engineering a cleaner internal combustion engine run by gasoline or diesel. The next session will tackle some Brazilian visions for a greener light-duty vehicles fleet and the challenges of each alternative.

### 3. THE BRAZILIAN VISION FOR A GREENER FLEET

Common fuel types for light-duty vehicles in Brazil are (i) gasoline, produced to be blended with anhydrous ethanol, (ii) hydrous ethanol, mainly derived from the fermentation of Brazilian sugarcane, (iii) diesel, which sale is not allowed for passenger cars with payload capacity lower than 1.000 kg, and (iv) biodiesel, mainly derived from Brazilian soybean oil and blended with diesel at a volume percentage set by the government for sale (DALLMANN and FAÇANHA, 2017).

Nowadays, flex-fuel is the dominant technology across all vehicle segments in Brazil, except for sports cars, off-road vehicles, and minivans. A flex-fuel vehicle is designed to run on gasoline and ethanol or any mix of both fuels (POSADA and FAÇANHA, 2015). After the petroleum crisis in 1973, the Brazilian government launched the National Alcohol Program - PROALCOOL in 1975 to gradually replace petroleum-based fuels with renewable fuels, mainly ethanol derived from sugarcane. Because of this policy, Brazil made its first energy transition in the mid-1980s, when about 70% of all new light-duty vehicles produced in the country were manufactured to run on ethanol. But this trend did not last very long due to the high competitiveness of combustion engines running on gasoline. In 2006, the Brazilian fleet of light-duty vehicles experienced another energy transition, but at this time to a flex-fuel motor fleet (gasoline or ethanol). Figure 2 shows the percentage of light-duty vehicles in Brazil by fuel type from the 1950s until 2020 (ANFAVEA, 2021).

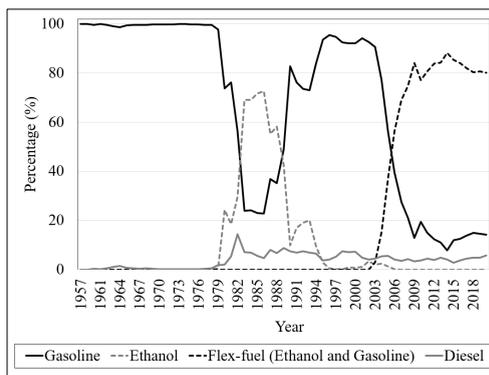


Figure 2 - Percentage of light-duty vehicles in Brazil by fuel type

According to the Brazilian Decennial Plan for Energy Expansion 2021/2030, passenger transportation activities will increase at a

yearly rate of 3.2% until 2030 due to the increase in social demand for transportation, the rise in GDP per capita, and the reduction in the unemployment rate (EPE, 2021). With this scenario, the National Energy Plan - PNE-2050 published the Brazilian strategy for energy expansion until 2050, which addresses issues regarding the energy transition in the transport sector in Brazil. According to the strategy, biofuels will play a vital role in the Brazilian energy transition, especially in places facing more significant electrification challenges. Furthermore, Brazil has great potential to develop green hydrogen, lignocellulosic ethanol, natural gas, and biomethane (EPE, 2020). The sections below will discuss the leading alternatives for the energy transition for the Brazilian transport sector.

### 3.1 Natural gas and biomethane

First introduced in Italy in the mid-1930s, natural gas vehicles lacked popularity for decades until their fleet increased in the 1970s and 1980s after the energy Petroleum Crisis. Governments in both developed and developing countries have promoted the adoption of natural gas vehicles as a clean alternative to gasoline and diesel and reduced dependence on foreign oil (SANTOS, 2018; YEH, 2007). In 1987, Brazil launched the Gas Production Anticipation Plan (PLANGAS), the first program to incentivize the use of natural gas in buses and trucks instead of diesel. However, high natural gas prices, the precarious fueling infrastructure, and the conversion technology deficiency led PLANGAS to restrain its progress (ABREU, 2013).

The Ministry of Infrastructure's Administrative Rule No. 222 released natural gas by taxi drivers in 1991. In the following year, the Ministry of Mines and Energy's Administrative Rule No. 553 repealed Administrative Rule No. 222, authorizing the use of natural gas by urban buses, taxis, and freight vehicles. Notwithstanding, private light-duty vehicles were only allowed to run on natural gas in Brazil in 1996, with Decree No. 1.787/1996 (ABREU, 2013; BRAZIL, 1996; TEIXEIRA, 2003).

At the begging of the 2000s, the natural gas vehicles fleet experienced a rapid penetration in the Brazilian market until 2007. However, this penetration has roughly stagnated since 2008 (SANTOS, 2018). Brazil's vision for adopting natural gas for light-duty vehicles is gradual and slow. On the other hand, PNE-2050 evaluates GNV's technology maturity and its penetration in Brazil, subject to market conditions and infrastructure development (EPE, 2020).

The main challenges to the widespread adoption of natural gas vehicles in Brazil are: (i) the necessity of a large-scale establishment of production, importation, and supply infrastructure; (ii) the need for a

distribution network expansion; (iii) the security of natural gas supply, and (iv) the development of a mature natural gas market (EPE, 2020). Furthermore, when it comes to fuel stations, they should have a unique infrastructure, including a compressor (to fuel cars with Compressed Natural Gas - CNG), special fueling pumps, and a tank. The installation of these types of equipment and the adaption of the fueling station facilities can be costly to fuel station owners. In addition, the majority of the natural gas vehicles in Brazil were initially sold as gasoline, ethanol, or flex-fuel vehicles, which were later converted to also run on CNG. Besides this technology being widespread by constant and long-distance drivers, such as taxi drivers and lightweight freight transporters, converting a vehicle to run on Compressed Natural Gas can demand a high initial investment (SANTOS, 2018).

Natural gas can play an important role in the Brazilian energy transition due to its low greenhouse gas emissions when burnt compared to diesel and gasoline (EPE, 2020). In addition, natural gas can also be mixed with biomethane, a gaseous biofuel composed essentially of methane derived from the biogas purification, according to the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP)'s Resolution No. 8/2015 (ANP, 2015). Biomethane can originate from organic animal waste, crop residues, and organic fractions from urban wastes (JENDE et al., 2015). In this sense, the environmental sanitation provided by biomethane generation allows natural gas vehicles to place this vehicle in a better position for environmental issues.

### 3.2 Electrification and hybrids

After the Petroleum Crises occurred in the 1970s, public interest in electric vehicles (EVs) began to grow as an alternative solution to high petroleum prices. In 1974, the Brazilian engineer João Conrado do Amaral Gurgel presented the first EV produced in Latin America: Gurgel Itaipu, a small vehicle with 60 to 80 km of autonomy. Later in 1981, a new model was presented: the Itaipu E-400, with a load capacity of 400 kg and up to 80 km of autonomy. The model was helpful to the national electricity company, the national telecommunication company, and some private companies in Brazil (BITU, 2021; PAIVA, 2021).

Besides the relatively high efficiency and low operating cost, the Itaipu E-400 had a weakness common to all EVs until today: the expensive and limited batteries and its relatively short lifespan. All Gurgel EV models had their manufacturing ended in 1983, with the replacement of the electric engine to petrol or ethanol engine produced by Volkswagen (BITU, 2021). The Brazilian EV had no success, and Gurgel closed its activities in 1996 ( PAIVA, 2021).

Nowadays, Brazil has a mature market for internal combustion

engine vehicles (ICEV), making the Brazilian transition towards electrification a big challenge. Besides urban pollution mitigation being an opportunity for electric vehicle deployment, fleet electrification in Brazil does not appear to rush as in other countries. Possible reasons are that Brazil does not face a severe energy security threat and does not have extreme air pollution as other countries do (VELANDIA VARGAS et al., 2020).

PNE-2050 considers the electrification of the transportation sector as one of the solutions to a low-carbon economy, including smart grids and smart cities. The more optimistic scenario envisages 15% EV penetration until 2050 and a total replacement of ICEVs with EVs and hybrid-electric vehicles after 2045. But to achieve this more optimistic scenario, PNE-2050 points out some critical challenges that Brazil must overcome. First, light-duty electric vehicles are costly by Brazilian consumer standards. Second, Brazil has poor recharging infrastructure. And third, there is an absence of governance and public policies to guide EVs implementation in Brazil (EPE, 2020).

In 2015, as a MERCOSUL member, the Brazilian government published Resolution No. 97/2015, which reduced EV import tax from 35% to zero. This resolution is applied to electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles, assembled or disassembled, with a minimum range of about 80 km on a single charge (CAMEX, 2015). However, this resolution was valid until December 2021, and further orientation is needed by the Brazilian government (BIANCHIN, 2021). Currently, bill No. 5308/2020 addresses tax incentives for electric vehicles and hybrid electric vehicles negotiated in Brazil, reducing the tax on industrialized products (IPI) to zero (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2020).

When it comes to infrastructure, a legal framework for the commercial recharging of electric vehicles was issued only in 2018, by the National Agency of Electric Energy (ANEEL), by the resolution No. 819, aiming to reduce legal uncertainties for entrepreneurs and allow them to offer their electricity at a free, market-based price. Before this resolution, commercial recharging was not allowed in the country, which shows how slow the country's electrification movement is (ANEEL, 2018; VELANDIA VARGAS et al., 2020).

Besides the low number of public policies at the federal level, several local governments are very interested in EVs and hybrid vehicles at both state and municipality levels. Many major cities have already underway demonstration projects (ARAUJO and AMORIM, 2017). In July 2021, the town of São Paulo sanctioned municipal law No. 17.563/2021, which allows electric and hybrid vehicle owners to deduct the Automotive Ownership Tax (IPVA) credits to pay Urban Land and Building Tax (IPTU) over the first five years after the vehicle purchase (SÃO PAULO, 2021). At the state level, eight Brazilian states have al

ready exempted electric, and hybrid cars owners from paying the Automotive Ownership Tax (IPVA) in their territory: the Rio Grande do Sul, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Piauí, Maranhão, and Ceará (PERONI, 2021). This scenario indicates the decentralized policy movement in Brazil towards fleet electrification, a similar situation that occurs in the United States.

The plug-in fleet electrification opens several possibilities for turning cities smarter and greener. One of the possibilities is the Vehicle-to-Home, or Vehicle-to-Grid, alternative which refers to the reciprocal flow of power between an electric vehicle and the grid, shifting the demand curve and reducing costs attained by avoiding peak tariffs at times of high demand. In this sense, electric vehicles as energy storage elements could boost the adoption of localized renewables (UDDIN et al., 2018). Another sustainable possibility is the implementation of car-sharing systems in urban areas. Car-sharing companies could offer a rent a car service on a short-term basis to urban users, shifting the car ownership concept towards the “mobility as a service” (MaaS), or the “mobility on demand” concept (MOUNCE and NELSON, 2019).

Furthermore, the adoption of EVs in Brazil could contribute to the development of autonomous vehicles. Countries like Belgium, France, Italy, the United Kingdom, and the United States are already planning to operate a transport system for driverless cars (MOUNCE and NELSON, 2019). Despite these incentives, a key concern has been the impact of electric vehicle operations on the degradation of lithium-ion batteries (UDDIN et al., 2018).

Lithium-ion batteries for EVs consist of (i) various metals, such as lithium, nickel, iron, cobalt, aluminum, copper, manganese, steel, (ii) carbonaceous materials, such as graphite and carbon black, and other materials such as (iii) plastics, (iv) electrolytes, (v) binder, and (vi) lithium salts (XU et al., 2017). The average lithium-ion battery life span is between 5 to 10 years. However, overall age remains a hurdle because high ambient temperatures accelerate battery aging (DINGER et al., 2010). In this sense, EV adoption in Brazil could shorten the battery life span because of the tropical temperatures in most Brazilian territories.

Future perspectives of lithium-ion batteries, however, revolve around niobium. Brazil is the world's largest producer of this gray metal that turns bluish when oxidized (OMONDI, 2017). The Brazilian company CBMM, the world's dominant niobium producer, has already established partnerships with technology companies worldwide to develop niobium-bearing lithium-ion batteries. It is envisaged that these batteries could provide rapid charging to EVs (less than 10 minutes) without the risk of damage or explosion and a life span of 20 years, with more than 10,000 recharging cycles (up to five times more than typical lithium-ion batteries) (KINCH, 2021).

### 3.3 Biofuels

Biofuels are derived from biomass and can replace petroleum-based fuels in internal combustion engines. The main biofuels used in Brazil are (i) ethanol, obtained from sugarcane, and (ii) biodiesel, produced from vegetable oil or animal fat (ANP, 2020). The country is recognized worldwide as a leader in biofuels production, distribution, and use and has implemented several policies to develop the biofuel market: (i) the National Alcohol Program - PROALCOOL, implemented in 1975 as an alternative to the Petroleum Crisis, (ii) the National Biodiesel Production and Use Program - PNPB, launched in 2004, and more recently (iii) the Biofuel National Policy - RenovaBio, introduced in 2016, and (iv) the Fuel of the Future Program, introduced in 2021 (EPE, 2021).

PROALCOOL proved to be highly effective in stimulating demand for ethanol. In the mid-1980s, more than 70% of all new light-duty vehicles produced in Brazil were manufactured to run on ethanol (see Figure 2). On the other hand, the development of national biodiesel has been strengthened and gained commercial scale with the policies: PNPB, RenovaBio, and the Fuel of the Future Program. Due to their renewable feature, the Brazilian government considers biofuels as an alternative to achieve sustainability and energy security (EPE, 2021). Nevertheless, biofuel production presents particular challenges to the environment that need to be assessed, such as (i) fossil energy applied to the biofuel production supply chain, (ii) production and application of synthetic fertilizers - and other chemicals - to the soil, (iii) deforestation, and (iv) impacts of large monoculture areas to biodiversity. In addition, some authors highlight the negative effect of the biofuels industry on food production, putting pressure on food prices up and increasing social inequalities (BERMANN, 2012; HESPANHOL, 2008; OLIVEIRA, 2011). The limited availability of arable lands on the planet makes biofuels unable to meet all the global demand for fuels without affecting the world's food security (ANGARITA et al., 2008).

Sections 3.3.1 and 3.3.2 will tackle the two biofuels which stand out in Brazil: ethanol and biodiesel.

#### 3.3.1 Ethanol

From 1994 until 2020, Brazil produced 547 million tonnes of sugar cane yearly, being the world's leading producer, as shown in Figure 3 (FAO, 2021). The primary source of Brazilian ethanol is sugar cane. The history of this crop is intertwined with the country's energetic history itself, positioning Brazil as a world leader in bioenergy since the 1960s (STOLF and OLIVEIRA, 2020).

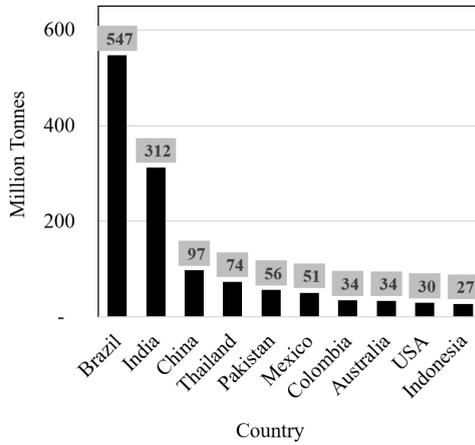


Figure 3 - Average Production of Sugar Cane: Top 10 producers (1994 - 2020)

Brazil launched the National Alcohol Program - PROALCOOL in 1975, the first alcohol fueling program developed. This program aimed to balance the current account, improve energy security, and generate employment and income, being a response from the government to urgently search for an alternative fuel to petroleum-based fuels after the Petroleum Crisis occurred in 1973.

PROALCOOL can be divided into two phases. The first one consists of the progressive blending of ethanol into gasoline between 1975 and 1979. The second one consists of the total substitution of fossil fuels for renewable ones, which occurred between 1979 and 1985. Light-duty vehicles fueled by ethanol quickly took the lead in Brazilian production, surpassing 70% of the new cars produced in the early 1980s (see Figure 2). However, the so-called “oil shock” with the sharp decline in oil prices soon after 1985 added to the rise in sugar prices on international markets, and the withdrawal of subsidies by the government discouraged domestic ethanol and boosted the resumption of gasoline-fueled vehicles production (EPE, 2021; STOLF and OLIVEIRA, 2020).

In the 2000s, Brazil adopted a new strategy for ethanol: (i) its compulsory addition to gasoline and (ii) the production of flex-fuel vehicles, which were manufactured to run on ethanol, gasoline, or a mix of both fuels (POSADA and FAÇANHA, 2015). So, users of flex-fuel vehicles could respond to oil and ethanol price oscillations at the pump, gaining operational flexibility. In this sense, flex-fuel light-duty vehicles have taken the lead in the domestic automotive industry since 2006,

with a production rate of around 80% of all new light-duty vehicles in Brazil (see Figure 2). However, according to Stolf and Oliveira (2020), the flex-fuel technology alone was not the only one responsible for the ethanol success, but all the technological development of the previous decades, government incentives, and the agricultural industry progress in Brazil.

Precious resources, such as research and market development (including the incentives from PROALCOOL), were fundamental for the evolution of the sugar industry in Brazil. The sugar mills have evolved into sugar-alcohol plants, which, with the cogeneration of electricity from the sugar cane bagasse, have evolved into sugar-energy plants (STOLF and OLIVEIRA, 2020). Nowadays, this evolution is moving towards greater energy efficiency through the energetic use of second-generation ethanol and residual biogas (EPE, 2020). Utilizing the lignocellulosic biomass for second-generation ethanol would be preferable over first-generation ethanol for less competition with food production, fewer changes in land use, and less deforestation (DIAS et al., 2011).

### 3.3.2 Biodiesel

Biodiesel is a renewable fuel from vegetable oils and animal fats, mainly produced by esterification and transesterification or enzymatic processes. In addition, it is also possible to get biodiesel from livestock-related waste and used cooking oil (CAMPOS and CARMÉLIO, 2009; FERREIRA et al., 2020).

Brazil has been developing biodiesel technology since the 1970s, with a partnership between the National Technology Institute - INT and the Technological Research Institute - IPT. First, researchers were concomitant with the country's ethanol production development (ANGARITA et al., 2008). However, biodiesel exploitation only gained commercial scale after creating PNPB in 2004. Besides encouraging the production of renewable diesel, PNPB also intends to (i) foster the inclusion of family farming in the productive biodiesel chain, (ii) ensure minimal prices, quality, and supply reliability, and (iii) stimulate biodiesel production from different feedstocks. During the same year, and to achieve PNPB goals, the Brazilian government launched the Social Fuel Seal, granting federal tax subsidies and greater access to credit to biodiesel producers certified as promoters of the productive inclusion of family farmers (CAMPOS and CARMÉLIO, 2009; FERREIRA et al., 2020; MAPA, 2019)

In 2005, the Brazilian government established Law No. 11.097/2005, introducing biodiesel into the national energy matrix, allowing a volume rate of 2% of biodiesel in the petroleum diesel com-

mercialized in the country. The law defined biodiesel as a fuel derived from renewable biomass intended for compressed-ignition internal combustion engines use or for other energy generation types, capable of replacing, partially or totally, fossil fuels (BRAZIL, 2005). According to (FERREIRA et al., 2020), this law established an open technological path for biodiesel production in Brazil, allowing several different processes and a wide range of raw materials. The admixture rate of 2% of biodiesel (B2) was initially proposed in 2004 as an option and, in 2008, as mandatory.

In September 2009, the National Energy Policy Council - CNPE increased the percentage of biodiesel to 5% by Resolution No. 6/2009, and the B5 became mandatory in Brazil on 1st January 2010 (CNPE, 2009). In 2016, Law No. 13.263/2016 established a progressive increase in the biodiesel percentage in the mixture with petroleum diesel, providing the schedule for B8 (8%), B9 (9%), and B10 (10%) (Brazil, 2016). However, in 2018, CNPE issued Resolution No. 16/2018, establishing the mandatory progressive increase of biodiesel percentage towards 15% (B15) until March 2023 (CNPE, 2018). Nonetheless, the biodiesel blending has been reduced on an ad hoc basis since 2020 due to fuel price shocks over the last two years of the Covid-19 pandemic (AGÊNCIA BRASIL, 2020a, 2020b; GAUDARDE, 2022, 2021). Figure 4 summarises the timeline of the Brazilian case.

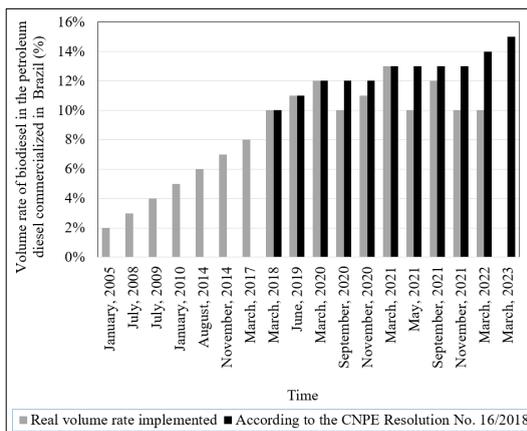


Figure 4 - The volume rate of biodiesel in the petroleum diesel commercialized in Brazil: real volume rate implemented vs CNPE Resolution No. 16/2018

Each region in Brazil has its peculiarities regarding feedstock and motivations for biodiesel production. The opportunity in the North

region is to use African palm (dendê) and babassu oils to produce biodiesel, enabling power generation in remote areas and supplying local waterway transport. In the Northeast region, the encouragement for biodiesel production would come from the social inclusion and job generation appeals for drought-resistant castor bean cultivation. There is the possibility of local soy processing in the Center-West region, reducing diesel oil transport freight costs. Biodiesel production could substitute diesel oil in large urban areas in the South and Southeast regions, contributing to air pollution reduction and sustainability growth (ANGARITA et al., 2008).

Generally, biodiesel has a higher cost of production than petroleum diesel. In this sense, governmental impositions, such as the mandatory blending of biodiesel with petroleum diesel, have helped develop the actual biofuel market in Brazil, as long as biodiesel's economic viability is considered a barrier to its development.

### 3.4 Landmarks, perspectives and challenges

Finally, a summary of the points raised in this section is presented in Table 1, which shows the landmarks, future perspectives, and challenges for the development of each alternative tackled in this work.

Table 1 - Landmarks, future perspectives, and challenges for the development of (i) natural gas and biomethane, (ii) electrification and hybrids, and (iii) biofuels for light-duty vehicle use in Brazil

Fuel	Brazilian Landmarks	Future perspectives	Challenges
Natural Gas and Biomethane	1973 - Petroleum crisis. 1987 - Brazil launched PLANGAS. 1991 - Released the use of natural gas by taxi drivers. 1992 - Authorized the use of natural gas by urban buses, taxis, and freight vehicles. 1996 - Private light-duty vehicles are allowed to run on natural gas.	- Natural gas is viewed as an essential element in the energy transition. - Natural gas can be mixed with biomethane, a gaseous biofuel related to environmental sanitation.	- Infrastructure development. - Distribution network expansion. - Supply security of natural gas. - Natural gas market development. - Costs related to fuel station adaptation. - Costs related to gasoline or diesel vehicle conversion to run on natural gas.
Electrification and Hybrids	1973 - Petroleum crisis. 1974 - First electric vehicle produced in Latin America. 2015 - Reduction of EV import tax from 35% to zero. 2020 - Bill addressing a reduction to zero of the tax on industrialized products. 2021 - Biggest Brazilian city (São Paulo) sanctioned EV tax incentives.	- Vehicle-to-Grid technologies, using EVs as energy storage elements. - Development of car-sharing systems in urban areas. - Adoption of autonomous vehicles. - Lithium-ion batteries with niobium.	- Recharge infrastructure. - Absence of a robust federal-level policy. - Batteries capacity. - Battery's environmental impacts. - High costs of EVs to the low-income population.

Table 1 - Landmarks, future perspectives, and challenges for the development of (i) natural gas and biomethane, (ii) electrification and hybrids, and (iii) biofuels for light-duty vehicle use in Brazil (cont.)

Fuel	Brazilian Landmarks	Future perspectives	Challenges
Biofuels	1970 - First researchers for ethanol and biodiesel development. 1973 - Petroleum crisis. 1975 - Brazil launches PROALCOOL. 1980 - Second phase of PROALCOOL. 1985 - The "oil shock" with the sharp decline in oil prices on international markets. 2000 - Compulsory addition of ethanol to gasoline and the production of flex-fuel vehicles. 2005 - Brazil launched the PNPB, introducing biodiesel into the national energy matrix. 2016 - Law No. 13.263/2016. 2018 - CNPE Resolution No. 16/2018.	Ethanol - Greater energy efficiency through the energetic use of second-generation ethanol and residual biogas.  Biodiesel - Mandatory progressive increase of biodiesel percentage in the petroleum diesel towards 15% (B15) until March 2023. - Perspectives of social inclusion and job creation through productive biodiesel sector.	- Fossil energy is applied to the biofuel production supply chain. - Production and application of synthetic fertilizers. - Deforestation. - Impacts of large monoculture areas on biodiversity. - Negative effect on world's food security. - Pressure on food prices. - Limited availability of arable lands on the planet.

#### 4. CONCLUSIONS AND POLICY IMPLICATIONS

The Petroleum Crisis in 1973 was a landmark for energetic Brazilian history. Due to the high petroleum prices in the following years, the Brazilian government and entrepreneurs took concrete actions toward alternative fuel solutions. Besides the fact that research considering the energetic use of sugar cane was already underway since the 1960s, the first national policy for ethanol was launched only in 1975 with PROALCOOL. In addition, Brazilian engineer João Conrado do Amaral Gurgel only presented his first EV in 1974 due to the high petroleum-based fuel prices.

The Brazilian government's great incentive program to promote ethanol use in light-duty vehicles, along with the high petroleum prices in the mid-1970s, triggered an energetic transition in the Brazilian transport sector in the mid-1980s when about 70% of all new vehicles were manufactured to run on ethanol. However, market forces reverted this transition in the 1990s, when gasoline assumed the top position until the mid-2000s. Finally, in 2006, flex-fuel vehicles (running on gasoline and ethanol) took the lead in most manufactured cars in Brazil, with a market share of around 80% (see Figure 2).

About the milestones, future perspectives and challenges for

the development of each alternative addressed in this work, presented in Table 1, it is concluded that the development of biofuel technology is an essential chapter in the history of the Brazilian automotive industry, especially ethanol derived from sugar cane. If, on the one hand, there have been solid governmental policies incentivizing the use of biofuels since the 1970s, on the other hand, the Brazilian natural conditions were crucial for these policies' success. Availability of arable areas, water resources, abundant solar radiation, and an extensive coastal strip are some of the favourable environmental characteristics of Brazil, which supports all the governmental ambitions toward biofuels.

When it comes to biofuels, Brazil has a relatively diversified portfolio. Potential technologies that might stand out in the following years are second-generation ethanol, biogas and biomethane, and ethanol fuel cells. These solutions toward a low carbon economy could be boosted with adequate and more decisive public policies, such as more legal certainties and more transparent investor rules for the bio-fuel market.

Environmental issues and energy justice of all the technological paths tackled in this work must be assessed closely. The mineral exploitation of raw materials to produce lithium-ion batteries and their relatively short life span could give out more environmental liabilities than a scenario without EVs. Besides that, the impact on electricity prices due to a higher EV charging demand could hamper energy access for the most vulnerable sections of the population.

Biofuel production can also be damaging to the environment. Fossil energy applied to the productive biofuel chain and synthetic fertilizers to the soil is some of the issues that need to be addressed for the future sustainability of the sector. Furthermore, it is essential not to overlook the possibility of negative social impacts of pressure on food prices and food security. Notwithstanding, the force of Brazilian agribusiness and its massive investments in technology could be decisive for improving productivity, increasing production, and protecting the environment.

Natural gas and biomethane can be essential in the Brazilian energy transition. Still, issues related to distribution infrastructure, market maturity, and legal uncertainty must be addressed for their development as alternatives for a greener fleet.

Other countries, however, have been intensely moving towards electrification of the light-duty vehicles fleet. The global electric car stock increased by 43% over 2019, exceeding the mark of 10 million electric vehicles on the world's roads. China, Europe, and the United States lead the market with 5.4 million, 3.3 million, and 1.8 million electric vehicles, respectively. The north-western European region has achieved the highest market share percentage of electric vehicles in their available

vehicles fleet. In 2020, the sales share of new electric vehicles reached 75% in Norway, 50% in Iceland, and 30% in Sweden (IEA, 2021). This movement towards electrification from rich countries, mainly through significant public policies, can influence other countries to go in the same direction. However, Brazil has peculiar characteristics that can make electrification not the best or the only solution for a greener fleet. Brazil needs to find its path towards a low-carbon economy without throwing away its already know-how and traditional experienced trajectory.

## REFERENCES

DE ABREU, C. S. 2013. Análise do desempenho ambiental do GNV como combustível para a coleta de Resíduos Sólidos Urbanos. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre.

AGÊNCIA BRASIL, 2020a. ANP aprova redução temporária do percentual de biodiesel para 11% [WWW Document]. Agência Bras. URL <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-10/anp-aprova-reducao-temporaria-do-percentual-de-biodiesel-para-11> (accessed 5.19.22).

AGÊNCIA BRASIL, 2020b. ANP reduz temporariamente mistura de biodiesel ao diesel para 10% [WWW Document]. Agência Bras. URL <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-08/biodiesel-anp-reduz-temporariamente-mistura-para-10#> (accessed 5.19.22).

ANEEL, 2018. ANEEL Res. No 819. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília.

ANFAVEA, 2021. Brazilian Automotive Industry Yearbook. São Paulo.

ANGARITA, E. E. Y., LORA, E. E. S., COSTA, R. E. DA, LAMÔNICA, H. M., FINGUERUT, J., RAMIREZ, G. A. S., DO NASCIMENTO, M. A. R., 2008. Produção de óleos vegetais e biodiesel: tecnologia e análise do ciclo de vida, in: Cortez, L.A.B., Lora, E.E.S., Gómez, E.O. (Eds.), Biomassa Para Energia. Editora da Unicamp, Campinas, pp. 531–571.

ANP, 2020. Biocombustíveis [WWW Document]. Agência Nac. do Petróleo, Gás Nat. e Biocombustíveis. URL <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis> (accessed 5.19.22).

ANP, 2015. Resolução ANP no 8, de 30 de janeiro de 2015 [WWW Document]. Agência Nac. do Petróleo, Gás Nat. e Biocombustíveis. URL <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-8-2015-2020-09-02-versao-compilada?origin=instituicao> (accessed 5.13.22).

ARAUJO, A. C. M. DE, AMORIM, R. E. H. B., 2017. Electric Mobility - The Challenges of Regulating the Charging Infrastructure during Early Market Development in Brazil, in: 1st E-Mobility Power System Integration Symposium. Berlin.

BERMANN, C., 2012. A Questão Energética: impasses e desafios na Rio+20, in: Ribeiro, W.C. (Ed.), Governança Da Ordem Ambiental Internacional e Inclusão Social. Annablume, São Paulo, pp. 115–142.

BIANCHIN, V., 2021. Imposto de importação de carro elétrico pode subir de zero para 35% [WWW Document]. Mobil. Now. URL <https://www.automotivebusiness.com.br/pt/post/mobility-now/imposto-de-carro-eletrico-pode-subir-de-0-para-35/> (accessed 5.19.22).

BITU, F., 2021. Gurgel Itaipu E400: a história do primeiro carro elétrico brasileiro [WWW Document]. Quatro Rodas. URL <https://quatrorodas.abril.com.br/carros-eletricos/gurgel-itaipu-e400-a-historia-do-primeiro-carro-eletrico-brasileiro/> (accessed 5.18.22).

Brazil, 2016. Law No 13.263. Presidency of the Republic, Brasília.

Brazil, 2005. Law No 11.097. Presidency of the Republic, Brasília.

Brazil, 1996. Decree No 1.787. Republic Presidency, Brasília.

Câmara dos Deputados, 2020. Bill No 5.308. Câmara dos Deputados, Brasília.

CAMEX, 2015. CAMEX Res. No 97. Câmara de Comércio Exterior, Brasília.

CAMPOS, A. A., CARMÉLIO, E. DE C., 2009. Construir a diversidade da matriz energética: o biodiesel no Brasil, in: Abramovay, R. (Ed.), Bio-combustíveis: A Energia Da Controvérsia. Editora Senac, São Paulo, pp. 59–98.

CNPE, 2018. CNPE Res. No 16. Conselho Nacional de Política Energética, Brasília.

CNPE, 2009. CNPE Res. No 6. Conselho Nacional de Política Energética, Brasília.

CONAMA, 2018. CONAMA Res. No 492. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília.

CONAMA, 1986. CONAMA Res. No 18. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília.

DALLMANN, T., FAÇANHA, C., 2017. International comparison of Brazilian regulatory standards for light-duty vehicle emissions. White Pap. Int. Counc. Clean Transp.

DIAS, M. O. S., CUNHA, M. P., JESUS, C. D. F., ROCHA, G. J. M., PRADELLA, J. G. C., ROSSELL, C. E. V., MACIEL FILHO, R., BONOMI, A., 2011. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production? *Bioresour. Technol.* 102, 8964–8971. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.098>

DINGER, A., MARTIN, R., MOSQUET, X., RABL, M., RIZOULIS, D., RUSSO, M., STICHER, G., 2010. Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. *Bost. Consult. Gr.*

EPE, 2021. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. Brasília.

EPE, 2020. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília.

FAO, 2021. Production of Sugar cane: top 10 producers average 1994 - 2020. [WWW Document]. Food Agric. Organ. United Nations. URL <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize> (accessed 5.19.22).

FERREIRA, D., STRAPASSON, A., TININIS, A.G., TININIS, C.R.C.S., PINHO, G., 2020. Biodiesel no Brasil: desafios e oportunidades para uma transição energética sustentável, in: de Medeiros Costa, H.K. (Ed.), *Transição Energética, Justiça Geracional e Mudanças Climáticas*. Editora Lumen Juris, Rio de Janeiro, pp. 321–349.

GAUDARDE, G., 2022. Ação popular tenta reverter B10 e retomar mistura de 14% de biodiesel em 2022 [WWW Document]. EPBR. URL <https://epbr.com.br/acao-popular-tenta-reverter-b10-e-retomar-mistura-de-14-de-biodiesel-em-2022/> (accessed 5.19.22).

GAUDARDE, G., 2021. Governo reduz pela 4a vez mistura obrigatória de biodiesel para B10 [WWW Document]. EPBR. URL <https://epbr.com.br/governo-reduz-pela-4a-vez-mistura-obrigatoria-de-biodiesel-para-b10/> (accessed 5.19.22).

GE, M., FRIEDRICH, J., 2020. 4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor [WWW Document]. WRI Bras.

HESPANHOL, A., 2008. Bioenergia e cultivos alimentares: produzir para quem?, in: *Revista Formação*. FCT/UNESP, Presidente Prudente.

IEA, 2021. Global EV Outlook 2021 [WWW Document]. Int. Energy Agency. URL <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/policies-to-promote-electric-vehicle-deployment> (accessed 5.18.22).

JENDE, O., PLATZER, C., CABRAL, C.B.G., HOFFMANN, H., ROSENFELDT, S., COLTURATO, L. F. DE D. B., BURKARD, T., LINNENBERG, C., STINNER, W., ZÖRNER, F., SCHRÖDER, E. S., 2015. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás. Brasília.

KINCH, D., 2021. CBMM strikes partnerships to pioneer niobium-bearing battery development [WWW Document]. S&P Glob. Commod. Insights.

LINDSEY, R., 2021. Climate Change: Atmospheric Carbon dioxide [WWW Document]. Natl. Ocean. Atmos. Adm.

MAPA, 2019. Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) [WWW Document]. Ministério da Agric. Pecuária e Abast. URL <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/biodiesel/programa-nacional-de-producao-e-uso-do-biodiesel-pnpb> (accessed 5.19.22).

MOUNCE, R., NELSON, J. D., 2019. On the potential for one-way electric vehicle car-sharing in future mobility systems. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 120, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.12.003>

OLIVEIRA, A., 2011. Os agrocombustíveis e a produção de alimentos, in: Simonetti, M.C.L. (Ed.), *A (in)Sustentabilidade Do Desenvolvimento: Meio Ambiente, Agronegócio e Movimentos Sociais*. Cultura Acadêmica, São Paulo.

OMONDI, S., 2017. The World's Largest Producers Of Niobium [WWW Document]. WorldAtlas.

PAIVA, V., 2021. Os carros elétricos são o futuro, mas essa história começou há quase 200 anos [WWW Document]. Hypeness. URL <https://www.hypeness.com.br/2021/10/os-carros-eletricos-sao-o-futuro-mas-essa-historia-comecou-ha-quase-200-anos/> (accessed 5.18.22).

PERONI, J., 2021. Carros elétricos e híbridos já recebem incentivos no Brasil; saiba quais [WWW Document]. Estadão. URL <https://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/carros-eletricos-e-hibridos-ja-recebem-incentivos-no-brasil-saiba-quais/> (accessed 5.19.22).

POSADA, F., FAÇANHA, C., 2015. Brazil passenger vehicle market statistics: international comparative assessment of technology adoption and energy consumption. White Pap. Int. Counc. Clean Transp.

REUTERS, 2020. Fossil fuel-based vehicle bans across the world [WWW Document]. Money News. URL <https://www.reuters.com/article/climate-change-britain-factbox-idINKBN27Y19F> (accessed 5.18.22).

SANTOS, R. A. DE C., 2018. Natural gas vehicles in Brazil: consequences to fuel markets. Fundação Getúlio Vargas (FGV), São Paulo.

SÃO PAULO, 2021. São Paulo State Law No 17.563. São Paulo.

STOLF, R., DE OLIVEIRA, A. P. R., 2020. The success of the brazilian alcohol program (Proálcool) - A decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil. *Eng. Agrícola* 40, 243–248. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p243-248/2020>

SZWARCFITER, L., MENDES, F. E., LA ROVERE, E. L., 2005. Enhancing the effects of the Brazilian program to reduce atmospheric pollutant emissions from vehicles. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 10, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2004.12.002>

TEIXEIRA, F. M. T., 2003. O potencial do gás natural veicular no mercado gaúcho. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

UDDIN, K., DUBARRY, M., GLICK, M. B., 2018. The viability of vehicle-to-grid operations from a battery technology and policy perspective. *Energy Policy* 113, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.015>

UNITED NATIONS, 2021. Nationally determined contributions under the Paris Agreement. Glasgow

VELANDIA VARGAS, J. E., SEABRA, J. E. A., CAVALIERO, C. K. N., WALTER, A. C. S., SOUZA, S. P., FALCO, D. G., 2020. The New Neighbor across the Street: An Outlook for Battery Electric Vehicles Adoption in Brazil. *World Electr. Veh. J.* 11, 60. <https://doi.org/10.3390/wevj11030060>

XU, C., ZHANG, W., HE, W., LI, G., HUANG, J., ZHU, H., 2017. Generation and management of waste electric vehicle batteries in China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 20825–20830. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9890-8>

YEH, S., 2007. An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. *Energy Policy* 35, 5865–5875. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.012>

## BRAZILIAN HYDROGEN ECONOMY DEVELOPMENT

Sabrina Macedo<sup>1</sup>  
Drielli Peyerl<sup>1,2</sup>  
Donato da Silva Filho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade de São Paulo*

<sup>2</sup>*University of Amsterdam*

<sup>3</sup>*Volt Robotics*

DOI: 10.47168/rbe.v29i2.800

### ABSTRACT

Hydrogen is being seen as an essential factor in the success of the energy transition. This paper aims to evaluate the status of the hydrogen economy in Brazil and provide strategies for promoting its development. An adapted SWOT and GUT analysis of the Brazilian hydrogen economy is performed and used to identify and prioritize strategies to fully utilise the strengths and opportunities, avoiding or mitigating the weaknesses and threats. The main results of the analysis are the strong potential of renewables and its competitiveness in the Brazilian matrix. The main weakness is the costs of the entire green hydrogen production chain to take advantage of this renewable potential. Another issue is that Brazil is not showing signs of implementing a clear hydrogen strategy, losing the world investment time in Latin America. Since countries like Chile and Colombia already have their strategies ready, giving positive signals to investors.

Keywords: Hydrogen economy; SWOT analysis; GUT analysis; Hydrogen strategy; Brazil.

### RESUMO

O hidrogênio está sendo visto como um fator essencial para o sucesso da transição energética. Este trabalho tem como objetivo avaliar a situação da economia do hidrogênio no Brasil e fornecer estratégias para promover o seu desenvolvimento. Análises SWOT e GUT da economia brasileira de hidrogênio foram realizadas de forma adaptada e usadas para identificar e priorizar estratégias para utilizar plenamente pontos fortes e oportunidades, evitando ou mitigando pontos fracos e ameaças. Os principais resultados da análise são o forte potencial das renováveis e sua competitividade na matriz brasileira. A principal fra-

queza são os custos de toda a cadeia produtiva do hidrogênio verde para aproveitar esse potencial renovável. Outra questão é que o Brasil não dá sinais de implementação de uma estratégia clara para o hidrogênio, perdendo o tempo de investimento mundial na América Latina. Países como Chile e Colômbia já têm suas estratégias prontas, dando sinais positivos aos investidores.

Palavras-chave: Economia de hidrogênio; Análise SWOT, Análise GUT, Estratégia de hidrogênio; Brasil.

## 1. INTRODUCTION

Hydrogen is an important factor in the energy transition's success in achieving carbon-neutrality in sectors difficult to decarbonise (KAKOULAKI et al., 2021). Hydrogen's high mass-energy density, lightweight, and easy electrochemical conversion allow it to carry energy across geographical regions through pipelines or liquid fuels like ammonia on freight ships. Across sectors, it can be used as a chemical feedstock, burned for heat, used as a reagent for synthetic fuel production, or converted back to electricity through fuel cells. Furthermore, hydrogen's long-term energy storage capacity in tanks or underground caverns makes it a technology that can store energy across seasons. This drove many prominent scientists and economists to suggest a future in which gas will be the leading solution in the battle against climate change (OLIVEIRA; BESWICK; YAN, 2021).

The concept of the hydrogen economy was coined in 1972. Still, in recent years, the cost of its complete value chain has dropped sufficiently so hydrogen can be deployed commercially. The major factors driving the change in the costs of the hydrogen value chain include: (i) the dramatic fall in the cost of solar and wind electricity and, (ii) the steady improvement in the commercial status of electrolyzers, fuel cells and supporting infrastructure (BURDON; DR PALMER; DR CHAKRABORTY, 2019).

The studies carried out by (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020) show that the hydrogen economy has been actively investigated; many reviews and case studies have been prepared as well, as many roadmap reports were published highlighting key progress made and the role of hydrogen within the energy sector. There is a growing interest in making the production and utilisation of hydrogen a more scalable and versatile process. If the global demand for hydrogen increases as a result, then it is likely that a global hydrogen market will emerge to satisfy that demand (MILANI; KIANI; MCNAUGHTON, 2020). According to Astute Analytica, The Global Hydrogen Market is estimated to witness a rise in revenue from US\$ 206.6 billion in 2022 to US\$ 761.3 billion by 2040 (ASTUTE ANALYTICA, 2023).

The production from steam reforming of natural gas and industrial uses of hydrogen in Brazil are relatively consolidated (DA SILVA CÉSAR et al., 2019; MME, 2021a). However, the broader use of hydrogen-based energy projects will require continued research, development and innovation investment allowing the country to become a relevant actor in the Hydrogen Economy (MME, 2021a). According to (CHAVES; DORES; DE CASTRO, 2021; MCKINSEY&COMPANY, 2022), Brazilian renewable power potential is one of the greatest globally, which can drive the country to be a leader in the green hydrogen market. However, green hydrogen production is highly expensive, as it uses technologies that are still emerging in the market and do not have scale production (IEA, 2019). Therefore, the hydrogen production chain must be deployed competitively to contribute to the expansion of this market as a whole (DA SILVA CÉSAR et al., 2019).

Hence, this work aims to evaluate the status of the hydrogen economy in Brazil and provide strategies for promoting its development. A SWOT analysis is used to identify the strengths, weaknesses, opportunities and threats of building a hydrogen economy in Brazil. Under this vision, this study seeks to answer whether Brazil could develop a solid hydrogen economy.

This paper consists of three parts: (i) an overview of hydrogen's role in Brazil, bringing up features about production and infrastructure, the technology used, regulation, market and consumption; (ii) an adapted SWOT and GUT analysis of the Brazilian hydrogen economy is performed. The SWOT and GUT matrix identify and prioritize strategies to fully use the strengths and opportunities, avoiding or mitigating the weaknesses and threats; (iii) conclusion, given an overview of the abovementioned matters.

## 2. OVERVIEW OF HYDROGEN IN BRAZIL

Currently, there are norms applied to the production of hydrogen for medical use, the transport of hazardous products, and technical norms for its storage (MAUR; LEITE; SCH, 2021). However, there is no specific rule from the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL) or the Brazilian Regulatory Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) that regulates the production, storage and transport of hydrogen for energy uses or for the hydrogen market (EPE, 2021a; MAUR; LEITE; SCH, 2021). However, Brazil has been establishing bases for its hydrogen strategy since 2002, and in 2021 the Brazilian Energy Policy Council (CNPE) launched the National Hydrogen Program (EPE, 2021b; PEYERL, 2018). Brazil is a leader in Research, Development and Innovation (RD&I) in hydrogen technologies in Latin America (BRASIL-ALEMANHA, 2021). Several research groups in uni-

versities maintain laboratories of high international standards to develop technologies applicable to the national reality. Brazil also presents some national projects in green hydrogen, as pointed out in (BRASIL-ALEMANHA, 2021).

Green hydrogen is costly across its entire value chain, from electrolysis to transport and fuel cells. The insufficient infrastructure for transport and storage, the high energy losses and the lack of value for the primary benefit (e.g. lower Green House Gas emissions) that green hydrogen can have contribute substantially towards the high costs (TAI-BI et al., 2020).

Electricity input is the major cost of green hydrogen production, and electrolyzers' efficiency and capital cost are second (IEA, 2019; LONGDEN et al., 2020). Brazil's solar and wind power potential will likely foster a strong hydrogen market (CHAVES; DORES; DE CASTRO, 2021; MACEDO; PEYERL, 2022). Besides, another option for Brazil to make green hydrogen production feasible is using spillage from hydro-power plants (a portion of water diverted to the spillway, that is, wasted) (NADALETI; BORGES DOS SANTOS; LOURENÇO, 2019). Brazil has demonstration projects of hydrogen production by electrolysis in the hydroelectric power plants of Itaipu, Itumbiara and Porto Primavera (MME/EPE, 2020).

Brazil's 2050 National Energy Plan outlines that electrolyzers would be produced in the country as an alternative to reduce costs by nationalising the supply chain (MME/EPE, 2020). The electrodes are based on nickel alloys when considering alkaline electrolysis, a raw material abundant in Brazil. That could be a starting point for the electrolyzers manufactured in Brazil to become price-competitive (MME/EPE, 2020).

Natural hydrogen sources may also represent a new attractive primary carbon-free energy resource. The São Francisco Basin, located in the Brazilian states of Minas Gerais and Bahia, belongs to a shortlist of intracratonic basins where hydrogen seepages have been discovered (DONZÉ et al., 2020; MME/EPE, 2020). Another abundant energy source in the country is biomass, according to the Brazilian Electricity Grid Operator (ONS), which currently accounts for 8,3% of the Brazilian supply mix (installed capacity) (ONS, 2021). Apart from water electrolyzes, producing hydrogen by ethanol reform and biomass gasification was also part of the Road Map for the Structuring of the Hydrogen Economy in Brazil and the Science, Technology and Innovation Program for the Hydrogen Economy (ProH2) (AHK, 2019; ZACHARIAS; MACEDO; PEYERL, 2022).

On the scope of hydrogen storage and transportation, costs are also critical. Hydrogen is usually stored and transported in compressed or liquified gas due to its low density (MAYYAS; WEI; LEVIS, 2020). Also,

storage can be carried out in salt caves and depleted gas or oil reservoirs, enabling large-scale and long-term storage with lower costs than tanks (ELIZIÁRIO et al., 2020). Transmission and distribution can also be done through hydrogen blends in the natural gas pipelines (ELIZIÁRIO et al., 2020). Some countries have already instituted limits on hydrogen blending in natural gas networks. Germany ranges from 2% to 8% depending on certain conditions, France 6%, Spain 5%, and Australia 4% (IEA, 2020).

As claimed by PNE 2050, it is highly recommended to evaluate the barriers related to transport, storage and supply infrastructure to define the necessary regulatory improvements, such as the regulation of the mixture of hydrogen with natural gas in the natural gas network, which would minimize the need to build infrastructure and associated costs (MME/EPE, 2020). In 2022, Bill 725 was presented, considering the addition of hydrogen in the natural gas transport pipelines following mandatory minimum percentages in the volume of 5% in 2032 and 10% in 2050 (SENADO FEDERAL, 2022). Regarding the geological storage of hydrogen, PNE 2050 brings up that these issues can be set on the scope of the definition of the regulatory framework for the storage of natural gas (MME/EPE, 2020).

According to (MME; EPE, 2022a) there is considerable production and consumption of hydrogen in Brazil through the grey hydrogen route. The technical paper launched by (MME; EPE, 2022c), points out that the production of hydrogen in Brazilian refineries in the last two years has remained at an average of nearly 300,000 t/year, and it is expected to reach approximately 400,000 t/year by 2030. Currently, the primary purpose of hydrogen production is its use in refineries for hydrotreatment processes of gasoline, diesel and lubricants, aiming at the adequacy of the quality of these products (BRASIL-ALEMANHA, 2021; MME; EPE, 2022c). Up to 2019, hydrogen was used in fertilizers production, which ended with hibernation and leasing of the units (BRASIL-ALEMANHA, 2021). According to (BRASIL-ALEMANHA, 2021), 95% of hydrogen production in Brazil comes from Petrobras, and the remaining 5% is produced by companies that supply industrial gases in the country, such as Air Liquide, Linde, Air Products and Masser, represented by White Martins.

### **3. DEVELOPMENT OF ADAPTED SWOT AND GUT ANALYSIS**

Strengths–weaknesses–opportunities–threats (SWOT) analytical method is widely used for strategy formulation by constituting an essential basis for learning about the situation of the studied object and for designing future strategies to solve the existing problems (REN et

al., 2015). Therefore, SWOT analysis is used in this paper to identify these features in the Brazilian hydrogen economy and subsequently evaluate strategies for promoting its development by exerting strengths, mitigating weaknesses, exploiting opportunities and avoiding threats.

The prioritization matrix GUT is a tool widely used by companies to prioritize problems to be tackled, as well as to analyse the priority in which certain activities must be performed considering three dimensions: gravity, urgency and tendency (CLEGINALDO PEREIRA DE CARVALHO; CAROLINE FERREIRA DE CASTRO, 2020). This work combines the GUT matrix with the SWOT analysis to identify and prioritize decision-making processes that enhance competitiveness for developing a hydrogen economy in Brazil.

Thus, this analysis was carried out based on (AREND, 2021), considering the following methodological steps:

- i. Literature review is built on reports released by the Brazilian government and complemented by reports issued by private educational and research institutions directly related to the hydrogen economy in Brazil.
- ii. Conducting a SWOT analysis to identify the main points about the Federal Government's vision related to the hydrogen economy and provide strategies for promoting its development.
- iii. Conducting a GUT analysis to define priorities given alternatives of action to prioritize problems and treat them. This work adopts the GUT method to consider only the urgency dimension.

Therefore, it was considered to analyse the materials published from December 2020 to December 2022. This period is justified due to the publication of the National Energy Plan 2050 (PNE 2050) on December 2020, pointing for the first time to hydrogen as a disruptive technology and as an element of interest in decarbonising the energy matrix (MME/EPE, 2020). Thus, this chapter intends to evaluate the developments of hydrogen in Brazil up to the present moment.

### **3.1 Performing the SWOT analysis**

To perform the SWOT analysis, 22 reports were selected from the literature review presented in Table 1. The SWOT matrix was built based on (AREND, 2021) by evaluating the reports, according to Tables 2 and 3.

Table 1 - Literature review

Title	Year	Author
Plano Nacional de Energia 2050	2020	MME/EPE
Novas perspectivas para o mercado de hidrogênio com o novo mercado de gás	2020	GESEL
Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio - No EPE-DEA-NT-003/2021	2021	MME/EPE
Programa Nacional do Hidrogênio	2021	MME/EPE
Resolução nº2/2021 do CNPE	2021	CNPE
Resolução nº6/2021 do CNPE	2021	CNPE
O Brasil na Transição Energética para o Hidrogênio Verde	2021	GESEL
O papel estratégico do hidrogênio verde na transição energética global	2021	GESEL
Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro	2021	GESEL
Contextos e Estratégias do Programa Nacional de Hidrogênio do Brasil	2021	GESEL
Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro	2021	German-Brazilian Energy Partnership
Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural	2022	MME/EPE
Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS	2022	UK Government/ MME/EPE
Hidrogênio Turquesa: Produção a partir da pirólise do gás natural	2022	UK Government/ MME/EPE
Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil	2022	MME/EPE
PDE 2031	2022	EPE/MME
Hidrogênio Sustentável - Perspectivas e Potencial para a Indústria Brasileira	2022	CNI
Panorama do Hidrogênio no Brasil	2022	IPEA
Projeto de Lei nº 1878/2022	2022	CMA – Senado Federal
Projeto de Lei nº 725/2022 - Lei do Hidrogênio	2022	Senador Jean Paul Prates - Senado Federal
Consulta Pública MME nº 147 de 14/12/2022 - Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional do Hidrogênio (2023-2025)	2022	MME
Manual para Certificação de Hidrogênio	2022	CCEE

Table 2 - SWOT Matrix, Strengths and Weaknesses

Strengths	Weaknesses
<p>a. Publication of two resolutions with positive implications for the development of hydrogen in the country. The first of them, CNPE Resolution No. 2 of 2021, guides the prioritization of the allocation of research, development and innovation resources regulated by ANEEL and by ANP for hydrogen, among other topics related to the energy sector and the energy transition. The second, CNPE Resolution No. 6 of 2021, deals with the determination to propose guidelines for the National Hydrogen Program (PNH2).</p> <p>b. In 2021, the MME of Brazil launched the PNH2 to define a set of actions that facilitate the development of three fundamental pillars for a successful hydrogen economy: public policies, technology and market.</p> <p>c. The activities carried out within the scope of the PNH2 throughout 2022 resulted in the elaboration of the Triennial Work Plan 2023-2025. This plan aims to guide the federal government's actions in developing the hydrogen sector in the coming three years.</p> <p>d. ABNT has been discussing the regulation of hydrogen technologies, from production to end use, within the scope of the Special Study Commission on Hydrogen Technologies – ABNT/CEE-067.</p> <p>e. Brazil has some relevant investments in R&amp;D of hydrogen production in several technological routes: renewable (ethanol, hydro, wind, solar and biomethane) and natural gas.</p> <p>f. Brazil has demonstration projects using hydrogen technology in buses and ships as well as the production of hydrogen by water electrolysis at the Itaipu, Itumbiara and Porto Primavera hydroelectric plants, in addition to steam reformers from natural gas and ethanol, including business activities.</p> <p>g. The production and industrial uses of grey hydrogen in Brazil are relatively consolidated.</p> <p>h. Initiatives of international partnerships and projects aimed at accelerating the formalization of the national hydrogen strategy. The Brazil-Germany Chamber of Commerce and Industry (AHK) is a good example.</p> <p>i. Given the significant competitiveness of variable renewables (wind and solar) in Brazil, particular interest in the development of green hydrogen in the country by foreign partners (especially Germany) and national and international entrepreneurs.</p> <p>j. The country also has companies that already operate in the hydrogen market and an association that brings together companies in the sector and other interested parties (ABH2).</p> <p>k. Potential of diversified energy resources available, from water, wind, solar, biofuels and biomass sources, including natural gas, the main input in the production of hydrogen in the world.</p> <p>l. Electricity transport infrastructure.</p> <p>m. Brazil has an institutional structure that includes an energy policy with long-term planning (EPE), centralized operation of the electrical system (ONS) that meets the load spatially dispersed in the Brazilian territory, a consistent and independent regulatory framework (ANEEL), an efficient contract compensation system (CCEE) and consolidated financing standard for renewables (BNDES). Ease production flow due to the extension of the coast.</p> <p>n. Hydrogen certification, launched in 2022 by CCEE, for hydrogen production via electrolysis.</p>	<p>a. Institutional, legal and regulatory structures must be improved, adapting them to provide stability, predictability and confidence to investors. It will also be necessary to provide security for the industry and consumers.</p> <p>b. Petroleum refining is an important producer of hydrogen in the country, but this production is used for internal consumption in refineries, and there is no market for this product. As a result, production is equal to the consumption of the refineries, with idle productive capacity available for eventual needs in the hydrogen markets.</p> <p>c. Despite the traditional Brazilian fertilizer market and its use in refining processes, other applications of H2 have not been stimulated to generate an additional competitive market.</p> <p>d. There are no government tax incentives supporting the birth of the market, as happened for the wind and solar energy markets. Furthermore, technical norms must be consistent and non-impeditive for the hydrogen industry development.</p> <p>e. There are technological and cost challenges in hydrogen infrastructure, which require special metallurgy solutions for pipelines and tanks that are more expensive than conventional infrastructures.</p> <p>f. Non-existent technical professional training (currently limited to R&amp;D). Lack of qualified human resources, both at the operational level and at the engineering and technology level, which means that the country will depend, at least for a long time, on international suppliers. The uncertainty and technological backwardness of the Brazilian industry in this sector make the scenario worse by making it difficult for new capital to enter, which usually enters where there is better added value.</p> <p>g. Realizing the energy use of hydrogen still presents significant technological and market challenges throughout its entire supply chain (production, transport, storage and consumption).</p> <p>h. The gas market in Brazil is still very recent when compared to other countries, having a reduced extent of the gas pipeline network, mostly concentrated in the coastal region.</p> <p>i. Need to build new infrastructure for hydrogen (storage and distribution) and limited infrastructure related to natural gas.</p> <p>j. No refuelling stations for use in vehicles with fuel cells.</p> <p>k. There is still no specific regulation for hydrogen use, transport and storage.</p> <p>l. There is a need to identify taxation and financing constraints, as well as the need to improve conditions for attracting investments in low-carbon hydrogen.</p> <p>m. In Brazil, the pre-salt geological formations have favourable characteristics for H2 storage, but the great distance from the pre-salt fields to the land should be considered. Great distances for hydrogen transport are costly. Absence of hydrogen in the energy matrix.</p> <p>n. A few commercial demo projects are in progress.</p> <p>o. Lack of production scale of national equipment (electrolysers, among others).</p> <p>p. PNH2 was published with excess routes and options at the strategic level. However, there is still no clear vision of the value potential of the demanding market, nor the definition of priorities, necessary to create a national strategy.</p>

Table 3 - SWOT Matrix, Opportunities and Threats

Opportunities	Threats
<p>a. Momentum in the international scenario of green hydrogen as a viable technology for the decarbonization of economies.</p> <p>b. World market demand for the acquisition of green hydrogen.</p> <p>c. Petrobras plans until 2026 to produce 100% of the diesel oil in its refineries with very low sulphur content (10 p.m.), indicating an increase in its consumption of hydrogen in the coming years (Petrobras, 2021). In 2031, consumption of around 375 thousand tons is projected.</p> <p>d. 95% of the hydrogen used in Brazil is produced from fossil sources, representing a great opportunity for the Brazilian industry to decarbonize.</p> <p>e. The PDE 2031 points out that the estimate of the total technical potential of hydrogen production in Brazil until 2050 should total 1.8 Gt/year, representing more than 14 times the world demand for hydrogen in 2018.</p> <p>f. Three possible hydrogen hubs lead the race in Brazil: Porto do Pecém and Porto do Açu, followed by the Porto do Suape initiative. These locations are industrial hubs with plans to produce green ammonia and other green commodities for domestic and international markets, creating an important synergy and developing new competitive advantages for the country.</p> <p>g. Hydrogen mixing in natural gas networks can contribute to expanding demand and increase the efficiency of the use of natural gas pipelines.</p> <p>h. Bill 725/2022 provides for the addition of hydrogen at the point of delivery or exit point in transport gas pipelines in mandatory minimum percentages in volume in the following progression: I – 5%, as of January 1, 2032; II – 10%, as of January 1, 2050. This regulation would minimize the need for infrastructure construction and associated costs.</p> <p>i. Research indicates that Brazil may have relevant natural or geological hydrogen potential in the São Francisco Basin and in at least four states (project by the companies GEO4U and Engie Brasil): Ceará, Roraima, Tocantins and Minas Gerais.</p> <p>j. Natural gas resources available in the country, which are associated with the technology for capturing and storing CO<sub>2</sub>, allow the production of blue hydrogen.</p> <p>k. Issues associated with the geological storage of hydrogen can be resolved within the scope of defining the regulatory framework for the storage of natural gas.</p> <p>l. An alternative to reduce costs is the production of electrolyzers in Brazil, as the country has the necessary raw material (nickel reserves).</p> <p>m. Despite being very dependent on imports to meet its demand for fertilizers, Brazil has a strong agribusiness industry. Therefore, it is a great opportunity to produce hydrogen for fertilizers in Brazil, which could benefit from the National Fertilizer Plan. The same goes for ore, steel and other metals. Brazil produces and exports ore, steel and other metals, and these materials, with green certifications, could be premium products in the global commodities market in the coming decades.</p> <p>n. Use of turbinable run-off energy from hydroelectric plants for hydrogen production.</p> <p>o. Even with modest volumes, R&amp;D projects in the field of energy storage can have a very significant long-term impact on the greater insertion of variable renewables in the Brazilian electricity matrix. In particular, mention should be made of the projects for the production of hydrogen for energy storage at the Itaipu Technological Park, of Hytron for the companies BAESA and ENER-CAN and, more recently, the project by Furnas at the Itumbiara Hydroelectric Power Plant (hydroelectric-solar</p>	<p>a. The lack of effective actions to attract investments to generate an additional market that demands H<sub>2</sub>.</p> <p>b. In most sectors, decarbonization via the adoption of green and blue H<sub>2</sub> competes with other decarbonization solutions, such as biofuels and the use of fossil sources with carbon capture and storage (CCS).</p> <p>c. The green hydrogen market tends to be very competitive and the main consumers tend to be, at first, the European countries. The distance between Brazil and Europe may be a challenge.</p> <p>d. Strong competitors are taking place as other countries in Latin America and countries of the south of the European Union, Turkey and the countries of North Africa, which can export H<sub>2</sub> to European countries through adapted gas pipelines. As for exports to Korea and Japan, competitors will be Australia and Vietnam.</p> <p>e. Agility of other governments, such as Chile and Australia, in planning and implementing structuring actions throughout the value chain to produce green H<sub>2</sub> for export and local consumption.</p> <p>f. Hydrogen storage is a challenge. As the lightest chemical substance available, increasing energy density by volume requires high pressures for gaseous storage or cryogenics for liquid storage.</p> <p>g. Hydrogen is an explosive gas which affects social risk perception.</p> <p>h. The decision between centralized or distributed production of hydrogen can circumvent the inexistence of a transport and distribution network. Electrolysers or reformers can be installed close to the place of consumption. Therefore, the business model must be decided by the market.</p> <p>i. There is a lack of definition and understanding of the hydrogen diffusion model in the energy matrix to reveal the market sequence development that will catalyse its industry and avoid technological lock-in of segments that can be served by hydrogen in the future as its competitiveness increases.</p> <p>j. Mixing hydrogen into natural gas networks can bring about some changes to the end-use infrastructure, such as natural gas burners and turbines or modifications to compression systems. However, some countries have already set safe limits for hydrogen mixing in the pipeline system. Brazil still does not have consistent studies of these limits.</p> <p>k. Adding hydrogen to natural gas can decrease the capacity net power transmission from the pipeline system. While this does not give rise to any significant problems for a low-pressure supply operation, partial improvement of the compression system may become necessary.</p> <p>l. Low growth of the Brazilian economy and high indebtedness of the public machine, possibly impacting the volume of public and private investments in H<sub>2</sub>, as well as reducing consumer demand for the product.</p>

Table 3 - SWOT Matrix, Opportunities and Threats (cont.)

Opportunities	Threats
<p>photovoltaic – hydrogen).</p> <p>p. Hydrogen from ethanol, for example, may play a key role in the Brazilian automotive market and in other sugar and ethanol producing countries in the future (such as India, for example). Some automakers present developments, testing prototypes of fuel cell electric vehicles based on the reform of ethanol inside the vehicle or at the gas station. This means that most of the infrastructure is already available in Brazil, with little need for investments to overhaul the infrastructure. Still, synthetic fuels from other hydrogen routes will also play an important role.</p> <p>q. Potential for the use of hydrogen in heavy vehicles, such as trucks, locomotives, ships and aircraft.</p> <p>r. Hydrogen penetration in the production process of renewable hydrocarbons.</p> <p>s. Promotion of inclusive development of Brazilian society in the development process of this market, under the socioeconomic and educational aspects, also considering those related to the fiscal aspect.</p> <p>t. BNDES tends to assume a decisive role, as it did for the birth of the automobile industry, either by customizing its traditional lines of financing, or by raising financing in foreign currency, without exchange risk, as the greatest demand for hydrogen will be for export.</p> <p>u. The establishment of partnerships between the European Union and Brazil shows up as a very promising potential, given the concrete possibilities of exporting Brazilian green hydrogen to the European market, due to the high degree of energy insecurity and the commitments to reduce greenhouse gases of these countries.</p> <p>v. Green hydrogen can become an essential vector for the storage of the surplus of variable energy generation, in order to balance the grid, ensure system stability, assist in meeting demand peaks and, finally, maintain the energy system clean, efficient and sustainable.</p> <p>w. Decree No. 11,075, of May 19, 2022, established the procedures for the preparation of Sectoral Plans for Mitigating Climate Change and instituted the National System for Reducing Greenhouse Gas Emissions. Thus, creating a regulated carbon market, with a focus on exporting credits.</p> <p>x. Bill 1878/2022 suggests the Policy that regulates the production and uses of Green Hydrogen for energy purposes.</p>	

### 3.2 Analysis of key points and recommended strategies

#### 3.2.1 Strengths

Brazil has shown interest in developing its hydrogen strategy since 2002 with programs such as the Science, Technology and Innovation Program for the Hydrogen Economy (PROH2) (PEYERL, 2018). In the last two years, the country has taken important steps towards developing the hydrogen market, as the CNPE Resolution No. 2 of 2021, prioritizing the allocation of RD&I resources, among other topics related to the energy sector and the energy transition. The CNPE Resolution No. 6 of 2021 proposes guidelines for the National Hydrogen Program

(PNH2)(MACEDO; PEYERL, 2023). Then, launching the PNH2 in 2021 resulted in the elaboration of the Triennial Work Plan 2023-2025 in 2022, aiming to serve as a guide for the federal government's actions in developing the hydrogen sector in the coming years. Just as the country also has companies that operate in the hydrogen market and an association that brings together companies in the sector and other interested parties, the Brazilian Hydrogen Association (ABH2) (EPE, 2021a).

Brazil has the potential of diversified energy resources available from water, wind, solar, biofuels and biomass sources, including natural gas, the primary input in hydrogen production in the world (ELIZIÁRIO et al., 2020; EPE, 2021b). In addition, the great competitiveness of wind and solar sources has raised special interest in developing green hydrogen in the country by foreign and national partners (EPE, 2021a). The power sector has an energy policy with long-term planning and a consistent regulatory framework for the electrical system provided by ANEEL with an efficient contract compensation system provided by CCEE and a consolidated financing standard (BNDES) (CHAVES; DORES; DE CASTRO, 2021). This model can be replicated for hydrogen projects. CCEE is also coined for launching the first Hydrogen Certification in the Brazilian market; the initial version will certify the origin of green hydrogen production by water electrolysis (DE AZEVEDO, 2022). The certificate guarantees hydrogen sustainability attributes, ensures its environmental benefit, and increases investors' confidence in the Brazilian industry.

### 3.2.2 Weaknesses

The main barrier to green hydrogen is still the technology costs (MME/EPE, 2020), whether it's electrolyzers for green hydrogen or CCUS technology for blue hydrogen. Additionally, institutional, legal and regulatory structures must be improved, adapting them to provide investors stability, predictability and confidence (MME; EPE, 2022b).

The gas market in Brazil is still very recent, having a reduced gas pipeline network, mostly concentrated in the coastal region (BRASIL-ALEMANHA, 2021; CHAVES; DORES; DE CASTRO, 2021), limiting its use for hydrogen transport. This issue implies the need for new infrastructure for hydrogen transport and storage (MME/EPE, 2020). The pre-salt geological formations have favourable characteristics for hydrogen storage, but the long distance from the pre-salt fields to land will require expensive transport (CNI, 2022).

The materialization of the use of hydrogen still presents significant technological and market barriers throughout its entire value chain (production, transport, storage and consumption) (MME, 2021b).

### 3.2.3 Opportunities

The PDE 2031 points out that the estimate of the total technical potential of hydrogen production in Brazil until 2050 should reach 1.8 Gt/year, representing more than 14 times the world demand for hydrogen in 2018 (MME; EPE, 2022b). Hydrogen is seen as a viable technology for the decarbonization of economies, busting a world market demand for the acquisition of green hydrogen and enabling domestic production for export and consumption (BRASIL-ALEMANHA, 2021).

Besides, green hydrogen can become an essential vector for storing the surplus of intermittent energy generation to balance the grid, ensure system stability, assist in meeting demand peaks and, finally, maintain the energy system clean, efficient and sustainable (GESEL - UFRJ, 2021).

Despite the competitiveness of renewables (wind and solar) for the production of green hydrogen, taking advantage of biofuels for producing hydrogen is another route to be explored, considering ethanol and biogas, once Brazil already has a well-established economy and infrastructure around this product (EPE, 2021b, 2021a; LAZARO; THOMAZ, 2021).

Issues associated with natural gas regulation can minimize the need for infrastructure construction, as geological storage of hydrogen can be solved within the scope of defining the regulatory framework for the storage of natural gas and the mixture of hydrogen in the natural gas grid. The possibility of mixing hydrogen with natural gas would allow free competition for the 9,409 km of transport gas pipelines, leveraging the New Gas Market (ELIZIÁRIO et al., 2020). In this direction, Senate's Draft Bill 725/2021 calls for hydrogen mixing obligation transport gas pipelines from 2032 (SENADO FEDERAL, 2022).

In Brazil, 95% of the hydrogen used is produced from fossil sources, representing a great opportunity for the Brazilian industry to decarbonize (CNI, 2022). The use of hydrogen in the Brazilian industry can be absorbed in sectors such as steel and metallurgical, petrochemical, food, flat glass and energy generation (BRASIL-ALEMANHA, 2021; EPE, 2021b).

The transport sector also represents a great opportunity for hydrogen introduction. Trucks used in the mining sector currently have high diesel consumption. For example, replacing one transport truck in mines is equivalent to taking fifty gasoline passenger cars off the streets. In addition to using trucks powered by fuel cells, other heavy vehicles operating in mines can be changed to this technology (CAVALCANTE; OLIVEIRA, 2022).

Even in light transport, hydrogen can play an important role, bringing yet another technological alternative to the vehicle electrifica-

tion process, either through fuel cells or, indirectly, through synthetic fuels (MME, 2021b).

Brazil has a strong agribusiness industry, becoming a great opportunity to produce hydrogen for fertilizers, which could benefit from the National Fertilizer Plan (MME; EPE, 2022b). After refineries, fertilizers represent Brazil's second greatest demand for hydrogen, with around 1,200 thousand Nm<sup>3</sup> or 87 thousand tonnes per year (CNI, 2022).

Green hydrogen projects in Brazil must be built in ports with industrial districts, which have the means to produce green ammonia and other green commodities for the domestic and international markets, creating important synergy and developing new competitive advantages for the country (MME; EPE, 2022b). Thus, hubs are being prospected in port regions, like Pecém Port, Açú Port, and Suape Port (CNI, 2022).

Expanding the hydrogen market will be very important to promote Brazilian society's technological and inclusive development under the socioeconomic and educational aspects.

### 3.2.4 Threats

Some threats are surrounding the hydrogen market, such as whether it will really be possible for this source to be competitive with other sources in the future (EPE, 2021a).

One of the worries that is raised in literature is about storage; as hydrogen is the lightest chemical substance available, increasing energy density by volume requires high pressures for gaseous storage or cryogenics for liquid storage, making this process expensive (EPE, 2021a, 2021b; GESEL - UFRJ, 2021). Avoiding technology lock-in is another challenge, as the market sometimes takes unexpected directions, and the market sequence catalyses the industry (EPE, 2021a).

It is necessary to consider possible competitive races in the supply of green hydrogen with Latin American countries such as Chile (BRASIL-ALEMANHA, 2021). As stated by (CNI, 2022), the great distance between Brazil and potential customers, as for the supply of the European Union (EU), strong competitors will be the countries of the South EU, Turkey and countries of North Africa, which will be able to export hydrogen to EU through adapted gas pipelines. As for exports to Korea and Japan, competitors will be Australia and Vietnam (CNI, 2022).

Brazil lacks effective actions to attract investments to generate an additional market for hydrogen demand (CNI, 2022). As the PNE 2050 points out, the Brazilian perception of hydrogen is like a disruptive future technology, while the global scenario envisions a market growth

with large-scale hydrogen technologies as early as 2040.

### 3.3 Performing GUT analysis

The GUT matrix will be used to rank the aspects evaluated in the SWOT analysis. The first step is to identify the relevance of each aspect of the analysed reports. To define the size of the relevance, the number of reports that defended each of the points in the four divisions of the SWOT analysis was identified. After that, the top points were selected so that the data to implement a GUT matrix was generated. Crossing Strengths and Weaknesses with Opportunities and Threats, the result is an index called relevance. Figure 1 brings these results, where through a heatmap, it is possible to see that the greenest stands for the highest relevance, yellow for the intermediate and red for the smallest relevance.

		Relevance	Opportunities				Threats			
			World market demand	Hydrogen from ethanol	Hydrogen hubs	Hydrogen blend in natural gas network	Competitiveness of other countries	Challenges and risk of hydrogen storage and transport	Lack of studies of mixing natural gas into natural gas network	Competitiveness with other decarbonization solutions
Strengths	International partnerships	6	30	30	36	54	30	24	24	18
	PNH pillars to develop a hydrogen Economy	6	30	30	36	54	30	24	24	18
	CNPE Resolutions for hydrogen development	7	35	35	42	63	35	28	28	21
	Competitiveness of variable renewables	9	45	45	54	81	45	36	36	27
Weaknesses	Technological and cost challenges	5	25	25	30	45	25	20	20	15
	Incipient natural gas market	4	20	20	24	36	20	16	16	12
	Institutional, legal and regulatory structures must be improved	3	15	15	18	27	15	12	12	9
	No specific regulation	2	10	10	12	18	10	8	8	6

Figure 1 - GTU Matrix for Hydrogen Development in Brazil

Based on this criterion, it is possible to see that:

- I. Items presenting high punctuation (greener) are concentrated on the border Strengths and Opportunities, mostly in “competitiveness of variable renewables” on the side of Strengths and “hydrogen blend in natural gas network” on the side of Opportunities.
- II. Items presenting lower punctuation (redder) are located along the side of Threats and Weakness, with the items between “no specific regulation” and “institutional, legal and regulatory structure must be improved” from the side of Weakness, and the item “competitiveness with other decarbonization solutions” on the side of Threats.

III. The GUT analysis shows that Brazil presents strong opportunities for hydrogen development than the other aspects of the SWOT analysis.

#### 4. CONCLUSION

Hydrogen has been identified as an important component of global decarbonization. In this way, Brazil has a huge and diversified energy potential that can be driven by hydrogen production. This potential is attracting interest from investors to develop a hydrogen market both domestically and for export.

The SWOT and GUT analysis were used to analyse Brazil's hydrogen economy's status and provide strategies for promoting its development. About the strengths and opportunities found in the analysis, some can be highlighted:

- I. The strong potential of renewables and their competitiveness in the Brazilian matrix, mainly wind and solar PV, which can be used to produce green hydrogen with competitive energy prices;
- II. The regulation of the New Gas Market can be improved to minimize additional costs with hydrogen infrastructure, as the geological storage of hydrogen can be resolved within the scope of defining the regulatory framework for natural gas storage. Also, the mixture of hydrogen in the natural gas grid. The possibility of mixing hydrogen with natural gas would allow free competition for the 9,409 km of transport gas pipelines.

In the next years, Brazil is expected to experience an energy surplus due to the electricity market deregulation. Consumers will be able to purchase electricity directly from generators and traders (nowadays, only large high-voltage consumers have this option), leaving distribution utilities an energy surplus based on long-term PPAs (Power Purchase Agreements). In this context, energy prices tend to be low, which may represent an opportunity for using electricity, mainly from hydropower, to produce green hydrogen.

About the weaknesses and threats found in the analysis, here are some highlights:

- I. The main weakness found in the literature is the cost of the entire green hydrogen production chain. So, this technology needs to be developed and scaled to become more competitive. But this will require efforts not only from Brazil, but from the world.
- II. Competitiveness with other countries, even in Latin America, threatens Brazil. The country is struggling to launch its hydrogen strategy. The country has shown signs of delay in its planning, mainly by launching a Triennial Plan, focusing only on studies during a period

that seems too long. The country is not focused on putting together its strategy, setting goals and showing investors that it is interested in developing a hydrogen economy.

The technical, political and economic difficulties in deploying a hydrogen economy in Brazil highlight the need for a different energy policy, including:

I. PNH does not focus on a specific technology. It opens a range of different types of hydrogen, does not address the main types of hydrogen potential, and does not focus on what the global market has invested.

II. Some initiatives have been taken to develop a hydrogen market. Still, they are not enough, both from the point of view of technological development, legal and regulatory frameworks.

III. Brazil is not showing clear signs of providing a security policy for investors who are prospecting the country for the development of hydrogen projects.

IV. The northeast region has taken some steps, but a state movement is insufficient. The country as a whole must be aligned with this new market's development possibilities, providing investors with legal and regulatory stability.

V. Several public policies used in the development of renewables, such as wind and solar sources, can be used to expand the hydrogen market, for example, the Reidi (Special Regime of Incentives for the Development of Infrastructure), green hydrogen projects could be included in the program.

VI. Grid availability may be a concern for developing hydrogen projects, since most renewable plants are not allowed to connect to the grid due to the lack of infrastructure (transmission lines and substations).

Brazil has not shown signs of implementing a clear hydrogen strategy, with goals to be achieved. The Triennial Plan presents necessary actions to be developed but over a very long period. If Brazil creates its strategy based on studies from the three-year plan, it will only be launched after 2025. The country is losing the world investment time within Latin America itself. Countries like Chile and Colombia already have their strategies ready, giving positive signals to investors.

Brazil needs to accelerate its strategy, as developing a hydrogen economy can bring numerous benefits beyond environmental improvement. Establishing this new technology will require human resources, which means that the qualification of professionals will be key to keeping and developing this economy. Meaning that this whole process

can contribute significantly to people's prosperity and, at the same time to the country's growth.

## REFERENCES

AHK. Policy Paper Green Hydrogen and Fuel Cells in Brazil : Context Overview and Outlook. [s.l.: s.n.].

AREND, L. O mercado de Gás Natural Liquefeito no Brasil: Realidade e expectativas futuras. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2021.

ASTUTE ANALYTICA. Hydrogen Market - Industry Dynamics, Market Size, and Opportunity Forecast to 2040. Disponível em: <[https://www.astuteanalytica.com/industry-report/hydrogen-market?gclid=CjwK-CAiAl9efBhAkEiwA4Toriv6CeIQdUddbOWH4NrNBWvXutALOZdIyd-johRzyZOPWb\\_\\_Bz3AFLuhoCuhoQAvD\\_BwE](https://www.astuteanalytica.com/industry-report/hydrogen-market?gclid=CjwK-CAiAl9efBhAkEiwA4Toriv6CeIQdUddbOWH4NrNBWvXutALOZdIyd-johRzyZOPWb__Bz3AFLuhoCuhoQAvD_BwE)>. Acesso em: 21 fev. 2023.

BRASIL-ALEMANHA, C. DE C. E I. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user\\_upload/brazil/media\\_elements/Mapeamento\\_H2\\_-\\_Diagramado\\_-\\_V2h.pdf](https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf)>.

BURDON, R.; DR PALMER, G.; DR CHAKRABORTY, S. National Hydrogen Strategy- Submission. n. March, p. 1–23, 2019.

CAVALCANTE, R.; OLIVEIRA, D. E. Panorama do Hidrogênio no Brasil. IPEA, 2022.

CHAVES, A. C.; DORES, A. B.; DE CASTRO, N. O Brasil na Transição Energética para o Hidrogênio Verde. Valor Econômico, p. 1–3, 2021.

CLEGALDO PEREIRA DE CARVALHO; CAROLINE FERREIRA DE CASTRO. Application of a tool based on the GUT matrix for the improvement of quality Indicators in the automotive industry. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences, v. 1, n. 1, p. 037–043, 30 nov. 2020.

CNI. Hidrogênio Sustentável Perspectivas e Potencial para a Indústria Brasileira. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2022/8/hidrogenio-sustentavel-perspectivas-e-potencial-para-industria-brasileira/>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

DA SILVA CÉSAR, A. et al. Hydrogen productive chain in Brazil: An analysis of the competitiveness' drivers. Journal of Cleaner Production, v. 207, p. 751–763, 2019.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. International Journal of Hydrogen Energy, 2020.

DE AZEVEDO, J. H. P. Manual para a Certificação de Hidrogênio REV1.0. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/documents/80415/919444/Manual%20para%20a%20Certifica%C3%A7%C3%A3ode%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20REV1.0.pdf/6534f304-8ea5-0e87-9f33-b92ac67fd8b7>>. Acesso em: 23 jan. 2023.

DONZÉ, F. V. et al. Migration of natural hydrogen from deep-seated sources in the São Francisco basin, Brazil. *Geosciences (Switzerland)*, v. 10, n. 9, p. 1–16, 2020.

ELIZIÁRIO, S. et al. Novas perspectivas para o mercado de hidrogênio com o novo mercado de gás. p. 1–7, 2020.

EPE. Bases para a consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. p. 36, 2021a.

EPE. MME apresenta ao CNPE proposta de diretrizes para o Programa Nacional do hidrogenio (PNH2). Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2->>>.

GESEL - UFRJ. Perspectivas da Economia do Hidrogênio Texto de Discussão do Setor Elétrico. [s.l.: s.n.].

IEA. The Future of Hydrogen. [s.l.] OECD, 18 jun. 2019. Disponível em: <[https://www.oecd-ilibrary.org/energy/the-future-of-hydrogen\\_1e0514c4-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/the-future-of-hydrogen_1e0514c4-en)>. Acesso em: 27 maio. 2023.

IEA. Current limits on hydrogen blending in natural gas networks and gas demand per capita in selected locations. p. 1–3, 2020.

KAKOULAKI, G. et al. Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, v. 228, p. 113649, 15 jan. 2021.

LAZARO, L. L. B.; THOMAZ, L. F. Stakeholder participation in the formulation of Brazilian biofuel policy (RenovaBio). *Ambiente & Sociedade*, v. 24, p. e00562, 3 nov. 2021.

LONGDEN, T. et al. Green hydrogen production costs in Australia: implications of renewable energy and electrolyser costs. 2020.

MACEDO, S. F.; PEYERL, D. Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10 fev. 2022.

MACEDO, S.; PEYERL, D. Hydrogen: A Brazilian Outlook. Em: PEYERL, D.; RELVA, S.; DA SILVA, V. (Eds.). *Energy Transition in Brazil*. [s.l.] Springer, Cham, 2023. p. 159–171.

MAUR, P.; LEITE, A.; SCH, P. Hidrogênio : usos energéticos , políticas públicas e regulamentação. Disponível em: <<https://www.conjur.com.br/2021-mai-09/opinioao-hidrogenio-usos-politicas-publicas-regulamentacao?imprimir=1>>.

MAYYAS, A.; WEI, M.; LEVIS, G. Hydrogen as a long-term, large-scale energy storage solution when coupled with renewable energy sources or grids with dynamic electricity pricing schemes. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 33, p. 16311–16325, 24 jun. 2020.

MCKINSEY&COMPANY. Brazil could potentially become a key player in the global economy's decarbonization process while driving sustainable inclusive growth. Disponível em: <[https://www.mckinsey.com/br/en/our-insights/all-insights/the-green-hidden-gem-brazils-opportunity-to-become-a-sustainability-powerhouse#](https://www.mckinsey.com/br/en/our-insights/all-insights/the-green-hidden-gem-brazils-opportunity-to-become-a-sustainability-powerhouse#/)>. Acesso em: 22 maio. 2023.

MILANI, D.; KIANI, A.; MCNAUGHTON, R. Renewable-powered hydrogen economy from Australia's perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 46, p. 24125–24145, 21 set. 2020.

MME. Baseline to support the Brazilian Hydrogen Strategy. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT\\_Hidrogenio\\_EN\\_revMAE\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogenio_EN_revMAE(1).pdf)>.

MME. Programa Nacional do Hidrogênio - Proposta de Diretrizes. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/PublishingImages/Paginas/MME-apresenta-ao-CNPE-proposta-de-diretrizes-para-o-Programa-Nacional-do-Hidrogenio-PNH2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2022b.

MME; EPE. Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2023a.

MME; EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031\\_RevisaoPosCP\\_rvFinal\\_v2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf)>. Acesso em: 2 out. 2022b.

MME; EPE. Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-667/NT-EPE-DPG-SDB-2022-01%20-%20Hidrog%C3%AAnio%20em%20Refinarias.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2023c.

MME/EPE. National Energy Plan 2050. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 23 maio. 2023.

NADALETI, W. C.; BORGES DOS SANTOS, G.; LOURENÇO, V. A. The potential and economic viability of hydrogen production from the use of hydroelectric and wind farms surplus energy in Brazil: A national and pioneering analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 5, p. 0–11, 2019.

OLIVEIRA, A. M.; BESWICK, R. R.; YAN, Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 33, p. 100701, 1 set. 2021.

ONS. Boletins da Operação. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-fator-capacidade-medios-mensais.aspx>>.

PEYERL, D. Tecnologias disponíveis para mitigação dos efeitos adversos sobre o meio ambiente: das primeiras renováveis à economia do hidrogênio. Em: PIMENTAL, C.; ROLIM, M. J. C. P. (Eds.). *Caminhos jurídicos e regulatórios para a descarbonização do Brasil*. 2021. ed. Belo Horizonte: Editora Forum: 2021, 2018. p. 119–131.

REN, J. et al. Hydrogen economy in China: Strengths–weaknesses–opportunities–threats analysis and strategies prioritization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 1230–1243, 1 jan. 2015.

SENADO FEDERAL. Projeto de Lei 725, de 2022.

TAIBI, E. et al. Green Hydrogen Cost Reduction. IRENA, 1 dez. 2020.

ZACHARIAS, L. G. L.; MACEDO, S. F.; PEYERL, D. Bio-Hidrogênio para Veículos no Brasil: Uma Análise Por Meio da Perspectiva Multinível. Em: PEYERL, D.; MASCARENHAS, K. L.; DOS SANTOS, E. M. (Eds.). *Transição Energética, Percepção Social e Governança*. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2022. p. 173–191.



## 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.

