

revista brasileira de  
**ENERGIA**



Sociedade Brasileira de  
Planejamento Energético

Volume 28, Nº 2, 2º Trimestre de 2022

**Diagramação**

Kelly Fernanda dos Reis

**Revisão**

Arnaldo Walter e Kelly Fernanda dos Reis

**Revista Brasileira de Energia  
Vol. 28 - nº 2**

Itajubá, 2022 - SBPE

Editor: Arnaldo Walter  
183 p.

1 - Energia - artigos

2 - Publicação científica

ISSN: 2317-6652

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

revista brasileira de  
**ENERGIA**

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

### **Editor Responsável**

Arnaldo Walter

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

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

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

### **Comitê Editorial**

Alexandre Salem Szklo

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Annemarlen Gehrke Castagna

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Edmilson Moutinho dos Santos

Universidade de São Paulo - USP

Helder Queiroz Pinto Junior

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Joaquim Eugênio Abel Seabra

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Kamyla Borges da Cunha

Instituto Clima e Sociedade - iCS

Luiz Augusto Horta Nogueira

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Mônica Cavalcanti Sá de Abreu

Universidade Federal do Ceará - UFC

Sergio Valdir Bajay

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Virgínia Parente

Universidade de São Paulo - USP

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

### **Diretoria da SBPE**

Presidente: Edson da Costa Bortoni

Vice-Presidente: Rubem César Rodrigues Souza

Diretora de Eventos: Juliana Klas

Diretor de Publicações: Arnaldo Walter

Diretor Administrativo: Paula Meyer Soares

### **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 e Lúcia Garrido Rios

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

A Revista Brasileira de Energia vem apresentando estatísticas relativas ao processamento das submissões, processo que começou com o primeiro número de 2022. Com a implantação de novos procedimentos gerenciais, a partir de outubro de 2020, foi possível reduzir o tempo necessário para avaliação e tomada de decisões.

Para o conjunto de submissões analisadas desde outubro de 2020, e ainda por conta das pendências existentes, o tempo médio de tomada de decisão é longo – 270 dias –, sendo um pouco menor – 245 dias – para os artigos aceitos para publicação. O número de dias é contado da data de submissão até a data da decisão editorial final – aceitação ou rejeição –, e nessa avaliação não estão sendo considerados os artigos publicados em número especial (no volume 27, números 2 e 3, publicados em 2021).

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 90 dias, sendo de 143 dias para os artigos aceitos. Para os sete artigos publicados neste número, o tempo médio entre a submissão e a decisão editorial final também foi de 143 dias.

Assim, o compromisso de alcançar e manter o tempo de tomada de decisão abaixo de 150 dias, divulgado na publicação anterior, está sendo cumprido. Entretanto, a RBE ainda precisa melhorar seus procedimentos, e estamos trabalhando para tanto.

## Artigos mais acessados

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 o número de consultas a *abstracts* e os *downloads* dos artigos publicados, desde o início do gerenciamento das publicações.

Desde o início do monitoramento, em pouco mais de quatro anos houve mais de 130 mil *downloads* dos artigos publicados; o levantamento aqui apresentado foi feito na última semana de junho de 2022. Entre todos os artigos já publicados, os cinco mais acessados são apresentados na Tabela 1.

Já nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os artigos mais acessados entre aqueles publicados em 2020 e 2021 (até junho de 2022), respectivamente.

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

Tabela 1 - Os artigos mais acessados desde o início do monitoramento, em 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	6832
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	6692
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	6311
<i>Investment analysis for wind energy projects</i>	Wagner Sousa de Oliveira e Antônio Jorge Fernandes	2013	v. 19 n.02	4591
Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos	Alessandra Magrini	2011	v. 08 n. 01	2968

Tabela 2 - Artigos mais acessados dentre os publicados em 2020

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de downloads
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	420
A regulação da geração distribuída no Brasil	Rodrigo Mota Rodi e Célio Bermann	2020	v. 26 n. 02	411
Fundamentos do planejamento energético centralizado e do descentralizado	Arthur Mendonça Quinhones Siqueira e Célio Bermann	2020	v. 26 n. 01	392

Tabela 2 - Artigos mais acessados dentre os publicados em 2020 (cont.)

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de downloads
(In)Justiça energética: definição conceitual, parâmetros e aplicabilidade no caso do Brasil	Vinicius Eduardo Ribas, André Felipe Simões	2020	v. 26 n. 04	384
Impactos das mudanças climáticas na disponibilidade do recurso energético solar	Rodrigo Santos Costa, Graziela Luzia da Costa, Francisco José Lopes de Lima, André Rodrigues Gonçalves, Fernando Ramos Martins, Enio Bueno Pereira, Madeleine Sánchez Gácita Casagrande	2020	v. 26 n. 04	320

Tabela 3 - Artigos mais acessados dentre os publicados em 2021

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de downloads
Energia solar fotovoltaica	Oswaldo Soliano Pereira e Ricardo Ruther	2021	v. 27 n. 03	458
Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes	Luiz Augusto Horta Nogueira, Rafael Silva Capaz e Electo Silva Lora	2021	v. 27 n. 03	337
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 e Alexandre Szklo	2021	v. 27 n. 03	307
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	231
Emissões de gases de efeito estufa no setor de energia, no Brasil	Arnaldo Walter	2021	v. 27 n. 03	191

**Arnaldo Walter**

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

## EDITORIAL

Este é o segundo número publicado em 2022 pela Revista Brasileira de Energia (RBE). Desde a publicação anterior (Vol. 28, nº 1), estão sendo apresentadas estatísticas dos tempos de processamento das submissões e dos registros de acesso às publicações. Ainda estão sendo apresentadas as médias gerais do tempo de processamento, embora o objetivo seja apresentar o tempo de cada artigo publicado. Quanto aos registros de acesso, neste número estão sendo apresentados os artigos mais acessados desde que o monitoramento começou a ser feito, ou seja, nos últimos quatro anos, bem como os mais acessados entre os artigos publicados nas edições de 2020 e 2021.

No presente número estão sendo publicados sete trabalhos que passaram pelo processo regular de análise por pares, além de um artigo na seção “Opinião”. Os artigos estão sendo publicados na sequência cronológica das submissões.

O artigo de Jonas V. Pinto Jr. e Paulo Henrique S. L. Coelho é uma contribuição sobre o limiar de percolação elétrico de células orgânicas e polímeros/nanotubos em aplicação em células fotovoltaicas.

Já Higor Tadeu Miranda e coautores apresentam uma análise de riscos na implantação de projetos fotovoltaicos em residências.

Fabiano Fuga e Dorel Soares Ramos analisam a tarifação do sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil e faz uma proposta associada ao conceito de pico coincidente, visando a redução da demanda de ponta.

A contribuição de Rafael Luis Sacco e coautores versa sobre fontes não convencionais de gás, analisadas em função da disponibilidade no sul e sudeste do Brasil (*shale gas*, metano existente em minas de carvão mineral, e biogás que poderia ser produzido a partir de efluentes animais). No artigo, foi empregada uma análise SWOT.

André A. S. Silva analisa a formação e a atuação do fórum de energias renováveis em Roraima, contextualizando-o no âmbito da transição energética.

A contribuição de Maria Isadora F. Marquesine trata da avaliação de uma usina concentradora de energia solar, em análise de uma possível instalação no Paraná.

Já o trabalho de Clinton Pereira da Silva e coautores é uma análise relativa aos tipos de aerogeradores e à altura de instalação de seus rotores; o caso analisado é um potencial parque eólico no nordeste do Brasil.

Finalmente, na seção Opinião é publicado o texto do Prof. Emílio Lèbre La Rovere, analisando a contribuição do Prof. Luiz Pinguelli Rosa, em energia e meio ambiente. O Prof. Pinguelli Rosa, falecido em março de 2022, foi um dos precursores da área de planejamento energético no Brasil, tendo sido Presidente da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético (SBPE).

O Comitê Editorial da RBE, presta aqui sua homenagem ao Prof. Pingelli.

Obrigado pela atenção.

**Arnaldo Walter**

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

## SUMÁRIO

### **SIMULAÇÃO DO LIMIAR DE PERCOLAÇÃO ELÉTRICO DE CÉLULAS ORGÂNICAS DE POLÍMERO/NANOTUBOS DE CARBONO PARA APLICAÇÃO EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....11**

Jonas Vicente Pinto Júnior, Paulo Henrique da Silva Leite Coelho

### **ANÁLISE DE RISCOS NA IMPLANTAÇÃO DE PROJETOS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA.....36**

Higor Tadeu Azevedo Miranda, Leandro César Mol Barbosa, Mauricio Sá Santos Diniz, Sílvia Maria Santana Mapa

### **A UTILIZAÇÃO DO CONCEITO DE PICO COINCIDENTE PARA POTENCIALIZAR A RESPOSTA DA DEMANDA NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO.....65**

Fabiano Fuga, Dorel Soares Ramos

### **UNCONVENTIONAL SOURCES OF GASEOUS ENERGY IN THE SOUTHERN REGION OF BRAZIL: A COMPARATIVE SWOT ANALYSIS.....86**

Rafael Luis Sacco, Thiago Luis Felipe Brito, Edmilson Moutinho dos Santos, Patrícia Helena Lara dos Santos Matai

### **ADVOCACY E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: O CASO DO FÓRUM DE ENERGIAS RENOVÁVEIS DE RORAIMA.....113**

André Andriw Santos da Silva

### **ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO PARA INSTALAÇÃO DE USINA À BASE DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA.....133**

Maria Isadora de Faveri Marquesine

### **AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO TIPO DE AEROGERADOR E DA ALTURA DE INSTALAÇÃO SOBRE OS PARÂMETROS ENERGÉTICOS DE UM PARQUE EÓLICO.....154**

Clinton Pereira da Silva, Gilberto Calderucci Gontijo Costa, Pedro Leite de Souza, Michael Jourdain Gbedjinou, Ivan Felipe Silva dos Santos

## OPINIÃO

### **A CONTRIBUIÇÃO DE LUIZ PINGUELLI ROSA AO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO NO BRASIL.....172**

Emílio Lèbre La Rovere

## **SIMULAÇÃO DO LIMIAR DE PERCOLAÇÃO ELÉTRICO DE CÉLULAS ORGÂNICAS DE POLÍMERO/NANOTUBOS DE CARBONO PARA APLICAÇÃO EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

Jonas Vicente Pinto Júnior<sup>1</sup>  
Paulo Henrique da Silva Leite Coelho<sup>1</sup>

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

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.621

### **RESUMO**

No âmbito de novas tecnologias para o uso de energias renováveis, os sistemas fotovoltaicos encontram-se em crescente aplicação. As células solares sensibilizadas por corantes (DSSC – Dye-sensitized Solar Cells), em fase de pesquisa e desenvolvimento, mostraram grande potencial. Já os nanocompósitos poliméricos condutores, carregados com nanotubos de carbono (NTCs), apresentaram características atrativas, como boa condutividade, baixo peso específico e baixo valor de limiar de percolação. Com essas características apresentadas pelos NTCs, pesquisas são realizadas para substituir o material óxido condutor transparente (ITO) em células solares orgânicas. Nesse escopo, a modelagem e simulação desse limiar têm um papel de suma importância no desenvolvimento dessa tecnologia. Além de ter impulsionado a idealização deste trabalho, a modelagem e a simulação possibilitaram a realização de um estudo envolvendo a percolação elétrica de nanocompósitos, constituída por nanotubos de carbono tortuosos dispersos aleatoriamente em matriz polimérica, simulada através de um programa elaborado pelo método de Monte Carlo e apoiado no modelo do volume excluído, destinado aos sistemas matriciais bidimensionais e tridimensionais. O limiar de percolação foi simulado e analisado para diferentes razões de aspecto e frações volumétricas de carga. Como resultado, a eficiência da representação geométrica das cargas na simulação foi comprovada pelos valores dos limiares de percolação obtidos das simulações, quando o menor valor de percolação encontrado na simulação 2D foi para a maior razão de aspecto, 2500, com uma concentração de 0,383 vol.%; a simulação 3D, com a razão de aspecto de 75, mostrou a menor concentração, 0,009%. Os mesmos valores de razão de aspecto (*ra*) utilizados na simulação anteriormente foram aplicados, alcançando valores de con-

atividade na ordem de  $10^0$  S/m. Já na busca pelas características dos filmes finos ITO, na simulação 2D, o material apresentou um salto de até 10 ordens de grandeza ( $10^{16}$  para  $10^6$   $\Omega$ /quadrado) no valor de resistência de folha; na simulação 3D, o salto foi de 11 ordens de grandeza ( $10^{16}$  para  $10^5$   $\Omega$ /quadrado), mostrando que os resultados encontrados foram insuficientes para a substituição do ITO ( $10^2$   $\Omega$ /quadrado). Entretanto, o algoritmo desenvolvido mostrou-se coerente em relação aos experimentos publicados na literatura.

Palavras-chave: Células fotovoltaicas; Nanotubos de carbono; Simulação; Percolação elétrica; Filmes finos.

### ABSTRACT

In the extent of new technologies for the use of renewable energy, photovoltaic systems have increasing application. Dye-sensitized Solar Cells (DSSC), in the research and development phase, showed great potential. The conductive polymeric nanocomposites, loaded with carbon nanotubes (NTCs), presented characteristics such as good conductivity, low specific weight and low percolation threshold value. Research has been carried out to replace the conductive oxide material in the DSSC due to these characteristics presented by the NTCs. In this scope, the modeling and simulation of this threshold has an extremely important role in the development of this technology. In addition to driving the idealization of this work, the modeling and simulation enabled the realization of a study involving the electrical percolation of nanocomposites, consisting of carbon nanotubes dispersed in a polymeric matrix, simulated through a program elaborated by the Monte Carlo method and supported in the excluded volume model, intended for two-dimensional and three-dimensional matrix systems. The percolation threshold was simulated and analyzed for different aspect ratios ( $ra$ ) and volumetric load fractions. The lowest percolation value found in the 2D simulation was for the aspect ratio ( $ra$ ) equal to 2500, with a concentration of 0.383 vol.%; in 3D simulation it was for the ratio and aspect equal to 75, with a concentration of 0.009%. The same aspect ratio ( $ra$ ) values used in the simulation previously were applied, reaching the conductivity value of the order of  $10^0$  S/m. In the search for the characteristics of ITO thin films, in 2D simulation, the material showed a jump of up to 10 orders of magnitude ( $10^{16}$  para  $10^6$   $\Omega$ /square) in the sheet resistance value; in 3D simulation, the jump was 11 orders of magnitude ( $10^{16}$  para  $10^5$   $\Omega$ /square), showing that the results found were insufficient to replace the ITO ( $10^2$   $\Omega$ /square). However, the developed algorithm proved to be coherent in relation to the experiments published in the literature.

Keywords: Photovoltaic cells; Carbon nanotubes; Simulation; Electrical percolation; Thin films.

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por novas tecnologias com a finalidade de suprir o aumento da demanda de energia elétrica é um grande desafio científico que está cada vez mais em evidência. Ligado à necessidade de energia, a preocupação com o meio ambiente ganhou atenção nas últimas décadas, estimulando uma ampla discussão, tanto nos meios acadêmicos como industriais, referentes ao desenvolvimento energético sustentável. Também no foco de grandes pesquisas nos últimos anos, a nanotecnologia pode ser uma das respostas para a evolução das energias renováveis.

As células solares sensibilizadas por corantes (DSSC – *Dye-sensitized Solar Cells*) aparecem como uma solução atraente, já que a maior parte dos seus componentes é encontrada em abundância no meio ambiente e com baixo consumo de energia na sua produção. Essas células são formadas por uma proteção mecânica transparente, coberta com óxidos condutores transparentes (ITO- *Indium-Tin Oxide*), camada semicondutora (comumente formada por dióxido de titânio,  $TiO_2$ ), um corante sensibilizador que é absorvido pela camada semicondutora, um eletrólito contendo um intermediário redox e um contra eletrodo (OLIVEIRA et al., 2017).

Apesar dos grandes avanços das células DSSC, a utilização de ITO como óxido condutor transparente ainda é uma barreira para sua fabricação em grande escala, considerando a baixa reserva de índio encontrada na Terra. A impossibilidade de ser processado em solução, a pouca flexibilidade para algumas aplicações e a grande procura desse material na indústria de dispositivos eletrônicos também implicam alto custo dos óxidos condutores ITO (ROWELL et al., 2006). Dessa forma, evidencia-se a importância do desenvolvimento de um substituto para o ITO, visando um menor preço comercial para as células solares orgânicas sensibilizadas por corantes.

Tratando-se de nanotecnologia, uma área que chama atenção pelos resultados nas últimas pesquisas e pela sua aplicabilidade é a dos nanocompósitos poliméricos. Os polímeros são geralmente reforçados por cargas de vários tamanhos para aliviar algumas das suas limitações. Nanociência e nanotecnologia oferecem oportunidades únicas para criar combinações revolucionárias de cargas em nanoescala e materiais poliméricos para obter nanocompósitos poliméricos com propriedades significativas (FU et al., 2019).

Um dos materiais estudados com grande potencial é o nanotubo de carbono (NTC), que foi descoberto por Sumlo Iijima (1991) através

de um processo que envolveu a pirólise de grafite em plasma sob atmosfera controlada de hélio. Segundo Fu et al. (2019), devido à sua dimensão nanométrica e sua morfologia tubular, esse material recebeu essa denominação. A resistência específica dos NTCs pode ser de dez a cem vezes maior que a do aço, pois, além de possuírem propriedades térmicas e elétricas superiores, os nanotubos são termicamente estáveis até 2800°C no vácuo e têm uma condutividade térmica cerca de duas vezes maior que a do diamante, bem como uma capacidade de carga de corrente elétrica 1000 vezes maior que a dos fios de cobre.

Segundo Gruner (2006), os nanocompósitos poliméricos condutores carregados com nanotubos de carbono (NTCs) ganharam destaque nas pesquisas de substituição do ITO em diversas aplicações, como em células solares, *touch screens* e janelas inteligentes. Apesar de apresentar uma coloração mais escura, devido às suas características, os NTCs podem ser uma boa opção para óxidos condutores transparentes quando usado em matrizes transparentes. Para isso, é necessário que o material polimérico carregado de NTCs possua um baixo limiar de percolação e uma alta condutividade com baixa concentração de carga (GRUNER, 2006).

Condutividade elétrica é uma das características dos NTCs e que faz com que eles sejam considerados a melhor fibra feita de carbono, já que a literatura mostra valores próximos a  $10^6$  S/m. Já os materiais poliméricos são geralmente aplicados como materiais isolantes atribuídos à sua propriedade eletromagnética desprezível e baixa condutividade elétrica ( $10^{-15}$  S/m). Um polímero isolante pode ser transformado em um composto polimérico condutor por incorporação física ou química de NTCs condutores, acima de seu limiar de percolação (MIRMOHAMMADI et al., 2018).

A variação da condutividade elétrica e do limiar de percolação está relacionada a vários fatores, porém, podem-se destacar os diferentes métodos aplicados na dispersão do nanotubo de carbono na matriz polimérica, pois, dada a sua dimensão nanométrica e as forças de interação intermoleculares de Van der Waals presentes nos nanotubos, os mesmos formam aglomerados que geram uma dificuldade de dispersão fina dentro da matriz polimérica. Portanto, esses feixes de NTCs mostram propriedades elétricas e mecânicas inferiores aos nanotubos de carbono individuais, tendo em vista a menor área superficial dos aglomerados com ligação interfacial imperfeita com a matriz polimérica (GUPTA & KUMAR, 2018). Para solucionar esse problema, são aplicadas técnicas de dispersão, como a polimerização *in situ*, moinho de bolas (*ball milling*), ultrassom e solução, que fazem com que a interação entre a carga e a matriz sejam mais homogêneas.

Em contrapartida, a principal questão sobre os compósitos poliméricos condutores com cargas de carbono, como os NTCs, está re-

lacionada com a variação da condutividade em função da concentração das partículas condutoras, quando é observada a existência de uma concentração crítica a partir da qual ocorre um aumento na condutividade do sistema. Esse fenômeno pode ser explicado pela teoria da percolação.

A equação 1 demonstra um dos métodos mais comuns para se determinar matematicamente o limiar de percolação em compósitos condutores. Ela atribui um comportamento exponencial à condutividade em função da concentração de ativo do condutor (LOGAKIS et al., 2011).

$$\sigma \sim (\varphi - \varphi_p)^t \quad (1)$$

onde,  $\sigma$  é a condutividade elétrica;  $\varphi$  é a fração volumétrica do aditivo condutor;  $\varphi_p$  é a fração de aditivo condutor no limiar de percolação; e  $t$  é o expoente crítico.

A ausência de termos que levem em consideração fatores como a geometria dos aditivos condutores, morfologia de dispersão e outros fatores que afetem os valores do limiar de percolação de compósitos condutores, deixa claro que a mesma não pode ser resolvida sem pares de dados de condutividade em função de concentrações obtidas experimentalmente. Assim, pela equação 1, não se pode prever o limiar de percolação antes da fase experimental do desenvolvimento de um novo compósito (PANDEY & BISWAS, 2014). Portanto, modelos de percolação que incluem a chamada tortuosidade, ou a ondulação das cargas, são necessários para melhor representação desses sistemas. Estudos já realizados tanto em duas quanto em três dimensões revelaram que o limiar de percolação diminui quando a tortuosidade das cargas é aumentada (BERHAN & SASTRY, 2007; MUTISO & WINEY, 2015).

Com o objetivo de estimar o limiar de percolação de compósitos que contenham cargas dispersas de forma aleatória em sua matriz, foi desenvolvido o conceito do volume excluído. Esse conceito é definido pelo volume em torno do centro de um objeto, cujo centro de outro objeto semelhante não se sobrepõe a esse objeto (BALBERG et al., 1984). Esse conceito tem sido usado para indicar o limiar de percolação de cargas que possuem formas tridimensionais (volume) e formas bidimensionais (área). A aplicação desse método é usada vastamente para sistemas nos quais os objetos possuem grande razão de aspecto, como é o caso dos nanotubos de carbono. Contudo, o método não leva em consideração a importante relação entre a carga e a matriz polimérica (BALBERG et al., 1984).

Nesse contexto, o presente trabalho, derivado dos resultados obtidos na dissertação de Pinto Jr. (2020), tem como objetivo o estudo teórico das características de um nanomaterial polimérico condutor carregado com NTCs, visando à aplicação do mesmo em uma célula solar orgânica sensibilizada por corantes, exercendo a função de óxido condutor transparente ITO. Para isso, o limiar de percolação e a condutividade do material polimérico condutor serão analisados através de um programa computacional desenvolvido na linguagem Fortran, que usou o modelo de Monte Carlo apoiado no modelo de volume excluído para desenvolver o algoritmo.

## 2. METODOLOGIA

Foi realizada a simulação de matrizes em duas e três dimensões que representam um material polimérico condutor. Essa simulação buscava o estudo do limiar de percolação e sua relação com a razão de aspecto dos nanotubos de carbono.

Os algoritmos utilizados para a montagem das matrizes e a realização das simulações foram desenvolvidos em linguagem FORTRAN 95 (Force 2.0.9). O material simulado é um nanocompósito formado por uma matriz isolante e preenchido com cargas de nanotubos de carbono.

O computador usado para realizar as simulações necessárias possui processador Intel Core i5 – 4200U, 8Gb de memória RAM e sistema operacional Windows 7.

O programa usa como parâmetros iniciais a razão de aspecto e a fração volumétrica da partícula na matriz desejada para a simulação. A partir desse ponto é usado o método matemático de Monte Carlo, que favorece o preenchimento dessa matriz. Esse método é um procedimento computacional que determina que um evento específico, resultado de uma série de eventos estocásticos, tem de acontecer. Uma das primeiras aplicações desse método foi a pesquisa de Stanislaw Ulam e John Von Neumann, que simulava o comportamento da difusão de nêutrons. Tempos depois, esses dados foram usados no desenvolvimento das primeiras bombas atômicas, quando aplicados no projeto Manhattan (CARVALHO et al., 2016). Já neste trabalho, a aplicação do método de Monte Carlo destinou-se a simular a presença de cargas de NTCs em posições aleatórias em uma matriz polimérica. Partindo da teoria de percolação por sítio, o algoritmo aplicado nesta pesquisa simula matrizes bidimensionais e tridimensionais para representar o material polimérico e seus espaços, os quais podem ou não ser preenchidos pelo material condutor a ser estudado. No início da simulação foi gerada uma matriz totalmente isolante, que é representada

por uma matriz formada apenas por números “0”. Após essa etapa, uma fração dessa matriz foi preenchida com aditivo condutor; esse aditivo condutor corresponde a números “1” adicionados na matriz de zeros. A tortuosidade dos elementos adicionados foi representada por segmentos com um ângulo de  $45^\circ$ , cujo comportamento ondular era semelhante ao das fibras. Isso pode ser visto na Figura 2a e Figura 2b, para duas e três dimensões, respectivamente. Essa fração é previamente fornecida pelo programa ao usuário, representando o volume fracionário do condutor no compósito.

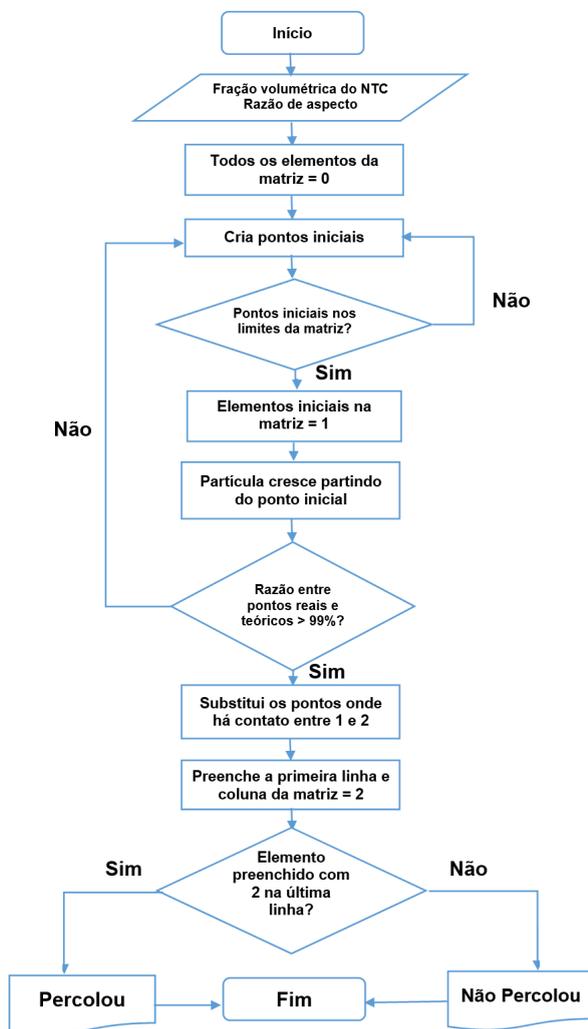


Figura 1 - Fluxograma do algoritmo

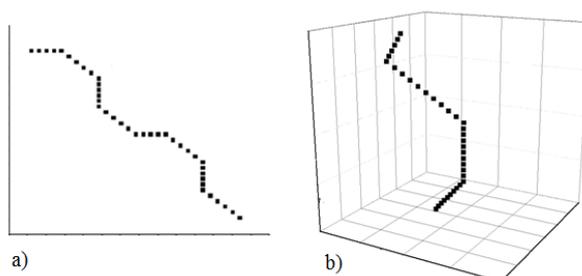


Figura 2 - Simulação do crescimento de uma fibra de NTC: a) 2D e b) 3D

Como a simulação é baseada na teoria, todos os sítios (ou posições na matriz) são afastados pela mesma distância entre si. Logo, apenas quando dois pontos preenchidos com carga condutora estiverem a uma distância mínima um do outro haverá uma ligação. Da mesma forma, apenas quando houver uma sequência de ligações entre os sítios preenchidos, formando um ou mais “caminhos” pelo material, haverá percolação do material. Com isso, o valor da fração necessária para haver a percolação do material será chamado de limiar de percolação ( $p_c$ ).

Os valores de aresta e razões de aspecto adotados para a matriz 3D não apresentaram uma proporcionalidade coerente com as simulações 2D e com as espessuras provenientes da literatura para o filme real, considerando limitações de *hardware* e ao tempo de simulação elevado.

Os valores de razão de aspecto foram de 500, 750, 1000, 1250 e 2500 para os sistemas bidimensionais; e 25, 37, 50 e 75 para os sistemas 3D. Essa diferença na razão de aspecto dos tubos para as diferentes dimensões foi um dado interessante de comparação com a literatura que cita trabalhos experimentais, pois foi visto que, na preparação dos filmes de nanocompósitos, é possível encontrar razão de aspecto que depende da dispersão de cargas condutoras, fator essencial para a percolação elétrica do sistema.

Em seu trabalho, Bai & Allaoui (2003) mostraram que, dependendo da forma como os nanotubos de carbono são tratados/sintetizados, podem ocorrer quebras nas cargas que atinjam diretamente as dimensões do seu comprimento e, com isso, o valor da razão de aspecto médio do compósito. Algumas vantagens em aplicações experimentais são encontradas para os compósitos que possuem uma razão de aspecto menor. Uma delas é a melhor dispersão das cargas, já que com menores valores de comprimento da carga o efeito de aglomeração é

reduzido. Outros autores como (BAUHOFER & KOVACS, 2009), (CUI et al., 2003), (CURRAN et al., 1998), (DU et al., 2005), (SLUZARENKO et al., 2006) e (PECASTAINGS et al., 2004), também mostraram em seus trabalhos a aplicação de experimentos práticos e na literatura de NTCs as razões de aspecto com valores menores que 100.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Limiar de percolação elétrico

Para a simulação tridimensional dos filmes finos orgânicos foram escolhidos quatro valores para a razão de aspecto (25, 37, 50 e 75). A fração volumétrica de cargas foi variada para obter o sucesso de percolação para 100 simulações executadas pelo programa. A possibilidade de formação de um caminho que conduza eletricidade para uma determinada quantidade de simulações realizadas constitui a variável identificada como possibilidade de conexão (PC). Esta, de acordo com Chen et al. (2014), pode ser determinada quando 50% das simulações levem ao sucesso da percolação, determinando o valor de  $p_c$  do sistema.

A Figura 3 mostra a simulação do valor do limiar de percolação pela análise da curva da fração volumétrica de nanotubos em função da possibilidade de conexão (PC). O traçado de cor vermelha mostra o valor de 50% de percolação para 100 matrizes simuladas. A partir da análise do gráfico, pode-se observar um comportamento esperado, pois, ao se aumentar os valores da razão de aspecto das partículas, o valor limiar de percolação diminui, atingindo uma pequena fração volumétrica de NTCs, 0,009%, para partículas com  $ra=75$ . Já em compostos nos quais são aplicadas cargas com uma menor razão de aspecto, por exemplo para  $ra=25$ , valor três vezes inferior, foi necessária uma fração volumétrica quase 50 vezes superior para se atingir o limiar de 0,437%. Esse comportamento pode ser observado no trabalho de Sahraei et al. (2020), que, ao dobrar a razão de aspecto dos nanotubos simulados, de 200 para 400, mostrou a diminuição do número de NTCs necessário para a condução elétrica em quase 10 vezes.

De forma geral, os resultados simulados variaram entre  $10^{-3}$  e  $10^{-1}\%$  em cargas volumétricas de percolação para um variação de 25 a 75 em razão de aspecto.

Ao comparar os dados calculados pelo modelo com a literatura, destaca-se o estudo de Eken et al. (2011), o qual se centrou, através da simulação, no comportamento da condutividade de um material formado por NTCs em relação a vários fatores, entre eles a razão de aspecto da carga. Para uma razão de aspecto igual a 70 foi encontrado

um limiar próximo a 0,1% da fração de volume, valor aproximadamente uma ordem de grandeza maior que o mostrado na Figura 3, para  $ra=75$ . Para um valor de  $ra=125$  foi encontrado um  $p_c=0,07\%$ . Já para a  $ra=125$ , foi encontrado um valor de  $p_c \cong 0,006$ . Novamente, uma ordem de grandeza maior que o encontrado pelos autores.

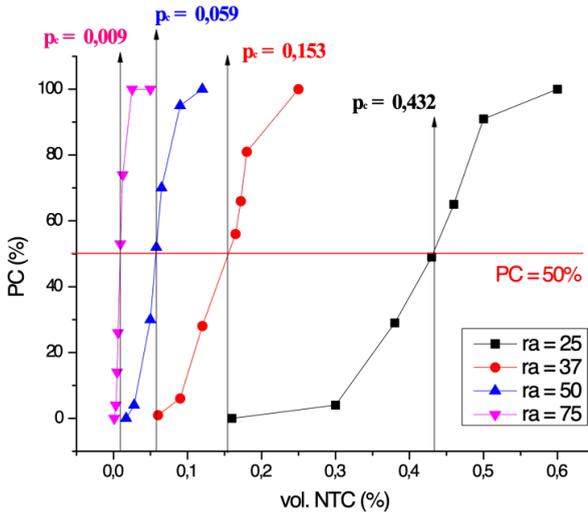


Figura 3 – Análise da simulação do limiar de percolação em uma matriz 3D

Para simular matrizes carregadas com NTCs de maiores razões de aspecto, foi feita uma regressão não linear exponencial. Com isso foi possível encontrar um valor de  $p_c$  para valores de  $ra$  maiores que 75.

Usando o método de Monte Carlo, Fang et al. (2019) modelaram tridimensionalmente um nanocompósito polímero/NTCs, buscando estudar as relações entre razão de aspecto, condutividade, limiar de percolação, entre outros parâmetros. Para uma carga com razão de aspecto igual a 500, foi encontrado um limiar de percolação com concentração volumétrica igual a 0,07%, novamente um valor de uma ordem maior que o  $p_c$  encontrado na simulação deste trabalho (0,0059%).

Constata-se que, nos trabalhos apresentados, os valores de limiares de percolação são superiores aos encontrados nas simulações aqui apresentadas. Um dos motivos que justifica o ocorrido corresponde aos trabalhos comparados que não representam um filme fino em sua simulação. Assim, vê-se necessário uma maior concentração volumétrica de carga para que o limiar de percolação seja atingido.

A simulação dos filmes finos orgânicos bidimensionais possibilita o estudo da relação do limiar de percolação dos nanocompósitos com a razão de aspecto maiores que os valores usados para matrizes tridimensionais. Na matriz 2D, a espessura do material será considerada como o próprio diâmetro do NTC, pois isso garante um menor esforço computacional, possibilitando que a “placa” simulada tenha dimensões laterais maiores (10000x10000).

Seguindo a metodologia adotada para a simulação tridimensional, na simulação bidimensional foram escolhidos agora cinco valores para a razão de aspecto (500, 750, 1000, 1250 e 2500). A fração volumétrica de cargas foi variada para obter o sucesso de percolação destinada a 100 simulações executadas pelo programa.

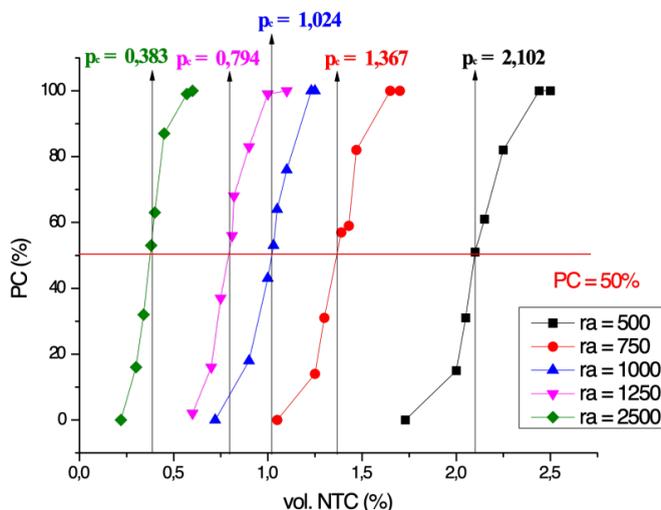


Figura 4 – Análise da simulação do limiar de percolação em uma matriz 2D

A Figura 4 mostra a simulação do valor do limiar de percolação pela análise da curva da fração volumétrica de nanotubos em função da possibilidade de conexão (PC), no qual o traçado da cor vermelha mostra o valor de 50% de percolação para 100 matrizes simuladas. Pode-se observar que, de forma similar à simulação 3D, um comportamento inversamente proporcional, ao aumentar os valores da razão de aspecto das partículas, o limiar de percolação acontece com uma pequena fração volumétrica de NTCs, chegando a 0,383% para partículas com  $ra=2500$ .

Já em compósitos nos quais são aplicadas cargas com uma menor razão de aspecto, foi necessária uma quantidade volumétrica maior

de carga condutora para atingir o limiar de percolação, chegando ao valor de 2,102% para partículas com  $ra=500$ .

Pötschke et al. (2004) desenvolveram um compósito contendo NTCs em uma matriz de policarbonato pelo método de dispersão por extrusão. Para um nanotubo com  $ra \cong 1250$ , foi atingido um valor de  $p_c$  de 0,61 vol.%. Usando nanotubos com razão de aspecto médio iguais a 500, Konyushenko et al. (2006) desenvolveram um material com matriz polimérica de polianilina (PANI), aplicando técnicas de mistura entre o isolante e a carga. Os estudos sobre a condutividade das amostras mostraram um limiar de percolação de 2,65 vol.%.

Outros estudos, como os de Moisala et al. (2006) e Sandler et al. (2003), mostraram um limiar de percolação elétrica ultrabaixo, ou seja, 0,0018 vol.% para compósitos formados por nanotubos de carbono e uma matriz de epóxi. Entretanto, esses estudos não podem ser usados para uma comparação direta com os resultados encontrados neste presente estudo, pois os autores utilizaram métodos de alinhamento na criação e aplicação dos NTCs com a finalidade de evitar possíveis emaranhados e, assim, potencializar o poder de condução do material. Já nas simulações demonstradas no presente estudo, foi adotada a metodologia da aleatoriedade dos pontos, quando não se pode prever o sentido do crescimento dos nanotubos no material.

Allaoui et al. (2002) criaram um compósito formado por NTCs, com uma razão de aspecto 1000, em uma matriz de epóxi e uso de solução em metanol e agitação magnética como método de dispersão do material condutor. O limiar de percolação foi atingido com uma concentração volumétrica de, aproximadamente, 0,73%, um valor próximo da ordem de grandeza do valor simulado.

As divergências de valores de  $p_c$  encontradas nos diferentes estudos da literatura estão relacionadas principalmente ao método de preparação experimental. Li et al. (2007) mostraram em seu trabalho a dependência que o limiar de percolação sofre em relação à razão de aspecto e ao estado de dispersão dos NTCs em uma matriz polimérica de epóxi. Para uma razão de aspecto 1000, o estudo mostrou valores de percolação entre 0,06 vol.% e 0,26 vol.%, dependendo do método de dispersão aplicado, sendo a ultrassonificação o mais eficaz.

Ainda em seu trabalho, Li et al. (2007) mostraram que o efeito de um método mais agressivo de dispersão (por exemplo, moinho de bolas, sonificação) pode ocasionar a quebra do nanotubo. Apesar da dispersão quase perfeita na matriz, o material não consegue atingir o seu limiar com pequenas frações de carga. Esse fato explanado pelos autores é de grande relevância para o escopo deste trabalho, em particular ao comparar o limiar de percolação simulado e experimental, pois a quebra dos tubos gera a necessidade de uma maior concentração de cargas para a condução, além de conseqüente aumento no limiar de percolação.

Ainda comparando os resultados do presente trabalho com outros autores que usaram a simulação computacional bidimensional para definir o limiar de percolação, pode-se citar Coelho et al. (2017), que usaram o método da aleatoriedade de Monte Carlo para simular uma matriz quadrada polimérica de PMMA, carregada com nanotubos de carbono, em que os valores das razões de aspectos variavam entre 500 e 4000. A tortuosidade dos tubos não foi considerada. Para  $ra=2000$  foi encontrado uma concentração crítica de 0,5%, que é muito próxima da encontrada neste trabalho,  $p_c=0,46\%$ .

A comparação dos resultados das simulações bidimensionais e tridimensionais mostra que, mesmo com uma maior razão de aspecto na matriz de duas dimensões, os valores do limiar de percolação são maiores que os valores encontrados na matriz de três dimensões. Isso pode ser explicado pelas dimensões adotadas para a simulação em 3D, quando a espessura do filme fino fica limitada. Ao aplicar uma razão de aspecto maior que 75, o contato entre as duas bordas do material seria facilitado pelo comprimento dos NTCs e, com isso, o limiar de percolação seria alcançado com um valor de concentração mais baixa.

De forma complementar, Coelho et al. (2017) citam em seu trabalho que comumente podem ser encontrados em simulações 2D valores de limiares de percolação acima dos encontrados para matrizes simuladas em 3D, pois existe uma maior possibilidade geométrica de contato entre os tubos

### 3.2 Condutividade elétrica

Um das principais características dos NTCs é a elevada condutividade elétrica, que pode chegar a valores de até  $10^6$  S/m (CHEN et al., 2014), mas com a sua aplicação em materiais poliméricos em pequenas frações volumétricas, o valor de condutividade dos nanotubos dificilmente é alcançado. Para isso, deve ser analisada a aplicação do material criado pelas suas características desejadas (MIRMOHAMMADI et al., 2018). Como a busca deste trabalho é a aplicação de NTCs em células solares orgânicas sensibilizadas por corantes, o material aqui simulado deve possuir características (resistência de folha e transparência) próximas ao óxido condutor transparente ITO.

Para a comparação da condutividade elétrica, inicialmente foram aplicados na Equação 1 os valores simulados no algoritmo 2D. Ao fixar os valores de limiar de percolação, variar os valores de concentração de cargas condutoras e aplicar um expoente crítico igual a 1,4, que é um valor universal comumente usado em modelagens 2D na literatura.

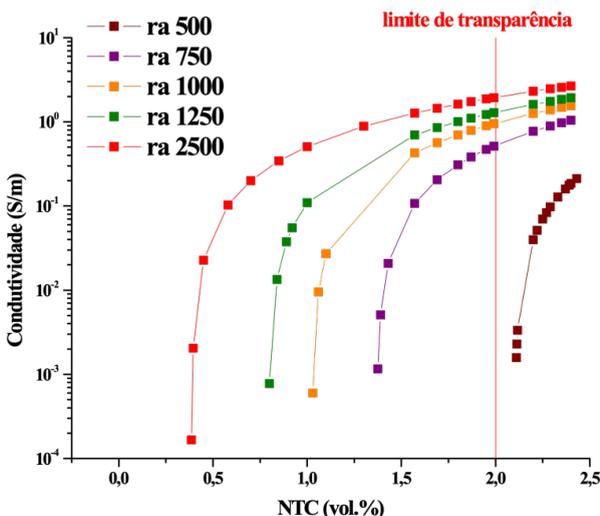


Figura 5 – Simulação 2D da condutividade elétrica x fração volumétrica para NTCs de várias razões de aspecto

A Figura 5 apresenta a relação entre a fração volumétrica e a condutividade elétrica do nanocompósito polimérico, carregado com NTCs para diferentes valores de razão de aspecto (500, 750, 1000, 1250 e 2500). Nota-se que a maior parte dos materiais conseguiu atingir um mesmo patamar de condutividade, mesmo com uma concentração de carga abaixo de 2 vol.%. Apenas o nanocompósito com  $ra=500$  precisou de mais de 2 vol.% de carga para atingir a condutividade. Como esperado, o material carregado com NTCs de maior razão de aspecto (2500) foi o que atingiu os melhores valores de condutividade elétrica, evoluindo em sua condutividade elétrica quatro ordens de grandeza ( $10^{-4}$  para  $10^0$  S/m) quando comparado à sua condutividade com a concentração volumétrica no limiar de percolação. Observando o trabalho de Mosnáčková et al. (2015), para uma concentração volumétrica de 1,5%, a condutividade se aproximou muito do material carregado com NTCs de razão de aspectos iguais a 2500.

A linha contínua vermelha na Figura 5 representa o limite de concentração de carga de NTCs aceitável para a aplicação em células solares orgânicas. Segundo Rowell et al. (2006), para substituir o ITO na aplicação deste estudo, o material desenvolvido deve possuir como característica uma transparência maior ou igual a 80%. O estudo de Mergen et al. (2020) mostra que um valor de 2 vol.% ( $\cong 2,8$  wt.%, concentração de massa) é um material com transparência considerável.

Levando em consideração esse limite, apenas o material carregado de nanotubos com razão de aspecto igual a 500 não poderia ser um substituto para o ITO na célula solar orgânica, pois não atinge o seu limiar de percolação sem comprometer sua transparência.

Para a geração do gráfico com valores 3D, foi adotado procedimento similar ao usado para gerar a figura anterior, porém o valor de expoente crítico usualmente encontrado na literatura para aplicação de simulação de materiais condutores em três dimensões é, aproximadamente, igual a 2. Assim, foi gerado um gráfico resposta mostrando a condutividade do material para cada valor de razão de aspecto estudado, que pode ser observado na Figura 6.

É apresentada a relação entre a fração volumétrica e a condutividade elétrica de um material condutor polimérico carregado com NTCs para diferentes valores de razão de aspecto (25, 37, 50 e 75). Como esperado, levando em consideração a mesma concentração volumétrica para todas as amostras, o material composto pelos nanotubos com a maior razão de aspecto (75) atingiu a percolação elétrica com o menor número de cargas e maior valor de condutividade. Isso demonstra que um material que apresenta um filme fino carregado por NTCs, com comprimentos próximos à espessura do filme, possui facilidade de condução. Já os materiais carregados com nanotubos, que possuem uma menor razão de aspecto, apresentaram uma maior dificuldade de condução elétrica, porém todos se mantiveram na mesma ordem de grandeza.

A Figura 6 mostra o limite de transparência do material com um valor de 2 vol.% ( $\approx 2,8$  wt.%, concentração de massa) da concentração de carga, que representa uma transparência maior ou igual a 80%, simbolizado pela linha contínua vermelha. Essa característica dos filmes ITO pode ser encontrada em todos os materiais simulados, podendo, assim, aplicá-los sem perdas em uma célula solar orgânica. Novamente, o material com uma razão de aspecto igual a 75 se destacou, atingindo em sua condutividade elétrica um salto de sete ordens de grandeza ( $10^{-7}$  para  $10^0$  S/m) quando comparado à sua condutividade com a concentração volumétrica no limiar de percolação.

Destaca-se a proximidade dos resultados aqui simulados para material carregado de cargas com  $ra=75$  com os resultados publicados por H. M. Kim et al. (2006), que apresentaram valores de condutividade de, aproximadamente, 1,0 S/m para uma concentração de carga próxima a 1 vol.%. Em contrapartida, o trabalho de Mosnáčková et al. (2015) mostrou que para uma concentração volumétrica de 1,5% se aproximam muito os materiais carregados com razão de aspecto igual a 25.

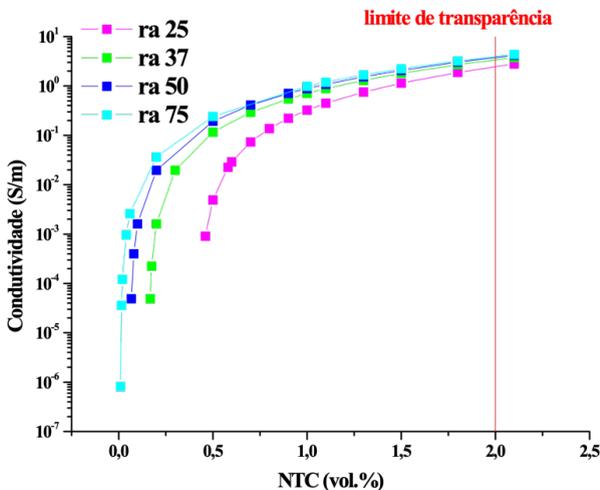


Figura 6 – Simulação 3D da condutividade elétrica x fração volumétrica para NTCs de várias razões de aspecto

### 3.3 Resistência de folha

Outra característica que deve ser analisada nos filmes finos é a resistência de folha (*sheet resistance*), ou a resistividade superficial, que pode ser definida como a razão entre a resistividade volumétrica e a espessura do material. De forma simples, o procedimento de medição dessa resistência é constituído por eletrodos de tamanho igual em contato com a superfície da amostra, buscando medir a resistividade da superfície. Esse tipo de medição é muito aplicado para medir a resistividade elétrica de materiais planos. A unidade da resistência de folha é expressa em ohms por quadrado ( $\Omega/\text{quadrado}$ ) (GHORBANI & TAHERIAN, 2018).

Wang et al. (2011) demonstraram a Equação 2.

$$R_s = \frac{\rho}{h} \tag{2}$$

Onde:

- $R_s$  é a resistência de folha;
- $\rho$  é a resistividade volumétrica, e
- $h$  é a espessura do material.

Assim, é possível encontrar o valor da resistividade a partir da

resistência de folha e da espessura do material. Com isso, obtém-se o valor da condutividade elétrica do material ( $\sigma_e$ ) por meio da Equação 3, e do valor da resistividade volumétrica.

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Gruner (2006), Rowell et al. (2006), Hecht et al. (2011) e Kim et al. (2014) apontam como valor referência para substituição de óxidos condutores em células solares orgânicas uma resistência de folha de  $R_s=10^2 \Omega/\text{quadrado}$ .

Pelos dados de condutividade elétrica obtidos na simulação 2D e expostos anteriormente pelas Equações 2 e 3, foi possível encontrar o valor da resistência de folha dos materiais simulados. A Figura 7 mostra o gráfico com a evolução da resistência de folha para cada material de diferente razão de aspecto. Yang et al. (2020) indicam em seu trabalho uma espessura de amostra igual a 0,45 micrometros, valor aceitável para um filme fino ITO.

Considerando uma concentração volumétrica de 2%, o material simulado chegou a ter um salto de até 10 ordens de grandeza ( $10^{16}$  para  $10^6 \Omega/\text{quadrado}$ ) quando comparado à resistência da matriz polimérica isolante. A amostra que mostrou a melhor evolução continua nanotubos com  $ra=2500$ , chegando a um valor de  $R_s=1,13 \times 10^6 \Omega/\text{quadrado}$ . Nota-se que o valor atingido na simulação se mostra insuficiente para a substituição do filme ITO, pois o valor de referência desejado seria  $R_s=10^2 \Omega/\text{quadrado}$ .

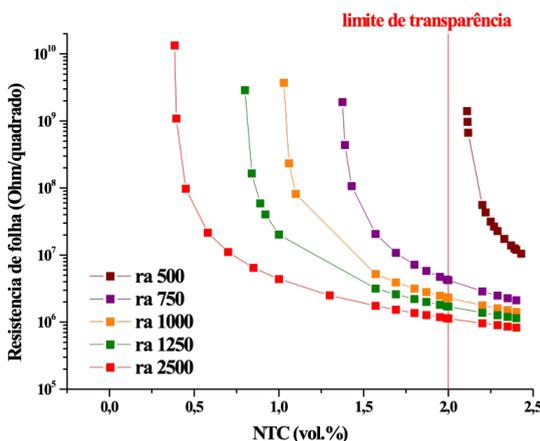


Figura 7– Simulação 2D da resistência de folha x fração volumétrica para nanotubos de várias razões de aspecto

Novamente, foram usados os dados de condutividade elétrica, agora dos sistemas 3D e as Equações 2 e 3 para o cálculo do valor da resistência de folha dos materiais simulados. Equitativamente ao sistema 2D, a espessura de amostra igual a 0,45 micrometros foi utilizada para o desenvolvimento da Figura 8.

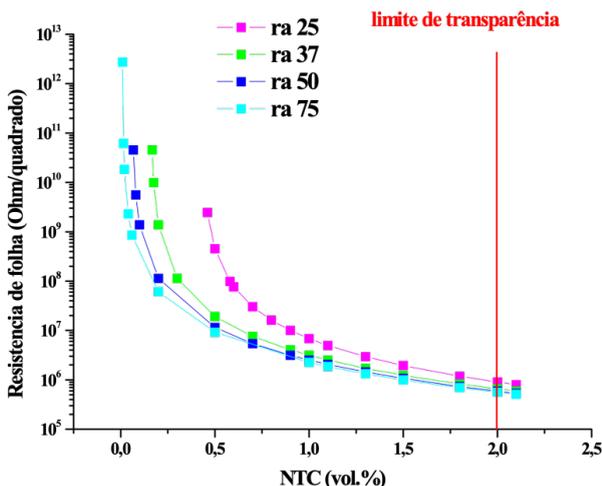


Figura 8 – Simulação 3D da resistencia de folha x fração volumétrica para nanotubos de várias razões de aspecto

Como a literatura sinalizava, a amostra carregada com NTCs de razão de aspectos iguais a 75 mostrou a melhor evolução da curva de resistência de folha, indicando um salto de 11 ordens de grandeza ( $10^{16}$  para  $10^5 \Omega/\text{quadrado}$ ) quando comparado a um material polimérico puro, chegando a um valor de  $R_s=5,61 \times 10^5 \Omega/\text{quadrado}$ . Contudo, esse resultado ainda se mostra insuficiente para a substituição do filme ITO.

Cecchi (2013), também buscando substituir filmes ITO para aplicação em células fotovoltaicas, criou experimentalmente um filme condutor transparente formado pelo material polimérico PMMA, carregado com nanotubos de carbono de paredes múltiplas. Em seu trabalho, foram aplicadas nas amostras técnicas de deposição e dispersão uma solução em dodecil sulfato de sódio (SDS), sonicação e rotação (4500 rpm), conseguindo, assim, um filme com 2 centímetros de lado e 0,45 micrômetros de espessura. O trabalho citado não realizou o estudo relacionado à razão de aspecto dos NTCs utilizados, mas somente uma análise de várias características do material, entre elas a transparência e a resistência de folha. A amostra analisada por Cecchi (2013) era for-

mada por uma concentração de carga igual a 0,7 vol.% e apresentou uma transparência óptica igual a 88,6 % e resistência superficial  $R_s=1,0 \times 10^8 \Omega/\text{quadrado}$ , que também é insuficiente para a substituição do filme ITO.

Ao comparar o valor de  $R_s$  encontrado por Cecci (2013) com os valores apresentados no presente trabalho para a mesma concentração de carga de NTCs (0,7 vol.%), nota-se que na simulação 2D apenas o material com razão de aspecto igual a 2500 conseguiu conduzir com essa concentração de carga, chegando na ordem de  $10^7 \Omega/\text{quadrado}$ . Já nas simulações 3D, todos os materiais conseguiram conduzir, chegando à ordem de até  $10^6 \Omega/\text{quadrado}$ . Esses resultados são muito próximos dos resultados encontrados de forma experimental no trabalho citado anteriormente, divergindo apenas em uma ordem de grandeza no sistema bidimensional e duas ordens no sistema tridimensional.

Essa diferença pode ser explicada pela relação entre os lados das matrizes e a espessura das matrizes simuladas, e pela relação entre os valores experimentais dos lados do filme fino e sua espessura. Isso também explica a maior proximidade entre o sistema de duas dimensões simulado e o filme real, já que o sistema 2D conseguiu simular valores maiores para o lado da matriz. Dessa forma, ressalta-se a eficiência do algoritmo desenvolvido na presente pesquisa e sua aplicabilidade para fins de determinar o limiar de percolação em nano materiais poliméricos condutores carregados com nanotubos de carbono.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi criado um algoritmo para simular um filme fino de polímero/NTCPM, com características de óxidos transparentes condutores e aplicáveis em células solares orgânicas, sensibilizadas por corantes. Apesar do experimento não se mostrar eficiente na substituição dos filmes ITO, o algoritmo desenvolvido mostrou que o nanomaterial simulado apresenta características de limiar de percolação que foram validados pelos resultados simulados computacionalmente e por experimentais físicos publicados na literatura.

As simulações em três dimensões para um material carregado com NTCs de razão de aspecto maiores foram as que atingiram o limiar de percolação com um menor valor de concentração volumétrica. Nas simulações em duas dimensões foi atingido o limiar de percolação com uma concentração de carga duas ordens maiores quando comparado à simulação 3D.

Para os filmes simulados no presente trabalho foi definida uma

concentração de carga máxima igual a 2 vol.% para que a transparência do material não fosse afetada. Quando comparada a condutividade do material no limiar de percolação e a condutividade a uma concentração de carga de 2 vol.% a simulação 2D apresentou um salto na condutividade elétrica de quatro ordens de grandeza. Já para a simulação 3D, considerando essa mesma concentração volumétrica, houve um salto de sete ordens de grandeza.

O estudo da resistência de folha demonstrou que, com uma pequena quantidade de carga adicionada no material polimérico, houve a diminuição de suas características isolantes. Na simulação 2D, o material apontou um salto de até 10 ordens de grandeza quando comparado à resistência de um material formado por um polímero puro. Já na simulação 3D, houve um salto de 11 ordens de grandeza, chegando à casa dos  $10^5 \Omega/\text{quadrado}$ . Analisando os valores de resistência de folha encontrados no trabalho, pode-se considerar que o material se mostra ainda impróprio para a substituição do filme ITO, pois não foi alcançada a ordem de grandeza necessária para ocorrer a condução aplicada nesses filmes ( $10^2 \Omega/\text{quadrado}$ ). O valor de resistência de folha no material estudado poderia ser otimizado com a adição de mais carga de NTCs na matriz polimérica, porém a transparência do material seria afetada, impossibilitando sua utilização na substituição do ITO.

Por fim, a validação desse trabalho abre mais espaço para as pesquisas de materiais polímero condutores com cargas de NTCs, servindo como suporte para experimentos físicos e resultando na economia de recursos e tempo de pesquisa.

## 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, especificamente através do projeto PDPG Amazônia Legal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH SAHRAEI, A.; AYATI, M.; RODRIGUE, D.; & BANIASSADI, M. (2020). A computational approach to evaluate the nonlinear and noisy DC electrical response in carbon nanotube/polymer nanocomposites near the percolation threshold. *Computational Materials Science*, 173(June 2019). <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109439>

ALLAOUI, A.; BAI, S.; CHENG, H. M.; & BAI, J. B. (2002). Mechanical and electrical properties of a MWNT / epoxy composite. 62, 1993–1998.

- BAI, J. B.; & ALLAOUI, A. (2003). Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites - Experimental investigation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(8), 689–694. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00140-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00140-4)
- BALBERG, I.; ANDERSON, C. H.; ALEXANDER, S.; & WAGNER, N. (1984). Excluded volume and its relation to the onset of percolation. *Physical Review B*, 30(7), 3933–3943. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.30.3933>
- BAUHOFER, W.; & KOVACS, J. Z. (2009). A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites. *Composites Science and Technology*, 69(10), 1486–1498. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.018>
- BERHAN, L.; & SASTRY, A. M. (2007). Modeling percolation in high-aspect-ratio fiber systems. I. Soft-core versus hard-core models. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 75(4), 1–8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.041120>
- CARVALHO, H. P.; ARMIGLIATO, A.; ALMEIDA, L. L.; CORREIA, A. R.; & DE MUSIS, C. R. (2016). Análise probabilística de colisões veiculares pelo método de Monte Carlo. *Revista Brasileira de Criminológica*, 5(1), 46–50. <https://doi.org/10.15260/rbc.v5i1.111>
- CECCI, R. R. R. (2013). Síntese e Caracterização de Nanocompósitos de PMMA/NTC para Aplicações em Células Fotovoltaicas Orgânicas. UNICAMP.
- CHEN, Y.; WANG, S.; PAN, F.; & ZHANG, J. (2014). A numerical study on electrical percolation of polymer-matrix composites with hybrid fillers of carbon nanotubes and carbon black. *Journal of Nanomaterials*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/614797>
- CUI, S.; CANET, R.; DERRE, A.; COUZI, M.; & DELHAES, P. (2003). Characterization of multiwall carbon nanotubes and influence of surfactant in the nanocomposite processing. *Carbon*, 41(4), 797–809. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00405-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00405-0)
- CURRAN, S. A.; AJAYAN, P. M.; BLAU, W. J.; CARROLL, D. L.; COLEMAN, J. N.; DALTON, A. B.; DAVEY, A. P.; DRURY, A.; MCCARTHY, B.; MAIER, S.; & STREVEVS, A. (1998). A Composite from Poly(m-phenylenevinylene-co-2,5-dioctoxy-p-phenylenevinylene) and Carbon Nanotubes: A Novel Material for Molecular Optoelectronics. *Advanced Materials*, 10(14), 1091–1093. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4095\(199810\)10:14<1091::aid-adma1091>3.3.co;2-c](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4095(199810)10:14<1091::aid-adma1091>3.3.co;2-c)

DA SILVA LEITE COELHO; P. H., DE DEUS ARMELLINI, V. A.; & MORALES, A. R. (2017). Assessment of percolation threshold simulation for individual and hybrid nanocomposites of carbon nanotubes and carbon black. *Materials Research*, 20(6), 1638–1649. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-1084>

DU, F., FISCHER, J. E.; & WINEY, K. I. (2005). Effect of nanotube alignment on percolation conductivity in carbon nanotube/polymer composites. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 72(12). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.121404>

EKEN, A. E.; TOZZI, E. J., KLINGENBERG; D. J., & BAUHOFER, W. (2011). A simulation study on the combined effects of nanotube shape and shear flow on the electrical percolation thresholds of carbon nanotube/polymer composites. *Journal of Applied Physics*, 109(8). <https://doi.org/10.1063/1.3573668>

FANG, C.; ZHANG, J.; CHEN, X.; & WENG, G. J. (2019). A Monte Carlo model with equipotential approximation and tunneling resistance for the electrical conductivity of carbon nanotube polymer composites. *Carbon*, 146, 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.01.098>

FU, S.; SUN, Z.; HUANG, P.; LI, Y.; & HU, N. (2019). Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. *Nano Materials Science*, 1(1), 2–30. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.006>

GHORBANI, M. M.; & TAHERIAN, R. (2018). Methods of measuring electrical properties of material. In *Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites: Experiments, Modelling, and Applications* (pp. 365–394). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812541-0.00012-4>

GRUNER, G. (2006). Carbon nanotube films for transparent and plastic electronics. *Journal of Materials Chemistry*, 16(35), 3533–3539. <https://doi.org/10.1039/b603821m>

GUPTA, T. K.; & KUMAR, S. (2018). Fabrication of carbon nanotube/polymer nanocomposites. In *Carbon Nanotube-Reinforced Polymers: From Nanoscale to Macroscale*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-48221-9.00004-2>

HECHT, D. S.; HU, L.; & IRVIN, G. (2011). Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures. *Advanced Materials*, 23(13), 1482–1513. <https://doi.org/10.1002/adma.201003188>

KIM, B. J.; HAN, S. H.; & PARK, J. S. (2014). Sheet resistance, transmittance, and chromatic property of CNTs coated with PEDOT:PSS films for transparent electrodes of touch screen panels. *Thin Solid Films*, 572, 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.08.015>

KIM, H. M.; CHOI, M. S.; JOO, J.; CHO, S. J.; & YOON, H. S. (2006). Complexity in charge transport for multiwalled carbon nanotube and poly(methyl methacrylate) composites. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 74(5), 1–7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.054202>

KONYUSHENKO, E. N.; STEJSKAL, J.; TRCHOVÁ, M.; HRADIL, J.; KOVÁŘOVÁ, J.; PROKEŠ, J.; CIESLAR, M.; HWANG, J. Y.; CHEN, K. H.; & SAPURINA, I. (2006). Multi-wall carbon nanotubes coated with polyaniline. *Polymer*, 47(16), 5715–5723. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.05.059>

LI, J.; MA, P. C.; CHOW, W. S.; TO, C. K.; TANG, B. Z.; & KIM, J.-K. (2007). Correlations between Percolation Threshold, Dispersion State, and Aspect Ratio of Carbon Nanotubes. *Advanced Functional Materials*, 17(16), 3207–3215. <https://doi.org/10.1002/adfm.200700065>

LOGAKIS, E.; PANDIS, C. H.; PISSIS, P.; PIONTECK, J.; & PÖTSCHKE, P. (2011). Highly conducting poly(methyl methacrylate)/carbon nanotubes composites: Investigation on their thermal, dynamic-mechanical, electrical and dielectric properties. *Composites Science and Technology*, 71(6), 854–862. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.01.029>

MERGEN, Ö. B.; ARDA, E.; & EVINGÜR, G. A. (2020). Electrical, mechanical, and optical changes in MWCNT-doped PMMA composite films. *Journal of Composite Materials*, 54(18), 2449–2459. <https://doi.org/10.1177/0021998319898507>

MIRMOHAMMADI, S. A.; SADJADI, S.; & BAHRI-LALEH, N. (2018). Electrical and electromagnetic properties of CNT/polymer composites. In *Carbon Nanotube-Reinforced Polymers: From Nanoscale to Macroscale* (pp. 233–258). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-48221-9.00010-8>

MOISALA, A., LI, Q.; KINLOCH, I. A.; & WINDLE, A. H. (2006). Thermal and electrical conductivity of single- and multi-walled carbon nanotube-epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 66(10), 1285–1288. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.10.016>

MOSNÁČKOVÁ, K.; ŠPITÁLSKÝ, Z.; KULIČEK, J.; PROKEŠ, J.; SKARMOUSOU, A.; CHARITIDIS, C. A.; & OMASTOVÁ, M. (2015). Influence of preparation methods on the electrical and nanomechanical properties of poly(methyl methacrylate)/multiwalled carbon nanotubes composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(13), 1–11. <https://doi.org/10.1002/app.41721>

MUTISO, R. M.; & WINEY, K. I. (2015). Electrical properties of polymer nanocomposites containing rod-like nanofillers. *Progress in Polymer Science*, 40(1), 63–84. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.06.002>

OLIVEIRA, G. N. DE; SEERY, M.; & COLLERAN, J. (2017). Células Solares Sensibilizadas Com Corante Utilizando Hibisco E Suco De Framboesa Como Tinturas. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 3(4), 665–671. <https://doi.org/10.18540/24469416030420170665>

PANDEY, G.; & BISWAS, A. (2014). Estimating electrical conductivity of multi-scale composites with conductive nanoparticles using bidirectional time marching percolation network mapping. *Computational Materials Science*, 89, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.03.032>

PÉCASTAINGS, G.; DELHAÈS, P.; DERRÉ, A.; SAADAOUI, H.; CARMONA, F.; & CUI, S. (2004). Role of Interfacial Effects in Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposite Behavior. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 4(7), 838–843. <https://doi.org/10.1166/jnn.2004.114>

PINTO JR, J. V. Simulação do limiar de percolação elétrico de células orgânicas de polímero/nanotubos de carbono para aplicação em células fotovoltaicas. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão. São Luís-MA. 2020. 68 f.

PÖTSCHKE, P.; ABDEL-GOAD, M.; ALIG, I.; DUDKIN, S.; & LELLINGER, D. (2004). Rheological and dielectrical characterization of melt mixed polycarbonate-multiwalled carbon nanotube composites. *Polymer*, 45(26), 8863–8870. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.10.040>

ROWELL, M. W.; TOPINKA, M. A.; MCGEHEE, M. D.; PRALL, H. J.; DENNLER, G.; SARICIFTCI, N. S.; HU, L.; & GRUNER, G. (2006). Organic solar cells with carbon nanotube network electrodes. *Applied Physics Letters*, 88(23), 6–9. <https://doi.org/10.1063/1.2209887>

SANDLER, J. K. W.; KIRK, J. E.; KINLOCH, I. A.; SHAFFER, M. S. P.; & WINDLE, A. H. (2003). Ultra-low electrical percolation threshold in carbon-nanotube-epoxy composites. *Polymer*, 44(19), 5893–5899. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00539-1](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00539-1)

SLUZARENKO, N.; HEURTEFEU, B.; MAUGEY, M.; ZAKRI, C.; POULIN, P.; & LECOMMANDOUX, S. (2006). Diblock copolymer stabilization of multi-wall carbon nanotubes in organic solvents and their use in composites. *Carbon*, 44(15), 3207–3212. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.06.034>

IIJIMA, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(354), 56–58.

WANG, K. S.; TIAHJONO, B. S.; WONG, J.; UDDIN, A.; & WENHAM, S. R. (2011). Sheet resistance characterization of laser-doped lines on crystalline silicon wafers for photovoltaic applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(3), 974–980. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.12.002>

YANG, S.; WANG, S.; LIAO, H.; XU, X.; LI, X.; WANG, T.; LI, X.; & LIU, D. (2020). Improving the performance of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin film solar cell by engineering the ITO film thickness. *Physica B: Condensed Matter*, 589(November 2019), 412196. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412196>

## ANÁLISE DE RISCOS NA IMPLANTAÇÃO DE PROJETOS FOTVOLTAICOS RESIDENCIAIS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Higor Tadeu Azevedo Miranda<sup>1</sup>  
Leandro César Mol Barbosa<sup>1</sup>  
Maurício Sá Santos Diniz<sup>1</sup>  
Silvia Maria Santana Mapa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Minas Gerais

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.657

### RESUMO

A implantação de sistemas fotovoltaicos *on-grid* está sujeita a diferentes riscos em todas as suas etapas de execução. Esses envolvem tanto incertezas relacionadas à segurança, quanto ao desempenho do projeto. Este artigo teve como objetivo realizar a análise de riscos em um projeto de instalação de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Ouro Branco-MG. Para isso foi realizada uma pesquisa-ação, na qual foram utilizadas três ferramentas integradas: Análise Preliminar de Riscos (APR), Matriz de Probabilidade e Impacto (MPI) e *Bow-tie*. Por meio de sua aplicação conjunta foi possível levantar 19 riscos, os quais foram devidamente classificados e analisados. Para cada um destes riscos foram estipuladas medidas de respostas, aplicadas no intuito de eliminar ou reduzir as causas e mitigar possíveis efeitos negativos. Como resultado pôde ser observada uma redução de 69% no grau de risco do projeto, com a supressão de todos os riscos classificados como altos ou extremos. Além disso, foi possível verificar uma aplicação balanceada proveniente do uso integrado de diferentes ferramentas de análise e gerenciamento de riscos, a qual proporcionou um maior detalhamento em pontos chave da análise, sem prejuízo aos demais.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos *on-grid*; Análise de Riscos; *Bow-tie*.

### ABSTRACT

The implementation of on-grid photovoltaic systems is subject to different risks at all stages of execution. These involve both uncertainties related to the safety of individuals and project performance. Thus, the article aimed to carry out a risk analysis in a project to install a residential pho-

voltaic system in the city of Ouro Branco-MG. For this, an action research was carried out, in which three integrated tools were used: Preliminary Risk Analysis (PRA), Probability and Impact Matrix (MPI) and Bow-tie. Through its joint application, it was possible to identify 19 risks, which were duly classified and analyzed. For each of these risks, response measures were stipulated, applied in order to eliminate or reduce the causes and mitigate possible negative effects. As a result, a 69% reduction in the degree of project risk could be observed, with the suppression of all risks classified as high or extreme. In addition, it was possible to verify a balanced application resulting from the integrated use of different analysis and risk management tools, which provided greater detail in key points of the analysis, without prejudice to the others.

Keywords: On-grid photovoltaic systems; Risk analysis; Bow-tie.

## 1. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira é composta em sua maior parte por hidroelétricas. Embora seja uma matriz limpa, essa está sujeita à uma perda de carga anual de cerca de 14%, dado o porte da rede de transmissão, além da ativação de plantas termoeletricas em caso de racionamento (COELHO et al., 2021). A ativação de termoeletricas tem como consequência o aumento do custo da eletricidade e emissão de poluentes, sendo importante a estipulação de medidas mais sustentáveis de produção (OLIVEIRA; CRUZ, 2016). Uma alternativa para este cenário consiste na geração pelo próprio consumidor, por meio de sistemas fotovoltaicos. Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR), ou sistemas *on-grid*, são sistemas de conversão de energia solar compostos por geradores conectados à rede elétrica externa, e sua implantação depende da instalação de uma série de componentes elétricos interligados entre si (KUMAR et al., 2018).

A implantação de um sistema fotovoltaico está sujeita a uma gama de riscos, sejam estes relacionados a perdas de projeto, segurança dos envolvidos ou qualquer outro evento prejudicial que possa incorrer da implantação (GÓMEZ; HERNÁNDEZ, 2016). Uma vez que estes projetos estão ligados a serviços elétricos, muitos deles realizados em altura, faz-se necessário que as condições locais sejam avaliadas no intuito de prevenir eventos indesejados que possam gerar dano pessoal (JUNIOR; CAVAIGNAC, 2019). Além disso, o próprio projeto está sujeito a riscos de obtenção de resultados não satisfatórios, ampliados por incertezas relacionadas à Resolução Normativa nº 482/2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que abre

campo para diferentes meios de tributação e ações políticas (COELHO et al., 2021). Estes fatores ampliam a importância da realização de um planejamento adequado, com o devido processo de levantamento e avaliação dos riscos. Além disso, faz-se relevante a estipulação de medidas de resposta, as quais devem ser supervisionadas ao longo da implantação (GÓMEZ; HERNÁNDEZ, 2016).

Com base no exposto, este artigo teve como objetivo realizar a análise de riscos de um projeto fotovoltaico, implantado em uma residência da cidade de Ouro Branco-MG. Por meio dele, foi possível identificar eventos indesejados e propor medidas de resposta a fim de obter êxito em todas as etapas do projeto, respeitando as necessidades do cliente e a segurança dos envolvidos. Para isso, foi realizada uma pesquisa-ação, com o auxílio de um modelo de avaliação de riscos baseado nas ferramentas Análise Preliminar de Risco (APR) e Matriz de Probabilidade e Impacto, de forma a mapear e classificar os riscos que envolvem o projeto. Além disso, para obter um maior aprofundamento sobre as medidas de resposta, foi utilizada a ferramenta *Bow-tie*, a qual foi direcionada a dois riscos, considerados de difícil análise.

O artigo está estruturado da seguinte forma: no tópico 2 foi elaborado o referencial teórico, abordando os sistemas fotovoltaicos *on-grid* e sua caracterização, além das ferramentas utilizadas como base de análise; no tópico 3 foram declarados os passos metodológicos utilizados para a verificação dos riscos; o tópico 4 contemplou a apresentação dos resultados das análises de riscos organizados por etapa de execução, antes e após a adoção de medidas de resposta; no tópico 5, foi realizada a discussão sobre os resultados obtidos, bem como sobre os benefícios da utilização das ferramentas; por fim, no tópico 6, foi elaborada a conclusão, contendo os apontamentos e considerações finais do artigo.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

Os sistemas fotovoltaicos *on-grid*, são sistemas de conversão de energia solar em energia elétrica, compostos por geradores conectados à rede externa de eletricidade. Esses podem ser implantados na residência de consumidores e, após o processo de homologação, passam a possuir responsabilidade compartilhada entre o titular da instalação e a concessionária de energia elétrica. Isso se dá com o objetivo de gerar energia elétrica com qualidade e segurança para a rede de distribuição (KUMAR et al., 2018).

A relação entre o titular e a concessionária é regida através de um contrato denominado Parecer de Acesso, que é preenchido pelo titular da instalação através de um formulário padrão reconhecido pela

concessionária de energia, que autoriza a conexão do sistema. Conforme a Resolução Normativa nº 482/ 2012 da ANEEL, a energia gerada por sistemas fotovoltaicos *on-grid* pode ser consumida na própria unidade geradora ou convertida em créditos por kWh para posterior compensação na mesma unidade ou em outra de mesma titularidade (COELHO et al., 2021).

## 2.1 Implantação de sistemas fotovoltaicos

Para a instalação do SFCR é necessária a implementação de componentes elétricos interligados a cabos que compõem os geradores de energia. Esses estão relacionados a três grupos: dispositivos de proteção, tais como disjuntores, Dispositivo de Proteção de Surto (DPS) e fusíveis; dispositivos conversores de energia, dentre eles os módulos fotovoltaicos, inversor e transformador em casos específicos; e os dispositivos de fixação, que correspondem a estrutura de montagem dos módulos e acessórios (KUMAR et al., 2017; KUMAR et al., 2018).

É recomendado que o processo de instalação fotovoltaica seja dividido em duas fases: a pré-instalação e a instalação do sistema. Durante a etapa de pré-instalação, uma visita ao local deve ser realizada pelo projetista para o reconhecimento de campo. Nesta visita, são levantadas informações para o planejamento da instalação, bem como para a determinação da rota dos cabos e dimensionamento de materiais. É realizada a identificação de limitações do projeto, verificação de estruturas de fixação, layout e mapeamento dos riscos físicos do projeto (PINHO; GALDINO, 2014).

Ao dimensionar o projeto, a avaliação dos dados coletados em campo é fundamental (KUMAR et al., 2018). Essa é necessária para a especificação dos componentes do sistema, pois a posição de instalação dos módulos e a sombra de componentes externos (árvores, prédios e estruturas civis próximas) podem prejudicar a eficiência de geração de energia. Com uma coleta de dados assertiva, é possível reduzir os riscos relacionados aos custos de materiais e incertezas sobre o desempenho do sistema. Desta forma, a utilização de um *check list* com os itens essenciais de verificação, a anotação dos valores medidos e a observação de influências externas devem ser tomados como foco para melhorar o desempenho do projeto (PINHO; GALDINO, 2014).

A etapa de instalação deve seguir o planejamento inicial e contemplar os recursos necessários para manter o padrão de qualidade adotado pela empresa. A realização de um bom planejamento minimiza as chances de retrabalho e garante maior agilidade na execução do projeto. Além disso, aumenta o nível de segurança, tanto dos envolvi-

dos, quanto dos equipamentos a serem instalados (GÓMEZ; HERNÁNDEZ, 2016).

No Brasil, de acordo com a Lei Nº 5.194, 1966, art 7º, os profissionais responsáveis pelo projeto e instalação de geração distribuída devem estar legalmente habilitados para a função. Isso inclui a posse de certificados de curso técnico ou superior reconhecidos pelo MEC e registro nos conselhos profissionais de acordo com a respectiva categoria. Também é necessário o registro de uma Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), que consiste em um documento formal que intitula um responsável habilitado que responde pelo projeto.

## **2.2 Riscos em sistemas fotovoltaicos**

Como em qualquer projeto de implantação, é importante que as instalações fotovoltaicas sejam planejadas e obedeçam a critérios específicos estabelecidos pelas limitações do contexto de execução (TOMOSK et al., 2017). Este planejamento deve envolver a análise e o controle dos riscos, assim como a realização de planos de ação para prevenir possíveis eventos indesejados em todas as esferas de gerenciamento, com o objetivo de alcançar o êxito do projeto (GÓMEZ; HERNÁNDEZ, 2016).

O gerenciamento de risco em um projeto busca maximizar os seus resultados por meio da otimização de oportunidades e supressão de ameaças. Porém o autor ressalta que as chances de se obter ganhos em um empreendimento através de um projeto eficaz são grandes e o gerenciamento de riscos se apresenta como uma peça importante neste contexto (SALES JUNIOR et al. 2010). Por meio dele é realizado o levantamento das incertezas existentes, assim como o dimensionamento das medidas de controle e mitigação que serão utilizadas, aplicando-se plenamente ao ambiente de projetos fotovoltaicos (GÓMEZ; HERNÁNDEZ, 2016).

No Brasil, devido ao crescimento exponencial da demanda por esse tipo de energia, os projetos fotovoltaicos nem sempre são executados por pessoas qualificadas. Esse fator acirra a necessidade de identificação e atualização dos riscos, de forma a evitar erros de projeto ou mesmo a perda de reputação da tecnologia (FILHO; FARIAS, 2019). Além disso, as atividades executadas em instalações elétricas contemplam riscos diretos e indiretos, mesmo em baixas tensões, o que aumenta a probabilidade de lesão dos trabalhadores expostos e exige que sejam adotadas medidas preventivas. Como exemplo de riscos, pode-se destacar o choque e o arco elétrico, gerado em cabos e componentes energizados. Pode-se destacar também a ação de campos eletromagnéticos que, dependendo da intensidade e tempo de exposição, podem ser prejudiciais aos indivíduos. Estes riscos podem

ainda ser potencializados devido à existência de trabalho em altura durante a instalação (JUNIOR; CAVAINAC, 2019).

Os riscos em projetos fotovoltaicos não se limitam à segurança no momento da instalação. Esses também envolvem diversas incertezas sobre o projeto e seus resultados, principalmente após a publicação da Resolução Normativa 482/2012 que trata da geração de energia renovável. Esta resolução abre campo para alterações tarifárias sobre projetos fotovoltaicos de acordo com o crescimento do setor de energia renovável ou devido à interesses políticos diversos. Isso torna mais complexa a análise de viabilidade do projeto, elevando o nível de incerteza sobre os resultados de um possível investimento no sistema (COELHO et al., 2021; TOMOSK et al., 2017).

### 2.3 Ferramentas de análise e gestão de riscos

Uma das ferramentas comumente utilizadas para verificar as condições de segurança no desempenho de serviços é a Análise Preliminar de Risco (APR). Essa ferramenta é empregada como método de avaliação das condições do projeto e permite antecipar eventos indesejados presentes em cada passo da tarefa a ser executada. Por meio dela, pode-se propor medidas para evitar riscos negativos, aumentando a segurança dos executores e demais envolvidos (FREITAS, 2019).

A APR deve ser elaborada durante a etapa de planejamento, seja esse da concepção de um sistema ou de sua implantação. Além disso, sua aplicação periódica para a busca de eventos ainda não identificados pode ser considerada como uma boa prática, uma vez que aumenta o nível de segurança das atividades. Para isso, deve ser realizado um levantamento sistemático dos eventos de risco presentes no local de trabalho, bem como a identificação de suas possíveis causas e consequências. Com base nestes parâmetros, pode-se estipular medidas de controle para a eliminação ou mitigação dos riscos (FARIA et al., 2020).

Outra ferramenta popular para a análise e visualização dos riscos é a Matriz de Probabilidade e Impacto (MPI), em que, com o uso de uma matriz, é possível identificar o grau de risco de um determinado evento. O grau de risco é um parâmetro associado a prioridade ou urgência do evento e é estipulado por meio da combinação da sua probabilidade (ou frequência) e impacto (ou consequência) (COX, 2008). Sua visualização pode ser facilitada pelo uso de padrões de cores conforme apresentado na Figura 1, adaptada de Napolitano e Sassi (2018). Neste exemplo a probabilidade e impacto dos riscos são classificadas em Muito alto (MA), Alto (A), Médio (M), Baixo (B) e Muito Baixo (MB). O grau de risco é dado conforme o cruzamento destas duas informações.

Matriz		Impacto/Consequência				
		Muito Baixo (MB)	Baixo (B)	Médio (M)	Alto (A)	Muito Alto (MA)
Probabilidade/frequência	Muito Alto (MA)	MB MA	B MA	M MA	A MA	MA MA
	Alto (A)	M BA	B A	M A	A A	MA A
	Médio (M)	M B M	B M	M M	A M	MA M
	Baixo (B)	M B B	B B	M B	A B	MA B
	Muito Baixo (MB)	M B MB	B MB	M MB	A MB	MA MB

Figura 1 - Matriz 5x5 Probabilidade x Impacto

Uma terceira ferramenta utilizada na análise e gestão de riscos é o *Bow-tie*. O *Bow-tie* fornece uma forma qualitativa de análise, utilizada com frequência para a verificação de riscos voltados à segurança do trabalho, com o intuito de evitar acidentes (KHAKZAD et al., 2012). Embora possua um escopo de aplicação mais restrito, alguns autores defendem um uso mais amplo, considerando a sua utilização para uma maior diversidade de riscos, sejam estes ambientais, de negócio, políticos ou de segurança (SANTOS et al., 2013).

A utilização do *Bow-tie* permite conhecer as causas e as consequências de eventos potenciais de forma detalhada, por meio de uma visualização gráfica capaz de combinar técnicas indutivas e dedutivas (SAUD, 2014). Esta combinação é proveniente da junção de duas outras ferramentas de análise de riscos: a Análise de Árvore de Falha (AAF) e a Análise de Árvore de Eventos (AAE), o que a torna mais robusta. Um dos diferenciais da ferramenta é a determinação das medidas de controle que podem ser adotadas tanto para a prevenção das causas, quanto para a recuperação ou mitigação das consequências levantadas (KHAKZAD et al., 2012), conforme apresentado na Figura 2 (SANTOS et al., 2013).



Figura 2 – Esquema do diagrama *Bow-Tie*

Além de trabalhar sobre as causas e consequências de um evento indesejado, o uso do *Bow-tie* também permite um aprofundamento sobre as medidas de controle determinadas. A cada uma delas pode ser vinculado um fator de escalonamento (fator de degradação ou fragilidade), o qual pode reduzir a efetividade do controle (SAUD, 2014). A inserção do fator de escalonamento, incluindo suas próprias medidas de controle, faz com que a análise se torne mais completa, se comparada a outras ferramentas (KHAKZAD et al., 2012).

### 3. METODOLOGIA

Este artigo, possui como objetivo realizar a análise dos riscos de implantação de uma usina fotovoltaica residencial por meio de uma abordagem qualitativa. Para tanto, foi realizado um estudo de natureza aplicada, com o uso da pesquisa-ação, método que conta com a participação direta do pesquisador na implementação das atividades. Esse tem envolvimento ativo na solução de problemas técnicos ou de outras espécies (GIL, 2002).

Os riscos do projeto foram levantados de forma empírica, conforme dados obtidos das análises de campo. Para isso, foram utilizados modelos baseados em três ferramentas distintas: a APR, de forma a levantar os riscos e suas características, a matriz de Probabilidade e Impacto, para mapear e classificar os riscos que envolveram o projeto e o *Bow-tie*, utilizado para obter detalhes dos riscos de maior complexidade.

#### 3.1 Caracterização do projeto de instalação

A análise de risco se deu sobre uma instalação realizada em uma residência na cidade de Ouro Branco-MG. Inicialmente, foi feito o planejamento da instalação fotovoltaica no local, por meio de um *check list*, no qual foram coletados os dados necessários para a realização do

projeto, como a rota dos cabos, o planejamento de fixação dos módulos fotovoltaicos, inversor e dispositivos de proteção. Foi realizada uma inspeção em campo por meio da qual foi possível conhecer a estrutura do telhado e as condições da instalação já existente, de forma a identificar os principais gargalos do projeto.

Após o levantamento de campo, os dados coletados foram analisados em uma plataforma eletrônica desenvolvida para o trabalho. Foi dimensionada a usina ideal para atender às necessidades de consumo de energia elétrica conforme as condições de instalação oferecidas pelo cliente. Um dos desafios da etapa foi especificar os componentes que atendessem a potência planejada e escolher no mercado empresas que atendessem aos requisitos com qualidade, custo e prazo de entrega aceitáveis para as partes interessadas.

Após a instalação do sistema, iniciou-se a etapa de comissionamento, na qual a tensão e frequência elétrica de entrada e saída para a rede de distribuição foram analisadas de forma criteriosa. Essa etapa visou garantir o funcionamento adequado do sistema sem expor os componentes eletrônicos da instalação a riscos, assim como a energia injetada na rede.

Ao final da implantação, foi realizado o monitoramento da instalação. O sistema implantado foi configurado e parametrizado via WiFi, tecnologia que permite monitorar em tempo real os dados de funcionamento da instalação por meio de um aplicativo de celular. Esse pode ser acompanhado em qualquer local, desde que o inversor esteja conectado à internet e o usuário esteja habilitado à rede.

### 3.2 Processo de análise dos riscos

A análise de riscos do projeto foi feita por meio de seis etapas, conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.

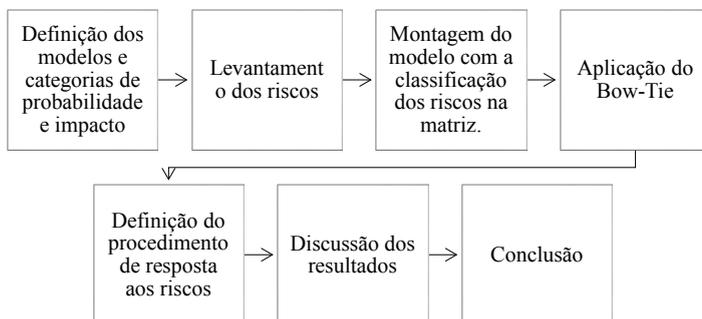


Figura 3 – Fluxograma de análise de riscos de projeto fotovoltaico residencial

Na primeira etapa, foram definidos os padrões de relatórios a serem utilizados para a montagem do modelo de avaliação de risco e do *Bow-tie*. Optou-se por utilizar um modelo próprio, baseado na integração da APR e da Matriz de Probabilidade e Impacto, de forma a centralizar as informações em um único relatório e permitir a análise conjunta de riscos relacionados à segurança e ao projeto em si, com o planejamento de todas as etapas de execução. Isso permitiu uma análise mais adequada e direta, uma vez que as causas e efeitos dos riscos puderam ser comparadas diretamente com as probabilidades e impactos utilizados para a classificação dos riscos. A quantificação das probabilidades e impactos se deu conforme os critérios presentes nos Quadros 1 e 2, montados especificamente para o estudo, baseado em Garvey e Lansdowne (1998).

Quadro 1 – Critérios para probabilidade dos riscos do projeto

Probabilidade	Descrição dos critérios de probabilidade	Valor
Muito baixa	Provável que aconteça uma vez em até 100 projetos.	1
Baixa	Provável que aconteça uma vez em até 50 projetos.	2
Moderada	Provável que aconteça uma vez em até 20 projetos.	3
Alta	Provável que aconteça uma vez em até 10 projetos.	4
Muito alta	Provável que aconteça um em menos de 10 projetos.	5

Quadro 2 – Critérios para impacto dos riscos do projeto

Impacto	Descrição dos critérios de impacto	Valor
Muito baixo	- Os riscos são irrelevantes e não geram prejuízo financeiro ou danos aos envolvidos.	1
Baixo	- Os riscos possuem consequências controladas. - Os custos são pouco significativos sobre o valor do projeto (até 10% do valor do projeto).	2
Moderado	- Os riscos possuem consequências controladas, com dano pequeno aos envolvidos.	3
Alto	- Os riscos possuem consequências controladas, porém com dano maior aos envolvidos. - Os custos são significativos (entre 50% e 70% do valor do projeto).	4
Muito alto	- Os riscos não são controlados, podendo haver dano irreparável. - Os custos são muito significativos (acima de 70% do valor do projeto).	5

O levantamento dos eventos de risco foi feito de forma estratificada por meio da divisão das etapas de execução das atividades do projeto. Foram definidas sete etapas, sendo elas: a coleta de dados, planejamento, homologação, compra de materiais, execução, comissionamento e vistoria com troca do medidor. A definição destas etapas se deu por meio da verificação de implantações já realizadas anteriormente, de forma a promover uma divisão clara entre os grupos de atividades previstas.

Os eventos de riscos levantados foram inseridos no modelo criado para a análise, dando prosseguimento ao levantamento de suas causas e efeitos. Além disso, foram estimadas as suas probabilidades de ocorrência, bem como os seus níveis de impacto, conforme padrões de classificação definidos. Por meio da multiplicação do valor de probabilidade pelo valor de impacto foi estipulado um grau de risco para cada evento analisado. O grau de risco foi utilizado para classificar os riscos em prioridades. Para o estudo, optou-se por utilizar quatro faixas de classificação, alinhadas à percepção dos riscos: extremo, alto, médio e baixo, dadas conforme o valor do grau de risco obtido (Quadro 3).

Quadro 3 – Classificação de riscos fotovoltaicos

Grau de risco	Classificação
1 e 2	Baixo risco
3 a 7	Médio risco
8 a 14	Alto risco
15 a 25	Risco extremo

Para os eventos de risco que apresentaram uma necessidade de análise mais complexa em termos de seus mecanismos de efetivação, foi realizada a aplicação do *Bow-Tie*. Por meio dele foi possível identificar de forma mais detalhada as suas causas, bem como os seus efeitos. Além disso, foram levantadas medidas de controle preventivas e de mitigação, assim como os fatores que podem levar à sua degradação. Estes dados foram retroalimentados no modelo de análise, proporcionando uma melhor definição das causas e dos efeitos propostos, além de uma melhor base para a definição das respostas aos riscos.

A definição de estratégias de resposta se deu com base na classificação dos eventos de risco, dando prioridade àqueles que apresentaram um maior grau. Foram considerados os efeitos e as causas levantadas, bem como as circunstâncias em que cada etapa do projeto é executada. Com base nessas respostas, o risco residual foi recalculado, e os resultados foram apresentados e analisados. Além disso, a

aplicação do método foi discutida em função da literatura, bem como dos resultados obtidos, sendo os achados de pesquisa expressos na conclusão.

#### 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O levantamento dos riscos, bem como a definição de medidas de resposta foram realizados antes da execução de cada etapa do projeto, de forma a tornar as atividades mais seguras. Ao longo da aplicação do método proposto foram identificados um total de 19 eventos de risco distribuídos em todas as sete etapas de execução. Esses foram levantados de forma empírica, com base na experiência da equipe de implantação. Os eventos de risco levantados foram separados por cores de acordo com as etapas e podem ser verificados no diagrama da Figura 4, no qual as áreas ocupadas por cada evento de risco ou etapa são proporcionais ao seu grau de risco. Nota-se que na etapa de execução foi mapeada uma maior quantidade de riscos para o projeto se comparado às outras etapas (cinco riscos). Esta etapa também se destaca por apresentar o maior grau de risco do projeto. Isto se dá uma vez que ela envolve possível contato com partes energizadas e trabalho em altura, o que potencializa os riscos. Outra questão importante a salientar é que todas as etapas apresentam um grau de risco relevante. Isso fez com que a necessidade de gerenciamento dos riscos se desse ao longo de todo o ciclo de vida do projeto.



Figura 4 - Diagrama de árvore dos riscos de projetos fotovoltaicos residenciais

Outro ponto importante diz respeito à classificação dos eventos listados. Dentre os 19 riscos encontrados, três foram classificados como de risco extremo, 14 como alto risco e apenas dois como médio risco. Nenhum dos riscos foi classificado como baixo (Figura 5).

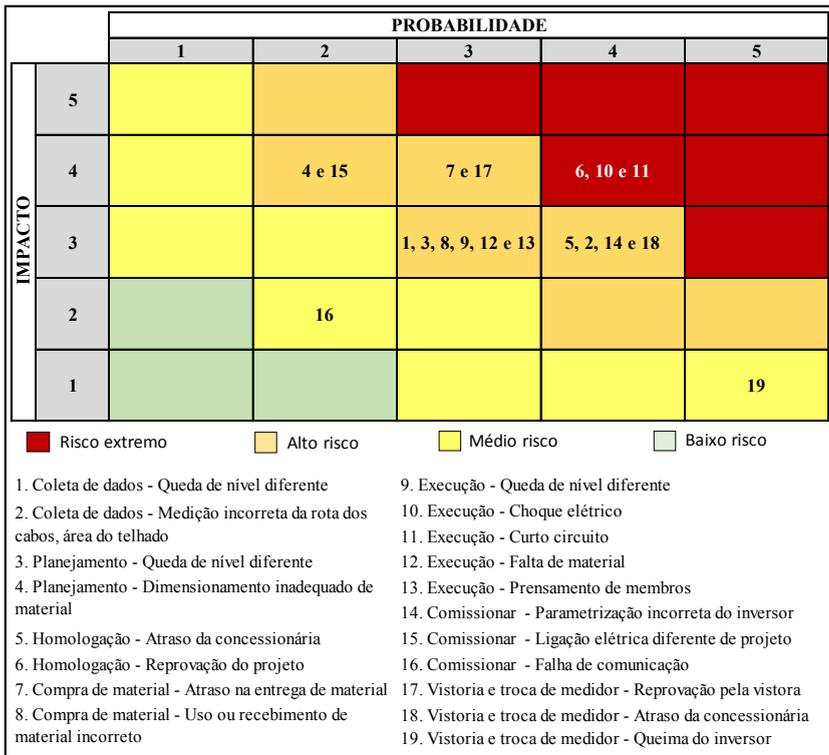


Figura 5 – Organização dos riscos na matriz de probabilidade e impacto

A alta classificação dos riscos apresentada pode estar associada à falta de medidas de contingência adequadas, no caso de materialização de algum dos eventos de risco levantados. Ao longo da coleta dos dados, notou-se que não havia um planejamento sólido para a realização das atividades com foco na estipulação de respostas prévias para a mitigação tanto das causas dos riscos, quanto de seus efeitos. Os resultados da análise individual dos riscos serão apresentados de forma mais detalhada nos tópicos seguintes, separados por etapas.

#### 4.1 Etapa de coleta de dados e planejamento

Ao início das atividades foi necessária a realização de uma visita em campo para a coleta de dados necessários para a elaboração do planejamento do projeto. A etapa de coleta de dados visou levantar as condições presentes, englobando a tomada de medidas e verificação geral do ambiente. Como as células fotovoltaicas são instaladas no telhado, dois riscos foram levantados antes da coleta dos dados (Tabela 2). O primeiro diz respeito à queda de níveis diferentes<sup>1</sup> devido a algum obstáculo ou condição insegura presente no ambiente. Este tipo de queda poderia gerar como efeito escoriações ou quebra de membros, resultando em dano ao trabalhador e afastamento. O segundo risco diz respeito ao levantamento de informações incorretas, sejam essas medidas para o cálculo das rotas de cabo a serem utilizadas, ou mesmo da área do telhado. Dentre as causas prováveis para isso estão a falta de registro em campo e a improvisação com ferramentas inadequadas, podendo gerar falta de material durante a implantação ou mesmo um orçamento incorreto do projeto, fazendo com que o valor estimado fosse diferente dos gastos realizados.

Quadro 4 – Riscos de projetos fotovoltaicos na etapa de coleta de dados e planejamento

Evento de risco	Causa	Efeito	Prob.	Imp.	Grau de risco
Queda de nível diferente	- Obstáculos durante a inspeção de campo; - Condições inseguras do ambiente.	- Escoriações; - Quebra de membros; - Afastamento do trabalho.	3	3	9
Medição incorreta da rota dos cabos e área do telhado	- Os dados coletados não serem devidamente registrados no campo; - Improvisação e uso de ferramentas impróprias para as medições.	- Falta de material para implantação; - Estimativa de custo de projeto diferente do realizado.	4	3	12

Ambos os graus de risco calculados puderam ser enquadrados como altos, exigindo medidas de resposta compatíveis (Quadro 5). No caso, para a queda de nível diferente estão a conscientização sobre a verificação de condições desconhecidas e a utilização de cinto com talabarte. Já para as medições, é necessária a aplicação de um *checklist* para materiais e ferramentas a serem utilizadas. Com base nessas me-

<sup>1</sup> Quedas de altura acima de 2 m, que tem medidas estipuladas por Norma Regulamentadora específica (NR35).

didadas, o risco residual foi recalculado pelo autor com base em histórico de falhas e experiência de projetos, resultando em 1 para a queda de nível diferente e 3 para as medições incorretas.

Quadro 5 – Riscos residuais de projetos fotovoltaicos na etapa de coleta de dados e planejamento

Evento de risco	Medida	Prob.	Imp.	Grau de risco residual
Queda de nível diferente	- Conscientizar o trabalhador sobre a verificação do piso e das condições desconhecidas durante o levantamento dos dados; - Utilização de cinto e talabarte.	1	1	1
Medição incorreta da rota dos cabos e área do telhado	- Criar <i>check-list</i> contendo ferramentas apropriadas e materiais para o levantamento de campo (agenda, caneta, trena à laser e multímetro).	1	3	3

Após a coleta inicial dos dados, foi recomendada a adaptação do telhado da residência e instalação de aterramento dedicado ao sistema, depois do qual, outra visita foi realizada para o planejamento da atividade. Neste caso dois riscos foram levantados: a queda de nível diferente e o dimensionamento inadequado do material. Como a queda de nível diferente já havia sido levantada, o mesmo procedimento foi utilizado para a sua tratativa. Já no caso do dimensionamento inadequado, foi verificado que este pode acontecer devido ao mau posicionamento do módulo, existência de sombras na área, falta de planejamento da instalação e devido à problemas de conexão do inversor com a rede de corrente alternada. Estes problemas poder resultar tanto no aumento do custo do projeto quanto na geração insuficiente de energia, resultando em um grau de risco igual a 8 (Quadro 6).

Quadro 6 – Risco de projetos fotovoltaicos na etapa de planejamento

Evento de risco	Causa	Efeito	Prob.	Imp.	Grau de risco
Dimensionamento inadequado de material	- Mal posicionamento dos módulos; - Sombreamento das áreas externas; - Falta de planejamento do local de instalação; - Problemas de conexão do inversor com a rede de corrente alternada.	- Aumento do custo do projeto; - Geração insuficiente de energia se comparada à prevista.	4	2	8

Como resposta ao dimensionamento inadequado de material, medidas como a verificação de influências externas, uso de bússola e consideração do ponto de instalação do inversor no planejamento foram propostas (Quadro 7). Estas foram responsáveis por uma redução do risco residual para 4.

Quadro 7 – Risco residual de projetos fotovoltaicos na etapa de planejamento

Evento de risco	Causa	Prob.	Imp.	Grau de risco residual
Dimensionamento inadequado de material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Observar e considerar influências externas que podem prejudicar a geração da usina;</li> <li>- Utilizar bússola para a identificação da orientação solar;</li> <li>- Considerar no planejamento o ponto de instalação do inversor e o recurso necessário para a conexão com a rede c.a.</li> </ul>	2	2	4

#### 4.2 Etapa de homologação e compra de material

Os processos de homologação e compra de materiais não necessitam de atividades de campo para a sua execução, porém, isso não significa que os riscos relacionados a elas sejam menores. Estes podem ser verificados por meio da Quadro 8 e compreendem o atraso da concessionária, a reprovação do projeto, o atraso da entrega do material e o uso ou recebimento de material incorreto. Estes possuem grau de risco alto, com exceção da reprovação do projeto, que se trata de um risco extremo.

Quadro 8 – Risco residual de projetos fotovoltaicos na etapa de planejamento

Evento de risco	Causa	Efeito	Prob.	Imp.	Grau de risco
Atraso da concessionária	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de mão de obra ou outros problemas no setor responsável da concessionária;</li> <li>- Atraso no envio da documentação necessária.</li> </ul>	- Atraso na liberação do projeto.	4	2	8

Quadro 8 – Risco residual de projetos fotovoltaicos na etapa de planejamento (cont.)

Evento de risco	Causa	Efeito	Prob.	Imp.	Grau de risco
Reprovação do projeto	- Falha no planejamento; - Erro de preenchimento da documentação; - Montagem em desconformidade; - Erro da concessionária.	- Atraso da liberação/ aprovação do projeto; - Insatisfação com o pagamento da fatura de energia em conjunto com o financiamento do sistema.	4	4	16
Atraso na entrega de material	- Falta de material no mercado; - Atraso no transporte.	- Atraso na fase de execução do projeto.	3	4	12
Uso ou recebimento de material incorreto	- Erro na entrega do material pelo fornecedor; - Especificação de material incorreta.	- Atraso na execução do projeto.	3	3	9

O risco de reprovação do projeto, por envolver questões mais complexas de análise, foi verificado a fundo por meio da utilização da ferramenta *Bow-tie*. Sua análise segue descrita na Figura 6.

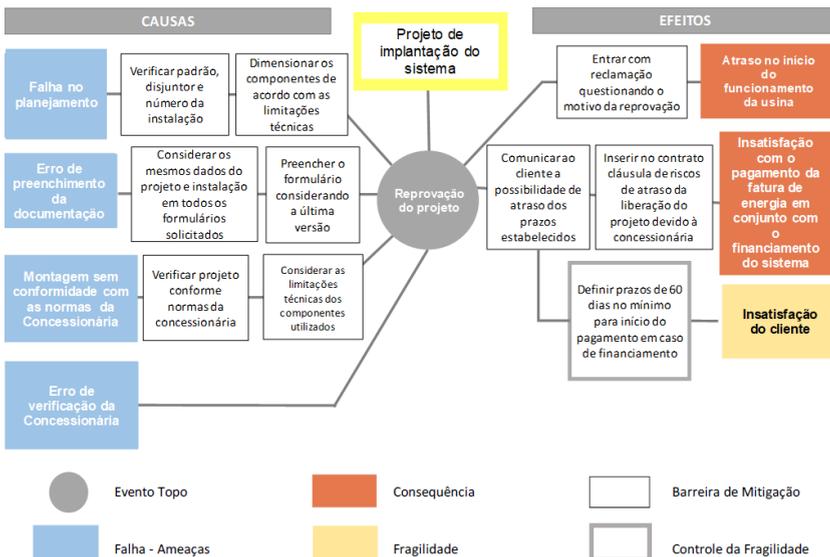


Figura 6 – *Bow-tie* Risco de Reprovação de Projeto Fotovoltaico

De forma a mitigar os riscos verificados, algumas estratégias de resposta foram traçadas. Estas englobam desde ações simples como a verificação do prazo de entrega da concessionária ou a consideração de reservas de prazo no projeto, até ações mais complexas como a verificação de todas as entregas ou abertura de reclamação no caso de atrasos da concessionária (Quadro 9). Por meio destas ações, o grau de risco estimado para o projeto reduziu consideravelmente, encontrando-se agora entre as categorias de médio e baixo risco.

Quadro 9 – Risco residual de projetos fotovoltaicos na etapa de planejamento

Evento de risco	Medida	Prob.	Imp.	Grau de risco residual
Atraso da concessionária	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Observar os prazos de entrega da documentação;</li> <li>- Abrir chamado de reclamação em caso de atraso.</li> </ul>	2	2	4
Reprovação do projeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar padrão de disjuntores e dimensionar componentes conforme limitação técnica;</li> <li>- Tomar os devidos cuidados com o preenchimento do formulário;</li> <li>- Verificar projeto conforme normas da concessionária;</li> <li>- Entrar com reclamação em caso de atrasos da concessionária;</li> <li>- Inserir cláusula de risco contratual e comunicar ao cliente.</li> </ul>	1	4	4
Atraso na entrega de material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Observar o cumprimento do tempo de entrega do material;</li> <li>- Considerar uma reserva de prazo ao planejar o projeto;</li> <li>- Considerar tempos de tolerância de atraso no projeto.</li> </ul>	1	3	3
Uso ou recebimento de material incorreto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar as especificações técnicas do material antes da solicitação;</li> <li>- Certificar-se das características dos componentes ao se planejar e projetar a montagem do sistema;</li> <li>- Verificar todas as entregas e solicitar de imediato a troca de materiais incorretos.</li> </ul>	1	2	2

### 4.3 Etapa de execução

Na etapa de execução, encontra-se a maior quantidade de riscos, visto que é necessária a interface do executante com componentes elétricos e estruturas da instalação (Quadro 10). Há risco de queda de nível diferente, que ocorre devido a obstáculos presentes no ambi-

ente, além da possibilidade de prensamento de membros nas estruturas a serem instaladas. Durante à instalação, os painéis fotovoltaicos recebem radiação solar, sendo essa luminosidade convertida em energia elétrica. Isso gera uma maior probabilidade de curto circuito caso ocorra uma ligação incorreta dos painéis fotovoltaicos ou o mau funcionamento dos componentes eletrônicos. Conseqüentemente pode ocorrer a queima dos módulos fotovoltaicos, queima do inversor, avaria em componentes eletrônicos e, em se tratando em pessoas, queimaduras e projeção de partículas nos envolvidos.

Quadro 10 – Riscos de projetos fotovoltaicos na etapa de execução

Evento de risco	Causa	Efeito	Prob.	Imp.	Grau de risco
Queda de nível diferente	- Obstáculos durante a inspeção de campo; - Condições inseguras do ambiente.	- Escoriações; - Quebra de membros; - Afastamento de trabalho.	3	3	9
Choque elétrico	- Contato com partes energizadas; - Choque elétrico por baixo isolamento das ferramentas;	- Queimaduras; - Queda de nível diferente; - Fibrilação ventricular, arritmia cardíaca ou morte.	4	4	16
Curto circuito	- Ligação incorreta; - Falha de funcionamento de componentes eletrônicos.	- Queima de inversor ou avaria nos módulos fotovoltaicos; - Queimaduras de pele ou olhos; - Projeção de partículas.	4	4	16
Falta de material	- Levantamento incorreto dos materiais necessários; - Erros no planejamento dos materiais.	- Atraso na execução do projeto; - Retrabalho; - Aumento do custo planejado.	3	3	9
Prensamento de membros	- Corte nas mãos e escoriações.	- Impossibilidade de continuar o serviço; - Atraso na entrega do projeto.	3	3	9

Devido a uma maior probabilidade de ocorrência do risco de choque elétrico nas instalações fotovoltaicas, bem como à complexidade envolvida, foi realizada uma análise detalhada sobre as causas, efeitos, barreiras de controle e mitigação que devem ser adotadas.

Essa foi realizada por meio da ferramenta *bow-tie*, conforme Figura 7. Os dados obtidos foram retroalimentados na lista de riscos.

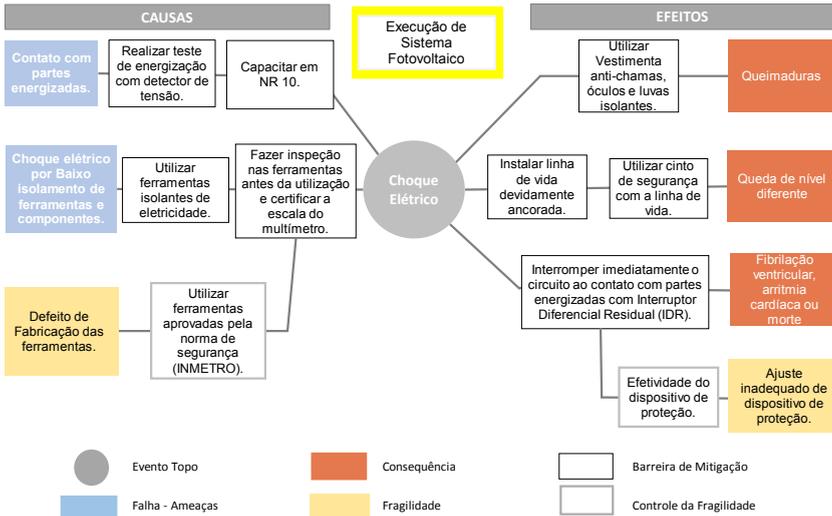


Figura 7 – *Bow-tie* risco de choque elétrico

Para a etapa de execução, foram estabelecidas medidas de controle dos riscos de acordo com a estratégia e recursos disponíveis (Quadro 11). Por exemplo, para os riscos envolvendo “choque elétrico” foi proposta como medida a utilização de Equipamento de Proteção Individual (EPI’s) para trabalho com eletricidade, tais como capacete, óculos, vestimenta antichamas, luvas isolantes e botinas com biqueira de *composite*. Foi proposta também a utilização de cinto de segurança tipo paraquedista, no caso de envolver trabalho em altura. Em se tratando da utilização das ferramentas, foi recomendado que essas sejam isolantes, visto que o contato acidental entre pontos com diferença de potencial pode causar choque elétrico. Foram consideradas também medidas de conscientização e a verificação sistemática da desenergização do sistema.

Quadro 11 – Risco residual de projetos fotovoltaicos na etapa de planejamento

Evento de risco	Medida	Prob.	Imp.	Grau de risco residual
Queda de nível diferente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conscientizar o trabalhador sobre a verificação do piso e das condições desconhecidas durante o levantamento dos dados;</li> <li>- Utilização de cinto e talabarte.</li> </ul>	1	2	2
Choque elétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar testes de energização;</li> <li>- Capacitar mão de obra em NR10;</li> <li>- Utilizar ferramentas isolantes;</li> <li>- Fazer inspeção nas ferramentas e na escala do multímetro;</li> <li>- Utilizar vestimentas antichamas, óculos e luvas isolantes;</li> <li>- Instalar linha de vida e utilizar cinto de segurança;</li> <li>- Interromper imediatamente o circuito ao contato com partes energizadas.</li> </ul>	2	3	6
Curto circuito	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar EPI's de eletricista (capacete, óculos, vestimenta antichamas, luvas isolantes e botinas com biqueira de <i>composite</i>);</li> <li>- Cinto de segurança em trabalho em altura;</li> <li>- Não tocar em partes energizadas;</li> <li>- Utilizar ferramentas isolantes.</li> </ul>	1	3	3
Falta de material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Considerar as medidas planejadas para aquisição dos materiais;</li> <li>- Ao realizar a visita em campo, fazer o registro dos dados;</li> <li>- Utilizar ferramentas de medição (trena a laser e/ou trena comum);</li> <li>- Considerar no planejamento a rota detalhada do circuito elétrico.</li> </ul>	1	3	3
Prensamento de membros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar EPI's (capacete, óculos, vestimenta antichamas, luvas isolantes e botinas com biqueira de <i>composite</i>);</li> <li>- Conscientizar trabalhadores para não se expor em locais de possível prensamento;</li> <li>- Não improvisar ferramentas.</li> </ul>	1	2	2

#### 4.4 Etapa de comissionamento, vistoria e troca do medidor

Na etapa final de implantação do projeto, é realizado o comissionamento com os devidos testes do sistema, a vistoria e a adequação do medidor de energia. Para a sua execução, foram observados riscos de menor impacto como descrito na Quadro 12. Dentre eles pode-se destacar, por exemplo, a parametrização incorreta do inversor, capaz de reduzir a eficiência do sistema fotovoltaico e trazer consequências para o alcance da geração de energia planejada, além de reduzir a vida útil da instalação.

Quadro 12 – Riscos de projetos fotovoltaicos na etapa de comissionamento e troca do medidor

Evento de risco	Causa	Efeito	Prob.	Imp.	Grau de risco
Parametrização incorreta do inversor	- Ajuste incorreto do inversor; - Defeito de fabricação.	- Geração insuficiente de energia; - Redução de vida útil do sistema.	4	2	8
Ligação elétrica diferente do projeto	- Falta de atenção durante as conexões, pressa.	- Falha de funcionamento; - Queima dos componentes eletrônicos.	4	2	8
Falha de comunicação	- Falta de parametrização do comunicador Wifi com a rede local.	- Perda da funcionalidade de acompanhamento de geração à distância.	2	2	4
Reprovação da instalação durante a vistoria	- Instalação elétrica diferente do projeto; - Erro na documentação de solicitação de vistoria da concessionária.	- Atraso no início de geração do sistema; - Retrabalho em corrigir e reenviar a documentação à concessionária.	3	4	12
Atraso da concessionária	- Falta de mão de obra no setor responsável; - Falta de medidor bidirecional no mercado.	- Atraso na liberação do projeto.	3	3	9
Queima do inversor	- Ligação incorreta; - Defeito de fabricação do inversor.	- Atraso no início de geração do sistema.	1	5	5

O risco de maior grau observado nesta etapa foi a reprovação da instalação durante a vistoria. Caso a instalação seja realizada de forma diferente do projeto, essa é reprovada pela concessionária de energia, o que gera a necessidade de retrabalho e atraso no início da geração de energia pelo sistema. Outro fator que pode contribuir com esta reprovação são os erros na documentação de solicitação de vistoria encaminhada à concessionária, os quais podem gerar retrabalho dada a necessidade de correção e reenvio.

Após o mapeamento dos riscos, foram estabelecidas medidas de controle para reduzir o risco residual presente na etapa de comissionamento, vistoria e troca do medidor. Para o caso da reprovação da instalação, por exemplo, foi determinada a certificação dos dados solicitados nos formulários de preenchimento com o projeto realizado. Esse, por sua vez, deve seguir as especificações dos fabricantes garantindo maior segurança da instalação. Em caso de erros por parte da

concessionária, deve-se abrir um processo de reclamação. As demais medidas listadas encontram-se na Quadro 13, assim como os riscos residuais para esta etapa do projeto.

Quadro 13 – Risco residual de projetos fotovoltaicos na etapa de comissionamento e troca do medidor

Evento de risco	Medida	Prob.	Imp.	Grau de risco residual
Parametrização incorreta do inversor	- Certificar as especificações técnicas dos componentes utilizados de acordo com o modelo e potência; - Respeitar os parâmetros recomendados pelo fabricante; - Fazer análise da rede de energia.	1	2	2
Ligação elétrica diferente de projeto	- Fazer revisão do circuito e testes de funcionamento; - Verificar todas as conexões antes de energizar o circuito.	1	2	2
Falha de comunicação	- Certificar que a instalação possui rede de internet compatível com o inversor instalado; - Fazer a configuração seguindo os passos recomendados pelo fabricante.	2	2	4
Reprovação da instalação durante a vistoria	- Certificar se os dados solicitados estão compatíveis com o projeto; - Seguir as especificações de componentes do fabricante; - Abrir reclamação em caso de erro da concessionária.	2	2	4
Atraso da concessionária	- Acompanhar os prazos de vistoria e abrir chamado de reclamação em caso de atraso.	3	2	6
Queima do inversor	- Seguir os passos corretos de energização do sistema conforme recomendação do manual; - Utilizar equipamentos com qualidade referência no mercado e garantia de funcionamento.	1	1	1

## 5. DISCUSSÃO

A aplicação de modelos integrados de ferramentas de análise de riscos para a implantação de um sistema fotovoltaico mostrou resultados relevantes para a mitigação dos riscos, sejam esses relacionados à segurança dos envolvidos ou ao alcance dos objetivos traçados. Com base nos resultados apresentados pôde-se observar uma redução elevada do grau de risco do projeto, demonstrada pelo cálculo do risco residual, após a definição das medidas de controle. Conforme

apresentado na Quadro 14, as medidas de controle propostas para o projeto reduziram o grau de risco de 188 pontos para 58, o que representa uma queda de aproximadamente 69%.

Quadro 14 – Comparativo entre classificação dos riscos e riscos residual

Etapa	Descrição do risco	Grau de risco	Grau de risco residual	Diferença
Coleta de dados	- Queda de nível diferente	9	1	8
	- Medição incorreta da rota dos cabos, área do telhado	12	3	9
Planejamento	- Queda de nível diferente	9	2	7
	- Dimensionamento inadequado de material	8	4	4
Homologação	- Atraso da concessionária	8	4	4
	- Reprovação do projeto	16	4	12
Compra de material	- Atraso na entrega de material	12	3	9
	- Uso ou recebimento de material incorreto	9	2	7
Execução	- Queda de nível diferente	9	2	7
	- Choque elétrico	16	6	10
	- Curto circuito	16	3	13
	- Falta de material	9	3	6
	- Prensamento de membros	9	2	7
Comissionar	- Parametrização incorreta do inversor	8	2	6
	- Ligação elétrica diferente de projeto	8	2	6
	- Falha de comunicação	4	4	0
Vistoria e troca de medidor	- Reprovação pela vistora	12	4	8
	- Atraso da concessionária	9	6	3
	- Queima do inversor	5	1	4
TOTAL		188	58	130

A diminuição do grau de risco resultou na eliminação de riscos classificados como extremos e como altos, os quais englobavam a grande maioria dos riscos levantados (três riscos extremos e 14 riscos altos). Essa redução pode ser verificada na Figura 8.

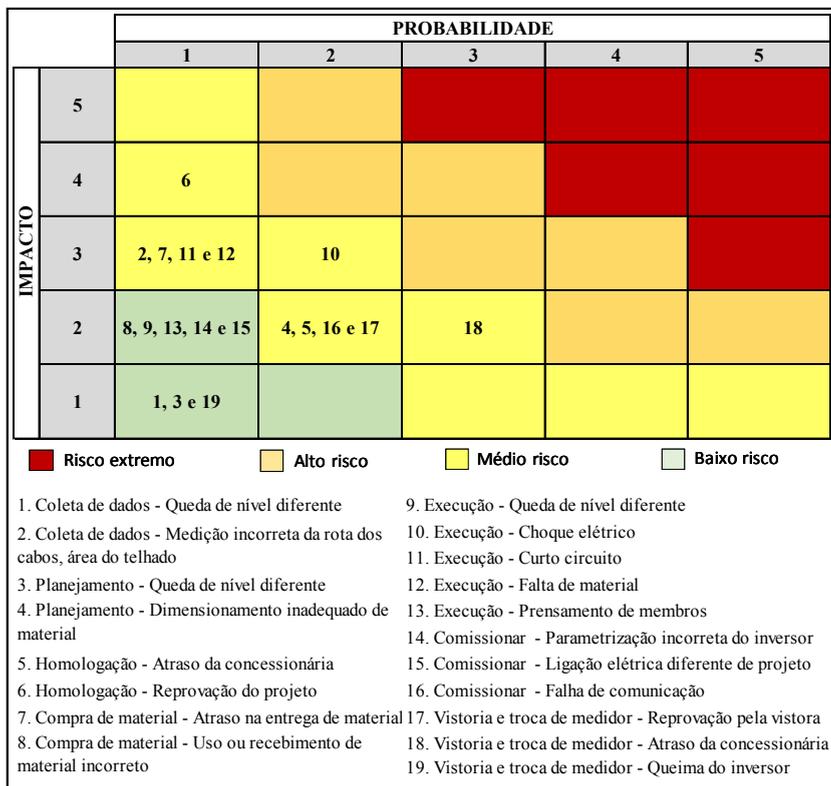


Figura 8 – Organização dos riscos residuais na matriz de probabilidade e Impacto

Diante destes dados, deve-se destacar a redução do grau de risco na etapa de execução, a qual concentra 26% das ameaças encontradas. Foi possível observar uma redução considerável, de 59 pontos para 16, sendo a etapa de maior influência na diminuição do risco total do projeto. Isso se deve em parte à diminuição dos eventos adversos relacionados à eletricidade, o que destaca a importância do planejamento para a concepção prévia de medidas que reduzam este tipo de risco (JUNIOR; CAVAGNAC, 2019).

Um dos pontos importantes para a redução do grau de risco foi a aplicação do *bow-tie*, tendo os choques elétricos como foco de análise. Isso porque com o uso da ferramenta, foi possível ampliar a visão inicial do risco por meio da verificação lógica dos componentes que levam ao evento indesejado (KHAKZAD et al., 2012). Como efeito prático para o risco, foi possível determinar não somente as causas e

efeitos de forma mais detalhada, mas também todas as medidas de contenção que devem ser observadas, como por exemplo, a capacitação na Norma Regulamentadora 10, referente à segurança em instalações e serviços em eletricidade, inspeção de ferramentas ou mesmo a utilização de EPIs específicos.

Embora o *bow-tie* tenha uma aplicação comumente voltada à segurança do trabalho, com foco em evitar potenciais acidentes (SAUD, 2014), a sua aplicação em um risco gerencial proporcionou bons resultados. Ao ser utilizado para o risco de reprovação do projeto, esse garantiu uma visualização detalhada e precisa dos processos que podem ser aplicados para evitar as causas listadas, como o dimensionamento correto dos componentes, a verificação das normas da concessionária, do padrão de disjuntor, número da instalação, entre outros. O mesmo também pôde ser observado para os efeitos. Com o levantamento de medidas detalhadas para conter os impactos negativos, focados na comunicação e na inserção de medidas contratuais, os efeitos da reprovação do projeto puderam ser mitigados. Mais que isso, a análise se estendeu à verificação da fragilidade das medidas de controle e aos meios para sua contenção.

Por fim, a combinação de diferentes ferramentas de gerenciamento de risco para a análise do sistema fotovoltaico proporcionou uma visão ao mesmo tempo ampla e detalhada. Desta forma possibilitou expandir o escopo de análise englobando não somente riscos de segurança, mas também riscos relacionados ao processo de execução. Além disso, foi possível realizar uma análise balanceada, em que os pontos complexos foram explorados de forma mais aprofundada, sem prejuízo para os demais.

## 6. CONCLUSÃO

Esse trabalho visou a realização de uma análise de riscos voltada à implantação de uma usina fotovoltaica residencial, localizada na cidade de Ouro Branco-MG. Para isso foi utilizada uma combinação de ferramentas de gerenciamento de riscos, incluindo a APR, a Matriz de Probabilidade e Impacto e o *Bow-tie*.

Por meio da análise combinada foi possível levantar um total de 19 eventos indesejados, distribuídos em sete etapas do projeto, totalizando um grau de risco equivalente a 188 pontos. Esses representavam em sua maioria riscos altos e extremos. Com a aplicação de medidas de resposta, o grau de risco do projeto foi reduzido em 69%, resultando em apenas 58 pontos. Com essa redução foi possível eliminar tanto os eventos classificados como altos, como os classificados como extremos.

Além da redução dos riscos, foi possível observar a importância da análise detalhada dos eventos de maior complexidade, tendo a aplicação do *Bow-tie* se mostrado bem-sucedida para este objetivo. Por meio dela foi possível analisar não apenas riscos de segurança, mas também riscos relacionados ao desempenho do projeto.

Este trabalho teve como principal limitação a não aplicação do diagrama *Bow-tie* para outros riscos relevantes, dado ao tempo curto de análise existente entre o planejamento e a execução das atividades de campo. Porém, deve-se ressaltar que a aplicação realizada foi suficiente para demonstrar os benefícios provenientes do uso integrado do *Bow-tie* com outras ferramentas de análise e gerenciamento de riscos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZMI, A.; KOHLE, M. L.; IMENES, A. G. On-Grid Residential Development with Photovoltaic Systems in Southern Norway. In: IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), p. 93-97, 2013. DOI: 10.1109/CEAT.2013.6775606

BRASIL. Lei nº 5.194 de 24 de dezembro de 1966, regula o exercício das profissões de Engenheiro, Arquiteto e Engenheiro-Agrônomo, e dá outras providências. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l5194.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l5194.htm)

COELHO, E. O. P. et al. Regulatory impact of photovoltaic prosumer policies in Brazil based on a financial risk analysis. *Utilities Policy* 70 (2021), 101214 8 April 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101214>

COX, L. A. What's wrong with risk matrices? *Risk Analysis*, 28(2), p. 497-512, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x>

FARIA, D. L et al. Análise preliminar de riscos (APR) de uma obra residencial unifamiliar na cidade de Candeias/MG. *Scire Salutis*, 10(2), p. 89-98, 2020. <https://doi.org/10.6008/CBPC2236-9600.2020.002.0011>

FILHO, M. H. O. P.; FARIAS, A. M. Implantation of a photovoltaic system installation and design course. In: IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, 2019.

FREITAS, W. S. Análise Preliminar de Riscos em Instalações de Painéis Fotovoltaicos Residenciais. In: Anais de Engenharia de Produção, UCEFF, 3(1), p 60-79, 2019. <https://uceff.edu.br/anais/index.php/engprod/article/view/276>

GARVEY, P. R.; LANSLOWNE, Z. F. Risk matrix: an approach for identifying, assessing, and ranking program risks. *Air Force Journal of Logistics*, 22(1), 18-21, 1998.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GÓMEZ, L. S.; HERNÁNDEZ, J. I. M. Risk identification in large photovoltaic plants' construction projects. In: 20th International Congress on Project Management and Engineering, Cartagena, 13-15th July p. 1786–1798, 2016. <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/892>

JUNIOR, E. B. D.; CAVAINAC, A. L. O. Avaliação de riscos e priorização de falhas por meio do FMEA em serviços elétricos de baixa, média e alta tensão. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(3): p. 214-225, 2019. [https://doi.org/10.0001/V05N03\\_004](https://doi.org/10.0001/V05N03_004)

KHAKZAD, N.; KHAN, F.; AMYOTTE, P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliability Engineering and System Safety* 104 (2012), p. 36–44, 25 April 2012. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.04.003>

KUMAR, A.; GUPTA, N.; GUPTA, V. A comprehensive review on grid-tied solar photovoltaic system. *Journal of Green Engineering*, 7(10), p. 213–254, 9 September 2017. <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.71210>

KUMAR, N. M.; SUBATHRA, S. P.; MOSES, J. E. On-Grid Solar Photovoltaic System: Components, Design Considerations, and Case Study. In: 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), p. 616-619, 28 August 2018. DOI: 10.1109/ICEES.2018.8442403

NAPOLITANO, D. M. R.; SASSI, R. J. Modelo de sistema de interferência fuzzy baseado em matrizes de probabilidade e impacto para classificar riscos em projetos. *Navus: Revista de Gestão e Tecnologia*, 8(4), p. 69-89, 2018. <http://dx.doi.org/10.22279/navus.2018.v8n4.p69-89.717>

OLIVEIRA, L. M.; CRUZ, A. F. S. Análise comparativa de viabilidade técnica e econômica de um sistema fotovoltaico e um sistema híbrido (eólico - fotovoltaico) on-grid para iluminação predial. In: XV SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS, p. 329–349, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB Cepel, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, D.; MOREIRA, M.; ALMEIDA, A. B. Aplicação do método de bow-tie no controle do risco em serviços de abastecimento de água. SILUSBA, 2013.

SAUD, Y. E.; ISRANI, K.; GODDARD, J. Bow-Tie diagrams in downstream hazard identification and risk assessment. *Process Safety Progress* 33(1), p. 26-35, 2014. <https://doi.org/10.1002/prs.11576>

TOMOSK, S.; HAYSOM, J. E.; WRIGHT, D. Quantifying economic risk in photovoltaic power projects. *Renewable Energy*, 109 (2017) p. 422–433, 27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.031>

WARD, S. C.; CHAPMAN, C. B. Risk-management perspective on the project lifecycle. *International Journal of Project Management*, 13(3), pp. 145-149, 1995. [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(95\)00008-E](https://doi.org/10.1016/0263-7863(95)00008-E)

## **A UTILIZAÇÃO DO CONCEITO DE PICO COINCIDENTE PARA POTENCIALIZAR A RESPOSTA DA DEMANDA NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO**

Fabiano Fuga<sup>1</sup>  
Dorel Soares Ramos<sup>1</sup>

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

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.660

### **RESUMO**

A Resposta da Demanda, mecanismo pouco utilizado no Brasil, pode oferecer muitas vantagens ao sistema elétrico, como por exemplo, o aumento de sua competitividade e a melhoria da confiabilidade no fornecimento da energia elétrica por meio da participação ativa do consumidor de energia. Este trabalho apresenta uma proposta de utilização do conceito de pico coincidente na tarifa de transmissão, permitindo que os consumidores possam contribuir com o aumento da segurança energética e ainda evitar a elevação de custos de operação do sistema. O trabalho tem como referência programas de resposta pela demanda adotados em diversos mercados internacionais, observando a forma de remuneração pelos serviços prestados ao sistema elétrico, bem como a motivação do operador do sistema em oferecer oportunidades, permitindo que a participação dos consumidores contribua com a redução da demanda de ponta resultando, seguramente, em benefícios para o atendimento do sistema como um todo e para os participantes destes programas.

Palavras-chave: Resposta da Demanda; Regulação; Sistema de Transmissão; Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão; Confiabilidade.

### **ABSTRACT**

Demand Response, a mechanism not widely used in Brazil, can offer many advantages to the electric system, such as increasing its competitiveness and improving the reliability of the electric energy supply through the active participation of the energy consumer. This article presents a proposal for using the coincident peak concept in the transmission tariff, allowing consumers to contribute to the increase in energy security and to avoid the increase in system operation costs.

The work is based on demand response programs adopted in various international markets, focusing on transmission tariffs, and observing the form of remuneration for services provided to the electricity system. In the regions where system operators provide opportunities for consumers to contribute to the reduction of demand at peak hours, the benefits for the reliability of the system as a whole and for the participants of these programs can be verified.

Keywords: Demand Response, Regulation, Transmission System, Transmission Tariff, Reliability.

## 1. INTRODUÇÃO

Os mercados de eletricidade reconhecidos como mais avançados devido sua transparência e competitividade adotam, há algum tempo, variados tipos de programas de Resposta da Demanda (RD), nos quais se identificam soluções viáveis, relativamente simples e com resultados positivos que auxiliam a mitigar os riscos e custos de operação do sistema. A experiência internacional mostra que são inúmeras as possibilidades para proporcionar uma participação mais ativa dos consumidores, e assim permitir que eles possam interagir diretamente com o sistema elétrico onde estão localizadas suas cargas, e desta forma, contribuir para mantê-lo estável, confiável e seguro, a preços competitivos.

No Brasil, cuja extensão das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) supera os 100 mil quilômetros, observa-se que a manutenção de uma operação equilibrada tem se tornado um desafio cada vez maior, pois apesar do país ser conhecido pela predominância de geração hidrelétrica, a entrada das fontes renováveis eólica e solar vem reduzindo a sua participação, resultando em perda da capacidade de regularização do sistema. Dessa forma, os déficits de oferta que, no caso brasileiro, estiveram por muitos anos associados à insuficiência de energia, agora também podem ser associados em alguns momentos à falta de capacidade. Fato que reforça esta afirmação é que, nos últimos anos, o Operador Nacional do Sistema (ONS) tem despachado plantas termelétricas para atender a necessidade de reserva de potência operativa, recorrendo em algumas situações a cortes seletivos de carga para superar restrições de transmissão em horário de ponta.

Do ponto de vista do planejador do sistema, papel que é desempenhado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a RD pode ser uma aliada do planejamento do setor, no que se refere ao enfrentamento dos desafios futuros da operação do sistema elétrico brasileiro, como por exemplo, decorrentes da redução da capacidade

de armazenamento dos reservatórios, dificuldades de atendimento à ponta do sistema durante períodos de escassez hídrica, entre outros.

Internacionalmente, há décadas diversos estudos destacam a importância dos incentivos em programas de RD. O artigo *“The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities”* escrito por Gellings (1985) apresentou o conceito da Gestão pelo Lado da Demanda (GLD), termo este que abrange as ações de Eficiência Energética e Resposta da Demanda. Neste trabalho, Gellings mostra que embora o objetivo de qualquer atividade de GLD seja produzir uma mudança no formato de carga com vistas a aumentar a confiabilidade da rede, e para que o programa obtenha sucesso e o gerenciamento seja bem-sucedido, o objetivo final reside em alcançar o equilíbrio entre o atendimento das necessidades da concessionária e o benefício recebido pelo cliente.

Wolak (2001) afirma que estes programas devem ser suficientemente fortes de forma a permitir que tanto os consumidores quanto os geradores possam alterar o seu comportamento, reduzindo o custo de produção de energia e propiciando o uso mais eficiente da capacidade de geração existente.

A FERC (2010) lançou o *“National Action Plan on Demand Response”* tendo como objetivo identificar a quantidade de recursos de resposta da demanda que poderiam ser desenvolvidos e implementados nos Estados Unidos. Entre os principais requisitos para a implementação de programas de RD destaca-se a necessidade de uma comunicação nacional que inclui ampla divulgação dos programas e suporte aos participantes com informações, disposições regulamentares, modelos de contratos, ferramentas analíticas e outros materiais de apoio para os agentes envolvidos nos programas. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (2015), em um estudo considerado futurista para a época, aponta que a flexibilidade operativa e a RD podem cooperar para que a introdução de energias renováveis possa reduzir a necessidade de investimento em infraestrutura.

Entretanto, no âmbito do planejamento do Setor Elétrico Brasileiro (SEB), o tema começa a tomar importância mais recentemente, quando a EPE (2019) publicou a Nota Técnica intitulada *“Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético”*, na qual analisa os principais programas de RD já realizados no mundo, focando nos produtos ofertados, e nos principais aspectos a serem considerados sobre o papel da resposta da demanda no planejamento da expansão de médio e longo prazos. Neste estudo, a EPE enfatiza que a consideração da resposta da demanda torna-se uma ferramenta importante para efficientização e evolução do sistema elétrico, conclui que a RD pode ser composta por uma vasta gama de produtos, com potenciais e públicos-alvo próprios. Portanto, nenhuma

opção deve ser desconsiderada pelo SEB, considerando os benefícios sistêmicos dos programas já observados em diversos países a partir de diferentes configurações de oferta e de comportamento dos consumidores.

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 – PDE 2030 publicado pela EPE (2021) apresenta pela primeira vez, como opção no cenário de referência, a resposta da demanda por incentivos, concorrendo em igualdade de condições com as outras tecnologias disponíveis. Neste cenário, o potencial da RD foi estimado em 2.400 MW no horizonte decenal. No entanto, o trabalho aponta para um potencial crescimento na participação de consumidores em programas de resposta da demanda que possam competir de forma simples e segura com tecnologias convencionais de geração. O PDE 2030 também traz uma consideração importante em relação a RD versus preços, e que deve ser avaliada nos estudos de planejamento, pois quanto mais o preço da energia representar as condições operativas do sistema, maior será o ganho obtido com essa forma de RD, e portanto, qualquer alteração no perfil do consumo de energia pode alterar a duração, a intensidade e o horário da demanda máxima do sistema, trazendo rebatimentos nas análises de atendimento à ponta do sistema.

Em estudo relacionado ao tema, Muller (2021) publicou o artigo *“Impact of Demand Response on Generation Expansion Planning in the Brazilian Interconnected Power System”*, no qual apresenta uma metodologia que possibilita a participação da RD no planejamento de geração, competindo em igualdade de condições com outros recursos de energia, tais como usinas hidrelétricas, térmicas e eólicas. Neste estudo, a RD é modelada de forma endógena no modelo de planejamento para um horizonte de 10 anos, e os resultados indicam um impacto considerável sobre a expansão da geração no horizonte de estudo, postergando e evitando a construção de outras usinas. Santos (2021) publicou o seu “Estudo da Representação da Resposta da Demanda na Programação Diária da Operação e seus Impactos na Otimização do Despacho e Custos de Operação”, com a proposta de estudar a RD como um recurso despachável na programação diária da operação realizada pelo ONS. Neste trabalho foram simuladas reduções de demanda representadas por térmicas fictícias no modelo de otimização DESSEM, utilizado no planejamento da operação de curtíssimo prazo. Os resultados obtidos demonstram que houve redução do custo total de operação do sistema, assim como nos custos marginais de operações conectadas.

O MME (2021), buscando implementar mais uma alternativa que contribua para o aumento da garantia da segurança e continuidade do suprimento de energia elétrica do país, promoveu o programa intitulado Redução Voluntária de Demanda de Energia Elétrica - RVD para atendimento ao SIN. O programa possibilitou aos consumidores

ofertar reduções planejadas de carga em períodos que variam de quatro a sete horas de acordo com o calendário proposto pelo ONS, em base mensal.

Neste contexto, podemos notar que a RD é um mecanismo que apresenta oportunidades de desenvolvimento no SEB, a partir do desenvolvimento de diferentes tipos de programas, que vão desde o provimento de serviços ancilares através de programas emergenciais, até a resposta a preços, na medida que a integração entre oferta e demanda evolua e aproxime os dois lados da equação, solucionando o suprimento elétrico de maneira cada vez mais eficiente. Este artigo irá tratar do atendimento da demanda de ponta com a introdução do conceito de pico coincidente no SEB, permitindo que os consumidores participem de forma mais ativa contribuindo para atenuar a demanda de pico do sistema, independentemente do posto tarifário em que esta ocorra, o que certamente auxiliará o operador no gerenciamento do sistema aumentando sua confiabilidade de suprimento.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: na seção 2 discute-se como os encargos de transmissão são cobrados dos consumidores de grande porte no Brasil, atualmente, e como a boa prática internacional trata estes encargos de forma a permitir uma participação ativa da demanda em relação aos custos de transmissão. Na seção 3 é apresentado o conceito de pico coincidente como uma forma de proporcionar, através das tarifas, a sinalização econômica correta. Desta forma, os consumidores têm a possibilidade de reduzir a sua demanda no horário em que o sistema atinge seu pico de utilização, tendo como intuito reduzir seu custo e aliviar o sistema.

Na seção 4 propõe-se então a introdução do pico coincidente como um fator de ponderação no cálculo das tarifas de transmissão do Brasil, bem como é apresentada a alteração regulatória para que isto seja possível. A seção 5 traz os resultados obtidos através da simulação de alguns casos que procuram demonstrar a sensibilidade dos resultados de acordo com esta proposta.

Nas conclusões e considerações finais dispostas na seção 6 discorre-se sobre a principal contribuição deste trabalho, em que a introdução do pico coincidente permite tarifar a transmissão de uma forma mais dinâmica incentivando os consumidores a responderem adequadamente ao sinal econômico dado na hora em que o sistema elétrico é mais exigido, aliviando o sistema e beneficiando os usuários com menores custos.

## **2. ENCARGOS DE TRANSMISSÃO**

No Brasil, o pagamento do Encargo de Uso do Sistema de Transmissão (EUST) é feito por meio da aplicação das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão (TUST), conforme Resolução Normativa

ANEEL nº 559 (2013), que determina que as tarifas sejam atualizadas atualizadas anualmente de acordo com os reajustes da Receita Anual Permitida (RAP) das concessionárias de transmissão. Esse período tarifário inicia-se em 1º de julho do ano de publicação das tarifas e vai até 30 de junho do ano subsequente.

O cálculo da TUST é realizado a partir da simulação do Programa Nodal, que utiliza como dados de entrada (i) a configuração da rede, representada por suas linhas de transmissão, subestações, geração e carga e, (ii) a RAP total a ser arrecadada no ciclo. A parcela principal da TUST refere-se às instalações de transmissão integrantes da Rede Básica (RB), com nível de tensão igual ou superior a 230 kV, sendo aplicada a todos os seus usuários.

Neste contexto, o ONS possui a prerrogativa de avaliação da contratação do uso do sistema de transmissão a que estão sujeitos os usuários do sistema de transmissão, apurada pelas diferenças entre o Montante do Uso do Sistema de Transmissão (MUST) contratado e a demanda máxima medida a cada cinco minutos e integralizada por hora, de acordo com o ponto de conexão integrante da RB, de forma a garantir a segurança do sistema.

Por outro lado, a experiência internacional mostra que algumas concessionárias norte-americanas utilizam o conceito do pico coincidente de sua área de concessão para a aferição e faturamento mensal dos encargos de transmissão. Nesta abordagem, os grandes consumidores são faturados mensalmente de acordo com a demanda registrada na hora em que o pico do sistema é atingido, como a *Central Maine Power* (2021), no estado do Maine, na região da Nova Inglaterra, e a *Ameren* (2021), no Meio Oeste, por exemplo.

Já no continente Europeu, podemos citar a *National Grid* (2018) que faz uso da chamada “Tríade” (3CP) para a cobrança do uso da transmissão por grandes consumidores no Reino Unido. Essa sistemática é baseada na média das demandas registradas em todo o sistema nos três maiores picos de 30 minutos de todo o sistema, desde que estes ocorram em intervalos de pelo menos 10 dias no período de novembro a fevereiro de cada ano. Os encargos de transmissão são apurados no mês de março de cada ano, baseados em uma tarifa que varia dependendo da zona geográfica, e que é multiplicada pela média da demanda registrada durante as três meias horas da Tríade. A diferença entre a tarifa faturada e a tarifa calculada tendo como base a Tríade é ajustada através de uma fatura de reconciliação emitida em junho de cada ano.

### 3. PICO COINCIDENTE

A boa prática internacional indica que há um interesse crescente em manter um melhor alinhamento entre as tarifas de eletricida-

de e o custo de fornecimento de serviços de rede aos clientes, tanto para fornecer um melhor sinal econômico para o uso eficiente da rede, quanto para reduzir subsídios cruzados. Considerando que os custos de rede são significativamente impulsionados pela demanda de pico do sistema, as tarifas que buscam refletir os custos devem incluir um componente que sinalize adequadamente esta necessidade.

Em “*Designing more cost reflective electricity network tariffs with demand charges*”, Passey et al. (2017) afirmam que os desafios causados pelo aumento da demanda de pico e diminuição de fatores de carga na rede, somados à chegada de novas tecnologias que permitem aos clientes responder aos preços, têm trazido um interesse crescente por parte dos formuladores de políticas e reguladores no desenvolvimento de tarifas de rede que reflitam melhor os custos de rede. O princípio de que as tarifas devem refletir os custos que os usuários impõem à rede, e que a contribuição de cada carga no momento de pico deve ser considerada como elemento fundamental na tarifa a ser cobrada dos consumidores, incentiva tanto o investimento eficiente na rede como o melhor gerenciamento de suas cargas pelos usuários. O estudo conclui que uma das formas de incentivar a eficiência, permitindo a participação ativa do cliente, é considerar na tarifação uma parcela que corresponda à sua contribuição na ocorrência do pico coincidente do sistema.

Neste contexto, o conceito dos picos coincidentes é utilizado em vários mercados de eletricidade afim de recuperar os custos de capital anualizados de ativos de eletricidade que servem aos consumidores finais, é o que constata Baldick (2018) em “*Incentive properties of coincident peak pricing*”. Em mercados mais avançados nota-se, portanto, que a cobrança dos consumidores finais é proporcional ao uso medido nos momentos de picos gerais do sistema ou nos momentos em que os picos ocorrem em um subsistema particular.

Desta forma, vislumbra-se que novas metodologias de cobrança pelo uso da rede são necessárias para orientar e incentivar os clientes a um uso mais racional, maximizando a eficiência econômica do sistema. Adbelmotteleb et al. (2018), no artigo “*Designing efficient distribution network charges in the context of active customers*”, propõem uma metodologia que garante a recuperação dos custos da rede, promovendo o uso racional da rede, bem como investimentos em redes eficientes. O sistema de cobrança de rede proposto, consiste em dois componentes: (i) um encargo de acordo com o pico coincidente da rede (PCNC - *Peak Coincidence Network Charge*) e; (ii) um encargo fixo, no qual o PCNC é considerado como um encargo prospectivo, pois considera o custo de reforços futuros de rede necessários e atribuídos aos clientes durante os horários de pico de utilização da rede, além dos montantes residuais dos custos da rede necessários para o fechamento do balanço entre receitas e despesas.

O pico coincidente é mais comumente utilizado para proporcionar o sinal econômico correto aos usuários dos ativos de transmissão, e em alguns casos de distribuição, além dos custos de capacidade em mercados mais desenvolvidos. Usualmente em Mercados de Capacidade, os consumidores que conseguirem reduzir sua demanda nos momentos do pico de carga anual têm como benefício uma redução no pagamento do encargo de capacidade do próximo ano, proporcional à sua contribuição para que os picos fossem alcançados.

Como até o momento no Brasil não há um Mercado de Capacidade desenvolvido, apesar dos avanços nas discussões de separação de lastro e energia e no que se refere à tarifa de distribuição, ainda serão necessários maiores avanços na abrangência e evolução do sinal econômico. Na seção seguinte será proposta a aplicação de um programa de Pico Coincidente na Tarifa de Transmissão, como forma de avançar na direção das melhorias do sinal econômico da tarifa, tendo como referência experiências internacionais.

#### **4. PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DO PICO COINCIDENTE NA TUST**

Visando a melhoria no sinal econômico para o uso eficiente da rede de transmissão, propõe-se uma alteração na formulação do cálculo do EUST, que passará a ser ponderado utilizando o conceito do pico coincidente do SIN. A introdução do conceito de pico coincidente proporcionará a intensificação do sinal econômico de acordo com o uso efetivo, além de manter o sinal locacional calculado de acordo com as premissas atuais, fazendo uso do programa Nodal.

A proposta acrescenta um fator de contribuição em base mensal de acordo com a intensidade do uso da rede no momento de pico por parte de cada agente conectado e preserva o valor total da RAP a ser arrecada a cada mês, garantindo o equilíbrio entre receitas e despesas para a manutenção dos custos de rede.

A introdução do pico coincidente no cálculo do EUST requer a seguinte alteração no Artigo da 10 da Resolução Normativa ANEEL nº 559 (2013).

Texto original:

Art. 10 - As TUST do segmento consumo serão estabelecidas a cada ciclo tarifário, nos horários de ponta e fora ponta, com o montante a ser arrecadado rateado de forma proporcional ao total de MUST contratado em cada horário.

**Texto proposto:**

Art. 10 - As TUST do segmento consumo serão estabelecidas a cada ciclo tarifário, nos horários de ponta e fora ponta e aplicadas mensalmente de acordo com o Pico Coincidente do SIN ocorrido em cada mês do horizonte de cálculo, com o montante a ser arrecadado rateado de forma proporcional ao total de MUST contratado em cada horário.

Em complementação, o Submódulo 15.8 dos Procedimentos de Rede do ONS (2021), que trata da Apuração Mensal de Serviços e Encargos de Transmissão associados à TUST-RB e Interligações Internacionais, também requer uma alteração na formulação do cálculo constante no item 6.5, que trata especificamente da Apuração de Encargos de Uso do Sistema de Transmissão, a qual será demonstrada na sequência deste racional.

Mediante esta proposta de alteração, o cálculo do EUST na modalidade permanente, relativo ao CUST permanente,  $EUST_{PER}$ , que atualmente é calculado em base mensal, a partir da multiplicação das TUST, homologadas pela ANEEL, pelo maior valor de demanda de potência elétrica entre o contratado e o verificado por medição, por ponto de conexão e horário de contratação, deverá ser apurado de acordo com o efetivo uso do sistema, na hora em que se registrar o pico mensal do SIN.

Entretanto, ao que se refere os valores de  $EUST_{PER}$  associados às distribuidoras e unidades consumidoras conectadas diretamente à Rede Básica, e consumidores e autoprodutores com acesso à Rede Básica, em tensão igual ou superior à 230 kV, por meio de instalações da Distribuidora local, que são calculados por ponto de conexão, nos horários de ponta e fora de ponta pela seguinte equação, não sofrerão alteração, como pode ser observado na Equação 1:

$$EUST_{PER} = (TUST_P \times MUST_{PER P}) + (TUST_{FP} \times MUST_{PER FP}) \quad (1)$$

Sendo:

$EUST_{PER}$ : Encargos de Uso do Sistema de transmissão associados aos MUST contratados na modalidade permanente a ser remunerado pelo ponto de conexão.

$MUST_{PER P}$ : MUST vigente no mês, no período de ponta, contratado na modalidade permanente e associado ao ponto de conexão.

$MUST_{PER FP}$ : MUST vigente no mês, no período fora da ponta, contratado na modalidade permanente e associado ao ponto de conexão.

$TUST_P$ : Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão de Rede Básica vigente no mês, referente ao horário de ponta associada ao ponto de conexão.

$TUST_{FP}$ : Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão de Rede Básica vigente no mês, referente ao horário fora de ponta associada ao ponto de conexão

A proposta de inclusão do conceito do pico coincidente traz consigo uma alteração na formulação do cálculo do EUST que terá duas novas componentes, a primeira visando ponderar a contribuição individual das cargas presentes na RB na hora em que o pico mensal do SIN for atingido, denominada componente  $EUST_{PC}$ , e uma segunda componente de rateio, para que seja mantida a arrecadação mensal referente à RAP, que inclui os valores atualmente calculados na modalidade permanente  $EUST_{PER}$  relativos ao CUST permanente. Portanto, o EUST proposto será calculado de acordo com a Equação 2:

$$EUST = EUST_{PC} + REP \quad (2)$$

Onde:

$EUST_{PC}$ : Encargo de Uso do Sistema de Transmissão associado à  $DUST_{PC}$ , que é a Demanda de Uso do Sistema de Transmissão integralizada da carga quando a demanda do SIN atingiu o seu valor máximo no mês de aplicação.

$$EUST_{PC} = DUST_{PC} \times (TUST_P + TUST_{FP}) \quad (3)$$

REP: Rateio de Encargo Permanente, parcela adicionada a  $EUST_{PC}$  de acordo com a participação da carga (k) de cada usuário na hora em que a demanda do SIN atingiu o seu valor máximo no mês de aplicação. Esta parcela tem como objetivo garantir o recolhimento integral do Encargo de Uso do Sistema de Transmissão na modalidade permanente relativo ao CUST permanente para o número total de usuários (n).

$$REP = FEP \times (\sum_{k=0}^n (EUST_{PER}) - \sum_{k=0}^n (EUST_{PC})) \quad (4)$$

Sendo:

FEP: Fator de Encargo Permanente, referente à participação do EUST<sub>PER</sub> de cada carga no EUST<sub>PER</sub> total a ser arrecadado no mês de aplicação, calculado através da seguinte equação:

$$FEP = \frac{EUSTPER}{\sum_{k=0}^n (EUSTPER)} \quad (5)$$

$$FEP = \frac{((TUSTP \times MUSTPER P) + (TUSTFP \times MUSTPER FP))}{\sum_{k=0}^n ((TUSTP \times MUSTPER P) + (TUSTFP \times MUSTPER FP))}$$

Assim sendo, o EUST passaria a ser calculado considerando as contribuições individuais das cargas de acordo com o pico coincidente do sistema da seguinte forma:

$$EUST = \frac{DUSTPC \times (TUSTP + TUSTFP) + (((TUSTP \times MUSTPER P) + (TUSTFP \times MUSTPER FP))}{\sum_{k=0}^n (((TUSTP \times MUSTPER P) + (TUSTFP \times MUSTPER FP)) \times (\sum_{k=0}^n (EUSTPER) - \sum_{k=0}^n (EUSTPC)))}$$

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o uso da abordagem apresentada, calculando o EUST a ser pago pelos consumidores livres, usuários da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, de acordo com a TUST e a RAP aprovadas para o ciclo 2021/2022, conforme a Resolução Homologatória nº 2.896 (2021).

Com intuito de avaliar o impacto da RD ao pico coincidente, serão simulados três cenários distintos de forma a demonstrar a sensibilidade da proposta em diferentes situações. No Caso 1 será avaliado o impacto de uma forte modulação na hora de pico coincidente por parte de apenas um consumidor, mas tendo este uma tarifa original com valor alto. No caso 2, semelhante ao anterior, também será simulado o impacto de uma modulação intermediária, mas sendo esta a carga de maior porte da amostra. O caso 3 considera modulações de intensidades distintas provenientes de diferentes tipos de cargas visando ilustrar os resultados obtidos para comportamentos distintos em um dado mês.

O gráfico em barras horizontais apresentado na Figura 1 retrata as tarifas ponta e fora ponta originalmente calculadas para o ciclo 2021/2022 para Consumidores Livres, Potencialmente Livres e Auto-produtores, empilhadas horizontalmente de forma a servir de referên-

cia para a análise de sensibilidade que será realizada a seguir, considerando a proposta de aplicação do pico coincidente formulado anteriormente.

Importante ressaltar que, de forma a viabilizar a aplicação da proposta de utilização do pico coincidente como sinal econômico para RD na TUST em base mensal, foram necessários pequenos ajustes para a criação do Caso de Referência. Neste gráfico estão plotadas as tarifas de pico coincidente que agregam a TUST de ponta e fora ponta de acordo com o MUST Permanente contratado por cada carga, que na maioria dos casos tem valores iguais, mas em outros estão modulados de acordo com o MUST contratado na ponta e fora ponta. Neste sentido, a TUST de Pico Coincidente apresenta, em alguns casos, valores diferentes dos encontrados na soma simples da TUST de ponta e fora ponta, que não levam em consideração o MUST Permanente contratado, mas que foram ajustados de forma a garantir que o EUST original de cada carga não seja alterado.

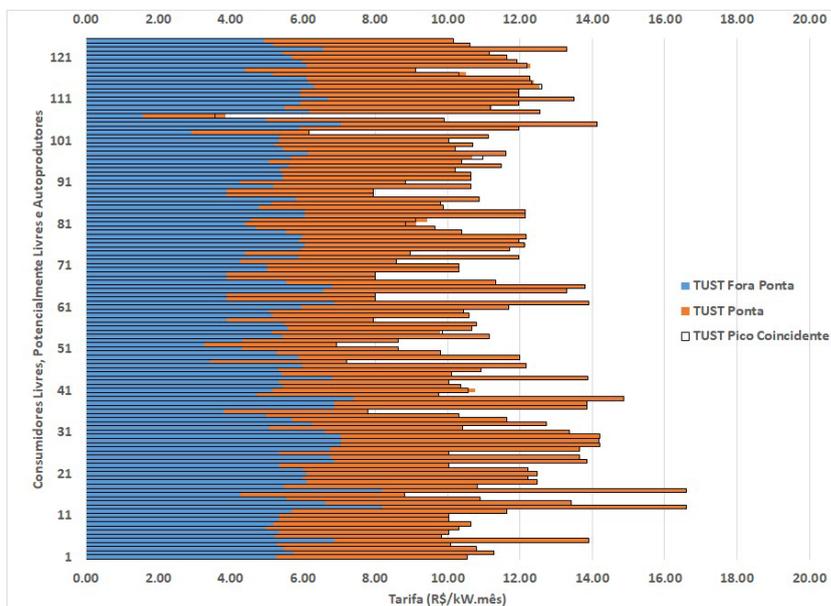


Figura 1 - TUST ciclo 2021/2022 para CLs, PLs e APs fora ponta, ponta e pico coincidente (caso referência)

Diante do exposto, é possível assegurar que caso as cargas demandem a mesma proporção em relação ao MUST Permanente contratado nos horários de ponta e fora ponta na hora em que o pico

coincidente do sistema ocorra, o EUST a ser pago por cada carga será igual ao da situação corrente, ou seja, não há a sinalização econômica em relação ao uso no momento em que o sistema é mais exigido.

Utilizando-se dessas premissas, foram simuladas algumas situações pelas quais pode ser verificado o impacto na tarifa, e por consequência no EUST quando uma determinada carga contribui mais intensamente que as demais para a ocorrência do pico no SIN em um determinado mês.

Na primeira simulação o caso de referência foi alterado, de forma que uma dada carga com tarifa originalmente alta fosse modulada em 90% na hora de pico coincidente do mês de simulação. Este impacto pode ser visto na Figura 2 a seguir:

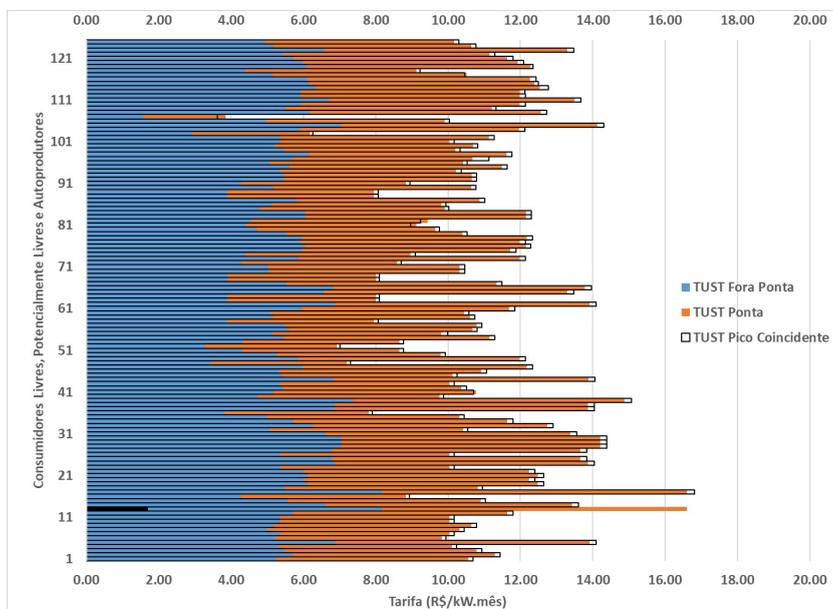


Figura 2 - Caso 1: Impacto da modulação de uma carga com tarifa alta utilizando o conceito da TUST Pico Coincidente

No gráfico do Caso 1 nota-se que a barra destacada em preto apresenta redução na tarifa de uso do sistema de transmissão, uma vez que este usuário modulou seu uso no horário de pico coincidente do SIN. Em contrapartida, os demais usuários que não agiram da mesma forma tiveram um acréscimo em suas tarifas para que fosse possível garantir que o EUST total a ser arrecadado no mês em questão não

sofresse alterações.

Neste caso, o usuário 13 foi o único que reduziu sua carga de 75 MW no caso referência para 7,5 MW, tendo como resultado uma diminuição de 89,9% na TUST pico coincidente que era de R\$ 16,60/kW.mês e foi para R\$ 1,68/kW.mês. Em contrapartida, os demais usuários que nesta simulação não alteraram sua demanda durante o horário de pico coincidente tiveram incremento médio de 1,32% em suas tarifas.

No caso 2 foi simulada a contribuição de uma carga de grande porte que foi modulada em 50% na hora do pico coincidente. A Figura 3 ilustra o resultado para o usuário 12 que modulou sua carga e obteve uma redução na sua tarifa como mostra a barra preenchida em preto. Nesta simulação, o usuário de maior porte, que possui uma carga total de 800 MW no caso de referência, reduziu sua demanda total para 400 MW e obteve uma diminuição de cerca de 47,1% na TUST pico coincidente caindo de R\$ 11,64/kW.mês para R\$ 6,15/kW.mês.

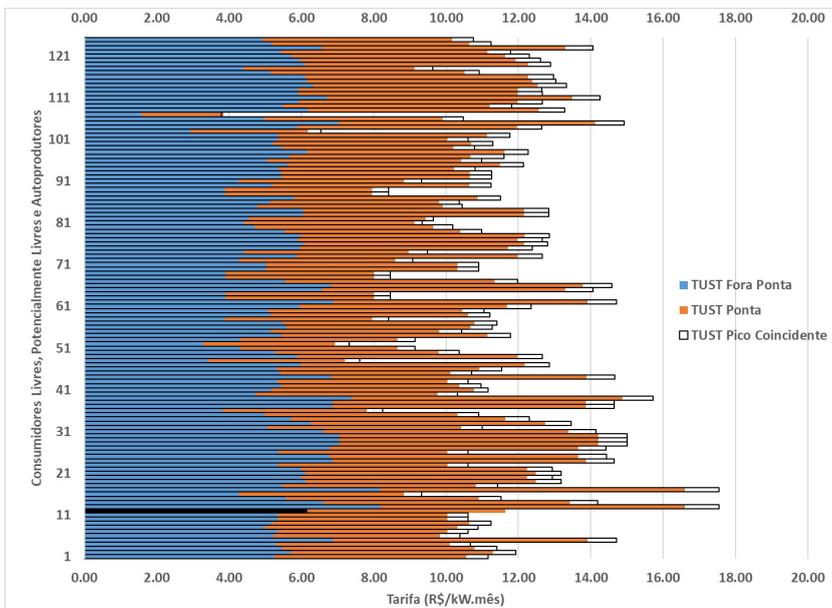


Figura 3 - Caso 2: Impacto da modulação de 50% em uma carga de grande porte utilizando o conceito da TUST Pico Coincidente

No entanto, nesta simulação os demais usuários, que nesta simulação não alteraram sua demanda durante o horário de pico coin-

cidente neste mês, tiveram um aumento médio maior em suas tarifas, que atingiu 5,70%. Observa-se, portanto, que o montante a ser compensado pelos demais usuários é mais alto em comparação ao caso anterior, devido ao tamanho da carga modulada em relação à carga total.

No terceiro caso foi realizada uma simulação com diferentes proporções de modulação para cada carga como poder ser visto na Tabela 1, em que estão destacados 10 usuários que reduziram suas cargas entre 5% e 90% durante a hora de pico.

Neste exemplo, nota-se também que para que o EUST mensal arrecadado não sofra alteração, os demais usuários, que não modularam sua carga, terão que compensar esta diferença que ficou em média 4,85% maior, como pode ser verificado na Figura 4.

Tabela 1 – Modulação das cargas do Caso 3

Usuário nº	MUST Ref. (MW)	Modulação (%)	MUST Caso 3 (MW)
13	75,00	90%	7,50
21	100,00	10%	90,00
35	3,00	80%	0,60
54	125,30	20%	100,24
74	7,00	70%	2,10
86	110,00	30%	77,00
93	80,00	60%	32,00
102	78,00	40%	46,80
111	170,50	50%	85,25
121	110,70	5%	105,17
13	75,00	90%	7,50
21	100,00	10%	90,00
35	3,00	80%	0,60
54	125,30	20%	100,24
74	7,00	70%	2,10

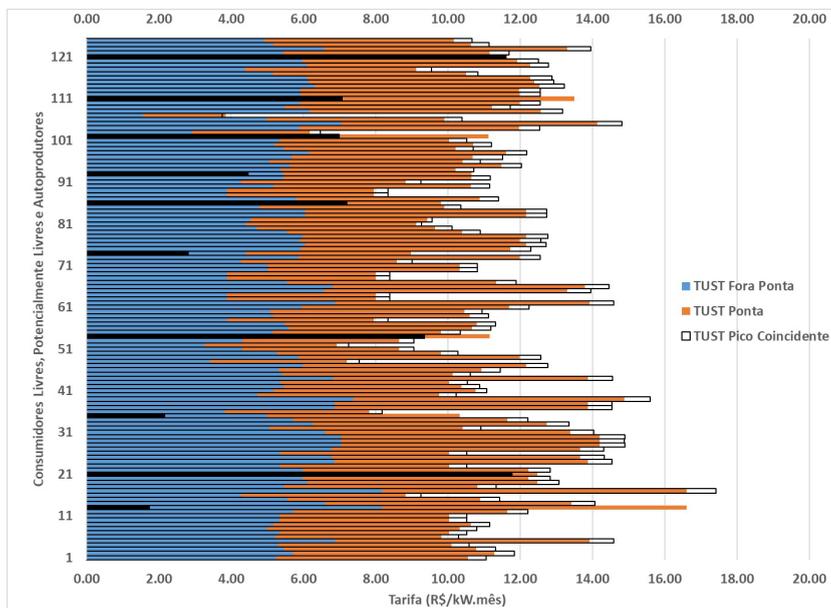


Figura 4 - Caso 3: Impacto da modulação de diversas cargas utilizando o conceito da TUST Pico Coincidente

A Tabela 2 apresenta os resultados de forma individualizada para cada usuário que reduziu sua demanda no horário de pico coincidente simulado no Caso 3. Os resultados da simulação mostram que, conforme a intensidade da modulação de cada carga em resposta dada ao sinal econômico dado pela utilização do Pico Coincidente, nota-se um maior impacto na redução do valor da TUST no Caso 3 em relação ao Caso de Referência.

Tabela 2 – Resultado do impacto da modulação na TUST Pico Coincidente no Caso 3

Usuário nº	TUST Ref. (R\$/kWmês)	TUST Caso 3 (R\$/kWmês)	Impacto (%)
13	16,60	1,64	-90,12%
21	12,47	11,77	-5,61%
35	10,32	2,16	-79,07%
54	11,15	9,35	-16,14%

Tabela 2 – Resultado do impacto da modulação na TUST Pico Coincidente no Caso 3 (cont.)

Usuário n°	TUST Ref. (R\$/kWmês)	TUST Caso 3 (R\$/kWmês)	Impacto (%)
74	8,97	2,83	-68,45%
86	9,81	7,20	-26,61%
93	10,65	4,47	-58,03%
102	11,13	7,00	-37,11%
111	13,49	7,07	-47,59%
121	11,64	11,59	-0,43%
13	16,60	1,64	-90,12%
21	12,47	11,77	-5,61%
35	10,32	2,16	-79,07%
54	11,15	9,35	-16,14%
74	8,97	2,83	-68,45%

Desta forma, o Caso 3 evidencia que a introdução da TUST de Pico Coincidente fortalece o sinal econômico de acordo com o uso do sistema de transmissão na hora em que este se encontra mais estressado, e, portanto, beneficia aqueles que agem em prol do sistema quando este mais necessita, caracterizando uma forma eficiente da demanda responder à tarifa de transmissão.

## 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A operação equilibrada do sistema elétrico torna-se um desafio ainda maior para o sistema elétrico brasileiro na medida em que ocorrem mudanças na matriz elétrica, como a introdução cada vez mais frequente de usinas hidrelétricas sem reservatório e com o considerável aumento da geração renovável de carácter intermitente, como as usinas eólicas e fotovoltaicas, sendo esta última principalmente utilizada como geração distribuída atrás do medidor. A adoção de diferentes tipos de programas de RD com características aderentes às necessidades sistêmicas, sejam estas energéticas ou elétricas, certamente trará alternativas para mitigação dos diversos riscos detectados na operação do SIN.

A legislação brasileira já permite a introdução de mecanismos

de Resposta da Demanda, tanto que o MME lançou recentemente o programa Redução Voluntária de Demanda com objetivo de proporcionar uma alternativa adicional que possa contribuir para o aumento da garantia da segurança e continuidade do suprimento de energia elétrica para o SIN. Desta forma, o Brasil deu um passo importante em direção a ressaltar a importância da RD, permitindo aos consumidores um papel protagonista, engajando-os como agentes ativos no sistema e assim possibilitando o alcance de um novo patamar de eficiência operativa, bem como a redução do custo global de energia.

No entanto, há muito o que se aprimorar no desenho do mercado brasileiro para que tenhamos o sinal econômico correto no curto, médio e longo prazos. Não há dúvidas de que esta evolução necessária, baseada nos princípios de transparência e competitividade, passará por uma maior participação do consumidor, afinal o sistema só existe por causa dele, e é para ele que todo o sistema trabalha. Tendo como base a visão internacional na qual são promovidos diversas opções de programas de RD onde os consumidores podem contribuir com o sistema elétrico em que está inserido, este artigo traz como principal contribuição a introdução do pico coincidente ao tarifar a transmissão de uma forma mais dinâmica e efetiva, permitindo aos consumidores responderem ao sinal econômico na hora em que o sistema elétrico é mais exigido, cooperando assim para a segurança do suprimento e a confiabilidade do sistema.

A introdução do conceito de pico coincidente proporcionará a intensificação do sinal econômico de acordo com o uso efetivo, além de manter o sinal locacional calculado de acordo com as premissas atuais, fazendo uso do programa Nodal. A proposta acrescenta um fator de contribuição em base mensal de acordo com a intensidade do uso da rede no momento de pico por parte de cada agente conectado e preserva o valor total da RAP a ser arrecada a cada mês, garantindo o equilíbrio entre receitas e despesas para a manutenção dos custos de rede conforme demonstrado nos casos de sensibilidade.

Considerando os benefícios, tanto para o SIN quanto para os usuários de rede que atuarem para a redução da demanda máxima no sistema de transmissão, o conceito de pico coincidente poderá também ser aplicado no segmento de distribuição. Na medida em que este agente também receba o sinal econômico da TUST de Pico Coincidente, ele poderá repassar o benefício aos usuários do sistema de distribuição, estes poderão contribuir com a redução da carga no horário de pico do sistema, respondendo ao sinal econômico correto e promovendo a eficiência econômica do uso da rede. No futuro, tão logo os usuários conectados ao sistema de distribuição disponham de medição adequada o conceito de pico coincidente também poderá ser aplicado nas tarifas de distribuição ampliando o alcance da resposta da demanda para os consumidores de varejo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADBELMOTTELEB I., GÓMEZ T., CHAVES ÁVILA J.P., RENESES J., Designing efficient distribution network charges in the context of active customers, *Appl Energy* 210 (2018), pp. 815–826. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917311236>>. Acesso em: 26 Ago. 2020.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Normativa nº 559/2013. Estabelece o procedimento de cálculo das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão - TUST. Brasília, DF, 28 Jun. 2013. Disponível em: <[http://www.lex.com.br/legis\\_24569845\\_RESOLUCAO\\_NORMATIVA\\_N\\_559\\_DE\\_27\\_DE\\_JUNHO\\_DE\\_2013.aspx](http://www.lex.com.br/legis_24569845_RESOLUCAO_NORMATIVA_N_559_DE_27_DE_JUNHO_DE_2013.aspx)>. Acesso em: 27 Ago. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Homologatória nº 2.896/2021. Estabelece o valor das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão – TUST de energia elétrica, componentes do Sistema Interligado Nacional para o ciclo 2021-2022, e dá outras providências. Brasília, DF, 13 Jul. 2021. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20212896.pdf>>. Acesso em: 9 Set. 2021.

AMEREN, Tariff Summary. Disponível em: <[https://www.ameren.com/-/media/corporate-site/Files/Business\\_Partners/RetailElectricSuppliers/CC\\_TariffSummary.pdf](https://www.ameren.com/-/media/corporate-site/Files/Business_Partners/RetailElectricSuppliers/CC_TariffSummary.pdf)>. Acesso em: 21 Ago. 2021.

BALDICK R., Incentive properties of coincident peak pricing, *Journal of Regulatory Economics* 54 (2018), pp. 165-194. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421517304767>>. Acesso em: 19 Ago. 2021.

CMP - CENTRAL MAINE POWER COMPANY, Schedule 21. Disponível em: <[https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/regulatory/tariff/sect\\_2/sch21/sch\\_21\\_cmp](https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/regulatory/tariff/sect_2/sch21/sch_21_cmp)>. Acesso em: 21 Ago. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota Técnica 023/2019, Resposta da Demanda: Conceitos, aspectos regulatórios e planejamento energético. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacoes\\_Arquivos/publicacao-389/NT\\_EPE\\_DEE-NT-022\\_2019-r0.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacoes_Arquivos/publicacao-389/NT_EPE_DEE-NT-022_2019-r0.pdf)>. Acesso em: 08 Ago. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, Brasília, 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-90/PDE%202030\\_RevisaoPosCP\\_rv2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-90/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf)>. Acesso em: 30 Ago. 2021.

FERC - FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION, "National Action Plan on Demand Response", Disponível em: <<https://www.ferc.gov/legal/staff-reports/06-17-10-demand-response.pdf>>. Acesso em: 17 Ago. 2021.

GELLINGS, C.W. The concept of demand-side management for electric utilities. Proceedings of the IEEE, IEEE, v. 73, n. 10, p. 1468-1470, 1985.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Portaria nº 538/GM/MME, Brasília, 29 Jul. 2021. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-538/gm/mme-de-29-de-julho-de-2021-335468238>>. Acesso em: 10 Set. 2021.

MULLER G. M., Impact of Demand Response on Generation Expansion Planning in the Brazilian Interconnected Power System. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9326129>>. Acesso em: 8 Set. 2021.

NATIONAL GRID, Introduction to Triads. Technical Report 2018. Disponível em: <<https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/44940-Triads%20Information.pdf>>. Acesso em: 04 Ago. 2021.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, Procedimentos de Rede. Submódulo 15.8. Apuração mensal de serviços e encargos de transmissão associados à TUST-RB e Interligações Internacionais. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%20C3%B3dulo%2015%2FSubm%20C3%B3dulo%2015.8%2FSubm%20C3%B3dulo%2015.8%202017.09.pdf>>. Acesso em: 18 Ago. 2021.

PASSEY R., HAGHDADI N., BRUCE A., MACGILL I., Designing more cost reflective electricity network tariffs with demand charges, Energy Policy, 109 (2017), pp. 642-649. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421517304767>>. Acesso em: 26 Ago. 2021.

SANTOS R. B. S., Estudo da Representação da Resposta da Demanda na Programação Diária da Operação e seus Impactos na Otimização do Despacho e Custos de Operação. Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ, 2021.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Quadrennial Energy Review First Installment: Transforming U.S. Energy infrastructures in a Time of Rapid Change. 2015. p. 3-1 a 3-33. Disponível em: <[https://energy.gov/sites/prod/files/2015/04/f22/QER\\_Ch3.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2015/04/f22/QER_Ch3.pdf)>. Acesso em: 10 Ago. 2019.

WOLAK F. A., Designing a Competitive Wholesale Electricity Market That Benefits Consumers, Department of Economics Stanford University, Stanford, CA, 2001.

## UNCONVENTIONAL SOURCES OF GASEOUS ENERGY IN THE SOUTHERN REGION OF BRAZIL: A COMPARATIVE SWOT ANALYSIS

Rafael Luis Sacco<sup>1</sup>  
Thiago Luis Felipe Brito<sup>1</sup>  
Edmilson Moutinho dos Santos<sup>1</sup>  
Patrícia Helena Lara dos Santos Matai<sup>1</sup>

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

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.677

### ABSTRACT

The southern region of Brazil is diverse when it comes to unconventional gaseous energy sources with high methane concentrations. Located above the Paraná Sedimentary Basin, the region has great potential to produce shale gas and coalbed methane, situated in the Ponta Grossa and Rio Bonito Formation, respectively. In addition, the generation of biomethane from pig farming effluents in the state of Paraná has been gaining national prominence. In this sense, this work aimed to carry out a comparative SWOT analysis of three potential methane sources in the southern region of Brazil: (1) shale gas, (2) coalbed methane, and (3) biogas from swine effluents. This qualitative study debated each option regarding its regional impacts, developed gas distribution infrastructure, and investments in R&D for risk mitigation. A clearer consolidation of the federal government's competence and states would bring more confidence and predictability to the market and promote better policy and legal security for investors.

Keywords: Shale gas; Coalbed Methane; Pig manure; Biomethane; Southern Brazil.

### RESUMO

A região Sul do Brasil dispõe de diversas fontes energéticas gasosas não convencionais. Localizada acima da Bacia Sedimentar do Paraná, a região possui grande potencial de exploração de gás de folhelho e metano de carvão nas formações Ponta Grossa e Rio Bonito, respectivamente. Além disso, a geração de biogás na região, proveniente do efluente da suinocultura no estado do Paraná, vem ganhando destaque nacional. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo a realização de uma análise comparativa, via Matriz SWOT,

de três potenciais fontes energéticas gasosas na região Sul do Brasil: (i) o gás de folhelho, (2) o metano de carvão e (3) o biogás oriundo de efluentes da suinocultura. Este estudo, de caráter qualitativo, realizou um debate de cada opção energética com relação aos seus impactos regionais, infraestrutura de distribuição e investimentos em pesquisa e desenvolvimento para a mitigação de riscos. Verificou-se que uma clareza maior entre as competências estaduais e federais poderia trazer maior confiança e previsibilidade para o mercado, além de promover políticas públicas mais assertivas e maior segurança jurídica para os investidores.

Palavras-chave: Gás de Folhelho; Metano de Carvão; Esterco Suíno; Biometano; Sul do Brasil.

## 1. INTRODUCTION

The southern region of Brazil (SRofB) has a wide diversity when it comes to gaseous energy sources. The generation of biogas from pig farming substrate in southern Brazil has gained national prominence through projects and research incentives. This support is provided mainly by CIBiogás (International Center for Renewable Energies - Biogas), a Science and Technology Institute located within the Itaipú Technological Park (PTI), in Foz do Iguaçu, PR (CIBIOGÁS, 2020). The institute's support to farmers in the region has contributed to this technology adoption by local landowners. In addition, the SRofB is above the Paraná Sedimentary Basin (PSB), an area with great potential for the exploration of shale gas and coalbed methane. These gaseous sources are already commercially explored in some countries but not Brazil (EPE, 2019).

This work carries out a comparative SWOT analysis between three potential energy sources with high methane concentration in the SRofB: two from unconventional fossil sources and one from a biogenic origin. We seek to understand the main competitive advantages between them and what barriers have to be overcome. Due to this study's qualitative nature, we do not propose to point out which option will be the most adequate or preferable, but rather to carry out a broad debate on its aspects and impacts in the region.

The studied first source will be the shale gas present in the Ponta Grossa Formation in the PSB, extracted by the hydraulic fracturing technique. It is an unconventional natural gas source (EIA, 2013) since it is difficult to access the resource contained in low permeability reservoirs (ANP, 2010). The second unconventional source will be the coalbed methane present in the Rio Bonito Formation in the PSB, between Rio Grande do Sul (RS) and Santa Catarina (SC) (KALKREUTH et al., 2008). The third source will be the biogas from swine effluents, generated through anaerobic digestion, present with

the highest concentration in western Paraná (PR) and SC and the northwestern RS (BIOGÁS BRASIL, 2019).

## 2. LITERATURE REVIEW

The SRofB comprises three states: PR, SC, and RS. The region, with a total area of around 576,774 km<sup>2</sup> (corresponding to less than 7% of the total national area), shares its borders with Paraguay and Argentina in the west, Uruguay in the South, the Atlantic Ocean in the east, and the Brazilian states of São Paulo (SP) and Mato Grosso do Sul (MS) in the North (IBGE, 2021a), as shown in Figure 1. In addition, SRofB has a total estimated population of around 30 million people (IBGE, 2020a), more than countries like Australia, Israel, and Venezuela, or more than the population of Norway, Sweden, Finland, and Denmark together (UN, 2019).



Figure 1 - The Political Map of Brasil, with the indication of the SRofB

This work consists of a qualitative SWOT analysis through bibliographic and exploratory research, which aims to understand the current situation and prospects for three gaseous energy sources in the SRofB. A SWOT analysis is a strategic planning tool used to assess an organization, a plan, a project, or a business activity, focusing on the strengths and weaknesses (internal factors) and the opportunities and threats (external factors) of the study object (GÜREL and TAT, 2017).

The lack of a quantitative approach in this study is due to the limitations of the SWOT analysis when not employed with an auxiliary quantitative methodology. After mapping internal and external factors, we develop strategies to use the strengths to tackle internal weaknesses, suppress threats and take advantage of opportunities (DYSON, 2004).

This work sought to position the energy sources based on four strategic evaluation criteria:

(a) Resources (internal): this criterion evaluated the available resources in the SRofB with the potential for developing exploratory activities of the energy sources studied in this work. We present geological maps and agribusiness land use data to examine the region's exploration potential.

(b) Technology (internal): this criterion analyses the technological level and the maturity of engineering techniques that exploit the resources. Within this perspective, environmental impacts are directly related to current practices.

(c) Policy (external): political, legal, and social issues related to the exploration activities of each energy resource are verified by this criterion, as well as socio-economic, regulatory, and environmental aspects, such as court decisions.

(d) Market (external): by this criterion, contents related to the commercialization of the gases produced, supply chain, demand, logistics, and infrastructure, from the production site to the final consumer, were analyzed. We also considered aspects related to the global trend for cleaner fuels and the need for a safer and more transparent energy matrix.

After the bibliographical analysis, we discuss the energy sources comparatively to each other, seeking to determine their chances of success. International literature provides numerous studies that performed a comparative SWOT analysis applied to the energy industry, both for renewable and fossil energy sources.

Fertel et al. (2013) sought to identify the competition between energy and climate policies in Canada's federal and provincial spheres and concluded that the lack of coordination and consistency between them is a weakness. Kutcherov et al. (2020) used the SWOT methodology to assess Russia's prospects for natural gas exports. They identified the growth of gas production and exports by the United States as a threat, increasing the competitiveness of markets traditionally dominated by Russia.

In the United States, Cronshaw and Grafton (2016) used the SWOT methodology to assess the rapid growth of the shale gas industry in Pennsylvania. They proposed regulatory principles to reduce

associated risks. Wan et al. (2014) studied the barriers to developing China's shale gas industry. They observed the necessity of breaking the monopoly of the major state-owned companies over high-quality reserves, creating fair competition between service providers, and improving the water management system.

In South America, Waterworth and Bradshaw (2018) compared Argentinian shale gas with Brazilian pre-salt via a SWOT matrix, while Carbone-Neto et al. (2021) also used the SWOT matrix and developed an exploratory study on hydraulic fracturing in Brazil. The authors considered that the fracking technique is at an advanced stage and that a regulatory definition is necessary to ensure the proper environmental, social, and safety obligations. These studies have presented the overall views of both countries and contributed to the perception of the SRoFB potential.

### 3. FOSSIL AND UNCONVENTIONAL GAS SOURCES

Present in Brazil, Paraguay, Uruguay, and Argentina, the PSB extends most in the Brazilian territory, with approximately 1,121,239 km<sup>2</sup> in the southeast and central regions of the country (EPE, 2019). The PSB is present in PR, SC, and RS (ZALÁN et al., 1990).

Exploratory activities of hydrocarbons in the PSB started around 1892 by private companies and public institutions. These initial activities entailed shallow drilling wells close to tar sands areas (ZALÁN et al., 1990). Despite the conventional exploratory activity in the PSB and a large amount of geological data available for the region, no unconventional gas has been commercially explored yet (EIA, 2015b).

Since the 1980s, Brazil has focused much of its oil and gas exploration efforts on offshore reserves, while onshore resources have had little exploratory activity (LENHARD et al., 2018). The successful exploration of unconventional onshore reserves in other countries has attracted stakeholders' attention to the Brazilian sedimentary basins (GOMES, 2011). Ahead, we present what is currently known about two kinds of unconventional gases and present a SWOT matrix for each of them.

#### 3.1 Shale Gas

**Resources:** The occurrence of shale gas in the PSB is mainly concentrated in the shales formed in the Devonian period of the Ponta Grossa Formation (EPE, 2019), as shown in Figure 2 (adapted from EPE, 2019). Estimations show that shale gas resources in the region correspond to approximately 12.73 trillion m<sup>3</sup>, of which 2.27 trillion m<sup>3</sup> are recoverable, with an expected gas production between 284.26 to 994.92 million m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> (EIA, 2015b).

This figure represents about one-third of the Vaca Muerta reservoir in Argentina's Neuquen Basin (EIA, 2015a). The shale gas reservoirs in PSB represent a prominent position in South America.

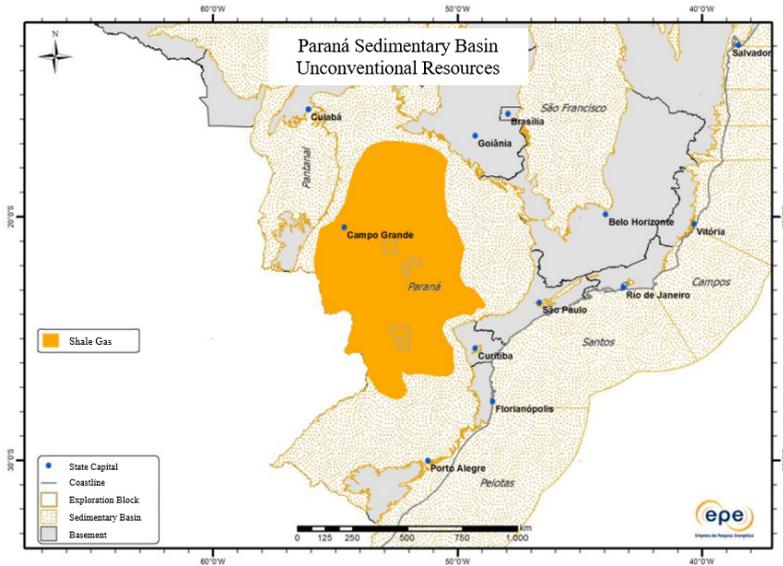


Figure 2 - Shale gas resources in the PSB adapted from EPE (2019)

**Technology:** The current technology to explore shale gas is hydraulic fracturing, in which a high-pressure fluid composed of water, sand, and chemicals is injected into the drilled well, opening fractures in the rocks. After the well depressurization, the hydrocarbons flow from the fractured rock to the surface (CTMA, 2016). This technology is widely used in countries with significant shale gas production: the United States, Canada, and Argentina (EIA, 2013).

The development of the shale gas industry has been constantly associated with a series of environmental problems due to hydraulic fracturing. Impacts such as groundwater pollution, explosions, small seismic events, contamination of rivers and soil, leaks of toxic and flammable gases, substantial consumption of water resources, among others, constitute a set of factors that affect the general public perception of that technology (ZOBACK et al., 2010). Those environmental risks are also associated with the exploitation of conventional onshore gases. Zoback et al. (2010), Jenner and Lamadrid (2013), and Holditch (2013) indicate that a more detailed monitoring and transparency of operations, consistent environmental regulation, and the use of good practices in shale gas exploration can minimize the risks associated with the hydraulic fracturing technique.

In Brazil, the Poço Transparente project, a strategy defined by the Ministry of Mines and Energy in the REATE 2020 program (MME, 2020c), aims to apply the hydraulic fracturing technique in a model well. Its objective is to assess production feasibility and the risks of developing a country's regulatory framework for shale gas exploration (EPBR, 2019).

Policy: In Brazil, the upstream (exploration, production, and processing of natural gas), and the midstream (transport and storage of natural gas) activities, are the responsibility of the Federal government. Downstream (distribution and sale to the final consumer of gas) activities are the responsibility of the states (FGV, 2014; GOMES, 2014).

The primary federal laws governing the natural gas sector are the Petroleum Law (n° 9,478/1997) and the Gas Law (n° 11,909/2009) (ARAÚJO, 2016). While the former established the end of Petrobras' monopoly and opened the market to new investors (FGV, 2014), the latter brought more bureaucracy to the sector. According to the Ministry of Mines and Energy, no new gas pipeline has been built in Brazil since the Gas Law in 2009. All existing natural gas infrastructure was previously built under a permission regime. Law No. 14.134, sanctioned in 2021, aims to repeal the Gas Law of 2009 and bring greater competitiveness and autonomy to the sector (BRAZIL, 2021; MME, 2020a).

At the state level, the Federal Constitution of 1988 granted the states of the Union the exclusivity of local piped gas services. Thus, since the 1990s, many states have created their piped gas supply companies through state laws (ARAÚJO, 2016). In southern Brazil, the companies Compagás, SCGás, and SulGás own all the concession areas for the distribution and sale of natural gas in PR, SC, and RS, respectively (ABEGAS, 2021).

As expressed in the Petroleum Law, the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels (ANP) prepares the bidding process for concessions of areas to explore and produce unconventional natural gas in Brazil. In 2013, ANP presented the 12th Bidding Round to explore seven Brazilian sedimentary basins, including the PSB (ANP, 2013). However, after granting the blocks, Paraná state, through a court injunction issued by the Federal Public Ministry (MPF) in 2017, suspended the effect of all concession contracts within the state's limits. This decision was motivated by the understanding that, because the bidding process allowed the use of hydraulic fracturing technology, the MPF assessed potential risks to the environment, human health, and economic activity based on the precautionary principle (JUSBRASIL, 2014). In addition, the exploration of shale gas by using the hydraulic fracturing method was definitively prohibited in PR after Law No. 18.878 in 2019 (AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DO PARANÁ, 2019). This regulatory barrier poses an enormous political challenge in the state with the most significant potential for shale gas production in the SRofB.

**Market:** In recent years, the natural gas market has undergone significant transformations in Brazil through Federal Government initiatives to improve the business environment and promote a smooth transition from a market dominated by a single agent to one with greater liquidity (COMPAGAS, 2020). In the SRofB, the average daily consumption of natural gas for 2020 was 5.37 million m<sup>3</sup>/day, representing around 9.1% of the total national demand, an increase of almost 15% in five years (MME, 2020b).

Most of the natural gas that supplies the SRofB comes from Bolivia (MME, 2020b), which reaches distributors through GASBOL, the Bolivia-Brazil gas pipeline (MOUTINHO DOS SANTOS et al., 2020). Its price to final consumers depends on exchange rate variation as it is an imported gas (BNDES, 2013). Despite this, the average price in SRofB was around US\$ 10.43/MMBtu in 2020, while the national average was around US\$ 11.47/MMBtu for industrial consumers (MME, 2020b). In the United States, the price of natural gas for industrial consumers is around US\$ 2.90/MMBtu (ANDRADE et al., 2021a). In Argentina, a producer of shale gas and Brazil's neighbor, the price of natural gas for the final consumer was set by the Argentine government at US\$ 4.00/MMBtu for 2019 (EPE, 2020).

Table 1 summarizes the primary information presented in this section as a SWOT matrix, with the attribution of strengths, weaknesses, opportunities, and threats for shale gas in Southern Brazil.

Tabela 1 – SWOT matrix for shale gas in the SRofB

Internal Factors	Resources		Technology	
	Strengths	Weaknesses	Strengths	Weaknesses
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Large reserves in PR.</li> <li>- Existence of conventional oil and gas exploration.</li> <li>- Robust geological data.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non-renewable resources.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relatively consolidated technology in the sector.</li> <li>- Competent Brazilian technicians and engineers.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risks of negative environmental and social impacts associated with the technique.</li> <li>- Large water consumption</li> </ul>
External Factors	Policy		Market	
	Opportunities	Threats	Opportunities	Threats
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stimulus from the federal government in the creation of a regulatory framework.</li> <li>- Federal government encouragement to develop hydraulic fracturing technology.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prohibition by the government of PR on the use of the hydraulic fracturing technique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Increase the supply of natural gas, boosting the industry's competitiveness.</li> <li>- Reduce the region's dependence on foreign natural gas.</li> <li>- Low intermittency of natural gas production</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limited distribution infrastructure.</li> </ul>

### 3.2 Coalbed Methane

**Resources:** The principal Brazilian sedimentary succession bearing coal occurs in the Rio Bonito Formation in the PSB, mainly in RS and SC (KALKREUTH et al., 2008). The coal layers present in the Rio Bonito Formation act as methane generating rocks and natural gas reservoirs due to their microporosity (LEVANDOWSKI, 2013).

Coalbed methane can be found in two main deposits of the Rio Bonito Formation: the carboniferous areas of Santa Terezinha and Chico Lomã, both located in the northeast region of RS (EPE, 2019). Figure 3 (adapted from EPE, 2019) shows the region comprising the coalbed methane reserves in the PSB. Both areas present high-methane gas content (above 94%) and has an estimated potential of 5.48 billion m<sup>3</sup> (KALKREUTH et al., 2008) and 1.32 billion m<sup>3</sup> (LEVANDOWSKI, 2013), respectively. However, the research carried out in the region still has little representation, and data are still scarce to reach any more assertive conclusion regarding the potential volume of the reserve (EPE, 2018).

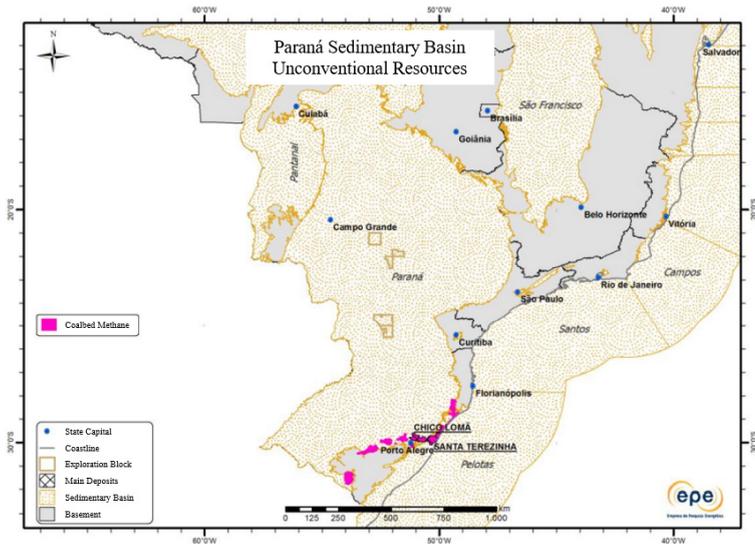


Figure 3 - Coalbed Methane resources in the PSB adapted from EPE (2019)

**Technology:** Technologies for the exploration of methane gas in coal deposits are used according to the particular characteristics of

each area, which can be: (i) virgin deposits, still unexplored, (ii) active mines, where mining activities are still present and (iii) abandoned mines, where coals have not yet been mined but have already suffered some disturbance (EPE, 2018). In addition, the drainage of natural gas present in virgin deposits is a recommended practice by the mining industry before coal exploration activities. The prior extraction of natural gas, mainly methane and carbon dioxide gases, has as main objectives the reduction of the mine's explosive potential after the start of mining activities and the elimination of future accumulations of these gases in concentrations above a prescribed maximum limit by the industry (BLACK, 2011).

The industry can use several methods to carry out the drainage of natural gas in virgin coal deposits, considering both exclusive explorations for the energy use of the gas and drainages for future mineral exploration. Such methods are excavating vertical wells, Under-Reamed Vertical Borehole, Cavitated Vertical Borehole, and hydraulic fracturing with horizontal excavation for situations where the mineral has low permeability (LOFTIN, 2009). The conditions and particularities of each reserve will determine the most suitable method for extracting the gas contained in coal (JOHNSON et al., 2006).

Regarding the environmental impacts of the methods above, the risks are similar to the exploration of underground resources onshore through the excavation of wells: contamination of the water table, rivers, and surrounding soil by the leakage of fluids in exploration operations, land deformation, pollution noise and negative impact on the local landscape (ULIASZ-MISIAK et al., 2020). On the other hand, the coal layers of the Rio Bonito Formation in the PSB are an area of great potential for carbon capture and storage (ROCKETT et al., 2011), given the greater affinity that coal has with carbon dioxide than with methane (LOFTIN, 2009).

In active mines, methane from coal is extracted through a ventilation system during mining activities (EPE, 2018). Given the increasingly frequent inclusion of these ventilation systems in the costs of the mining process by the industry, aiming to achieve better safety for the site (LIU et al., 1998), the gases captured in the outputs of these systems could be used for energy purposes, after filtering. Thus, in addition to attributing an extra economic value to coal mining activities, filtering the gases emitted would reduce the environmental impact of fugitive emissions of greenhouse gases (EPE, 2018). A similar extraction process in abandoned mines, where underground or surface-installed pumps suck the coal methane, is also possible (EPE, 2018).

Policy: No federal resolution explicitly addresses the exploration of methane gas associated with coal in Brazil. Since coal is a mineral, all its mining activity is covered by Decree-Law No. 227/1967, establishing the Mining Code. Thus, all exploration research on coal reserves must be accompanied by the National Department of Mineral Production (DNPM) (BRAZIL, 1967). Regarding the exploration of methane gas in virgin coal deposits, the activities will be subject to the definitions of the Petroleum Law from 1997, which provides the national energy policy and establishes the guidelines for specific programs for the use of resources available in the country's energy matrix, including coal and its derivatives (BRAZIL, 1997). Currently, the second paragraph of Article 23 of the Petroleum Law gives ANP the power to grant the concession for coalbed methane exploitation to holders of mining rights or authorization to research coal deposits in Brazil (BRAZIL, 1997).

RS holds around 88% of the national coal reserves (GOMES et al., 1998) and created, in 2017, the State Policy on Mineral Coal, establishing the Carbochemical Pole of RS. With this initiative, RS aims to reduce external dependence on inputs for industries and promote sustainable economic development based on the state's coal. In addition, the institution of the Carbochemical Pole intends to use mineral coal in the production of energy and synthesis gas, providing final sustainable disposal of waste generated in the processes (RIO GRANDE DO SUL, 2017). However, there is no direct mention of coalbed methane exploitation in this state policy.

Market: Brazil, unlike countries such as the United States, Canada, Russia, China, India, and Australia, for example, still does not have an established industry for the use of coalbed methane (ANDRADE et al., 2021b). The various uses for coalbed methane are related to the type of deposit from which the gas was extracted. For example, in virgin deposits, it is possible to use methane as a substitute for natural gas (either in the form of LNG or by direct injection into the grid) or use it to generate electricity on-site (EPE, 2018). In active mines, since gases must be vented out of the workplace for safety reasons, the use of methane could generate both a reduction in the mine's operating costs if used for the maintenance of the mine or extra income if filtered and sold to other consumers (EPE, 2018).

Table 2 summarizes the primary information presented in this section as a SWOT matrix, with the attribution of strengths, weaknesses, opportunities, and threats for coal bed methane in Southern Brazil.

Table 2 - SWOT Matrix for coalbed methane in the SRofB

	Resources		Technology	
	Strengths	Weaknesses	Strengths	Weaknesses
Internal Factors	- Large resources in the northeast of RS.	- Scarce and unrepresentative geological data compared to other resources.	- Relatively consolidated technology in the sector. - Competent Brazilian technicians and engineers. - Increased safety and benefit from methane gas in active mines. - Potential for CO <sub>2</sub> capture and storage.	- Risks of adverse environmental impacts associated with extraction techniques in virgin deposits.
	Policy		Market	
	Opportunities	Threats	Opportunities	Threats
External Factors	- Petroleum Law authorizes exploration of coalbed methane for holders of mining or exploration rights. - Interest of RS in resource development.	- Absence of a specific regulation on coalbed methane resources in Brazil.	- Increase the supply of natural gas, boosting the industry's competitiveness. - Reduce the region's dependence on foreign natural gas. - Possibility of carbon capture and storage.	- Limited distribution infrastructure.

## 4. RENEWABLE GAS SOURCES FROM AGRICULTURAL ACTIVITIES

Agribusiness in Brazil is one of the most relevant sectors in the share of the national GDP, representing around 26.6% of the Brazilian GDP in 2020 (CEPEA/CNA, 2021). The country is the leading producer worldwide of soy, sugar cane, coffee, orange, and other agricultural products (FAO, 2019). Brazilian livestock also occupies a prominent position worldwide, being the largest beef exporter, exporting about a quarter of its production (ABIEC, 2020). In addition, Brazil is the third and fourth-largest producer of broiler chicken and pork, respectively (EMBRAPA, 2019).

### 4.1 Biomethane from swine effluents

Resources: SRofB has the highest concentration of swine production in the country, representing 66.0% of the national output in 2019, with an increase of approximately 159.5% in the last 20 years (EMBRAPA, 2020). In international trade, SC contributed 55.5% of all

Brazilian pork exports in 2019, followed by PR and RS, respectively, with 22.9% and 15.8% of national pork exports in the period (EMBRAPA, 2019).

The herd of swine in the SRofB was approximately 20 million heads in 2019, representing about 49.5% of the national total (IBGE, 2020b). Figure 4 (adapted from BIOGÁS BRASIL, 2019) shows the regions with potential for generating biogas in southern Brazil through swine farming.

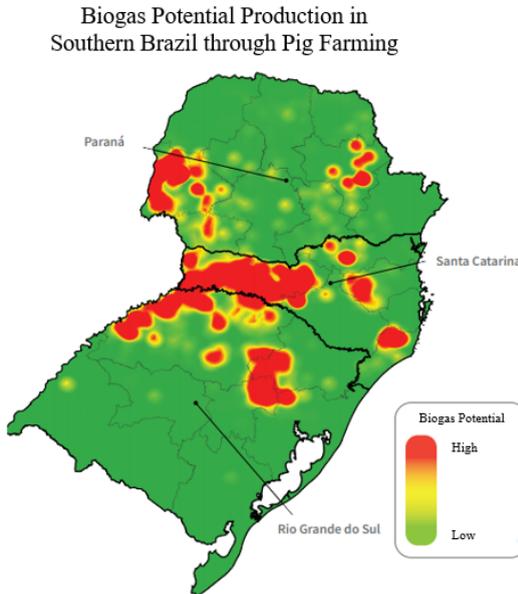


Figure 4 - Biogas Potential Production in SRofB through pig farming adapted from Biogás Brasil (2019)

Considering that the average daily production of manure is around 2.35 kg/animal (OLIVEIRA, 1993), the estimated annual production in the region was approximately 17.1 million tonnes in 2019. One ton of swine manure can generate between 33 to 39 m<sup>3</sup> of methane gas (PROBIOGÁS, 2015). Thus, assuming the transformation of all swine manure from the SRofB in 2019 into methane gas, the generation potential would be between 566.1 million m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/year to 669.0 million m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/year.

Technology: There is currently a wide variety of technologies available for energy generation using biomass as an input, either a

thermochemical or a biochemical process (IRENA, 2012). To manage livestock effluents, anaerobic biodigesters are widely used due to their efficiency in generating biogas, biomethane, and electricity; or generating biofertilizers demanded by the agricultural industry (PEREIRA et al., 2009). There are currently 152 biodigesters operating in SRofB, considering that around 94.7% are small plants, with a maximum production of 1.00 million Nm<sup>3</sup>/year. PR, SC, and RS produced 17.8% of the total national volume (CIBIOGÁS, 2020).

The anaerobic digester most used in Brazil is the covered lagoon model, also known as the Canadian model (ANDRADE, 2018). This type of biodigester consists of a waste (substrate) entrance, an underground fermentation chamber, an upper blanket (to retain the biogas), an exit for the digestate (and biofertilizer after treatments), and a stopcock for the exit of biogas. This type of biodigester can directly receive sunlight, increase the effluent fermentation temperature, and improve efficiency (PEREIRA et al., 2009). However, covered lagoon biodigesters lack technological devices, not allowing accurate control of the fermentation temperature and other essential aspects of the process. Due to high annual thermal variations in the SRofB, there are inconsistencies in biogas production (PEREIRA et al., 2009).

The use of biodigesters to treat swine effluents is a valuable solution for reducing the environmental impacts generated by the industry, promoting proper ecological sanitation, and avoiding methane emissions directly into the atmosphere (FERNANDES, 2012).

Policy: In Brazil, biomethane specifications are regulated by the ANP, by Resolutions No. 8/2015, No. 685/2017, and, later, by No. 858/2020. ANP Resolution No. 8/2015 establishes the specifications of biomethane from agroforestry and commercial organic waste intended for vehicular use, residential, and commercial installations in Brazil. Biomethane is thus defined as a gaseous biofuel derived from biogas purification. This Resolution also stipulates the rules for usage and quality control of biomethane production throughout the national territory (ANP, 2015). ANP Resolution No. 685 establishes the rules for approving the quality control of biomethane from landfills and sewage treatment plants intended for vehicular use, residential, industrial, and commercial facilities throughout the national territory, updating the ANP Resolution No. 8/2015. This Resolution waives the obligations of quality control of biomethane for electricity generation purposes (ANP, 2017). ANP Resolution No. 828/2020, which provides the necessary information in the quality control documents and data submission to the ANP, updates the previous Resolutions (ANP, 2020).

In 2017, Law No. 13.576/2017 instituted the National Biofuels Policy (RenovaBio). This policy aims to contribute to the Paris Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate

Change, promoting an adequate production of biofuels and increasing their participation in the Brazilian energy matrix, aiming to reduce greenhouse gas emissions (BRAZIL, 2017). In general, *RenovaBio*'s principle is to encourage technological development and innovation through the following devices: Decarbonisation Credits, certification of biofuels, compulsory additions of biofuels to fossil fuels, and tax, financial and credit incentives (DELGADO et al., 2017).

At the state level, the three southern states have their own regulations. PR has Law No. 19.500/2018 that created the State Biogas and Biomethane Policy, in which the public authorities promote the production and consumption of biogas and biomethane by establishing rules and encouraging production chains to decompose organic matter. According to the state Secretary for the Environment at that time, the objective of the law was to provide legal certainty for entrepreneurs who wished to invest in the sector and develop it through renewable energy (PARANÁ, 2018).

SC instituted the State Biogas Policy (Law No. 17.542/2018) to protect the environment by minimizing the impacts of animal protein production in the state. SC also encourages biodigestion of animal, urban and industrial waste (SANTA CATARINA, 2018). RS instituted the State Biomethane Policy in 2016 (Law No. 14.864/2016) to promote research and development of biomethane, attracting investments for infrastructure and proper disposal of organic waste (RIO GRANDE DO SUL, 2016).

Market: Biogas can generate electricity, thermal energy, or biomethane (PROBIOGÁS, 2016). When meeting the specifications established by ANP Technical Regulation No. 1/2015, biomethane may be mixed with natural gas (ANP, 2015), both sources competing for the same consumer market. Hence, biomethane can be sold in compressed gas or directly injected into the natural gas grid (DELGADO et al., 2017). Thus, as the region is dependent on Bolivian natural gas (MME, 2020a), the increase in the supply of biomethane in the market could reduce this dependence and increase the competitiveness of the industry as a whole through a more attractive final price.

The electricity produced from biogas can be monetized both in its commercialization in captive markets (by public auctions) and free markets or in distributed generation, where the energy will be consumed in the same place where it is generated (DELGADO et al., 2017). From the swine farmer's point of view, even if the initial generation of electricity from biogas is not on a large enough scale for commercialization, it is possible to use it for the internal supply of the property/company, reducing costs with energy. The same logic is valid for the generation of thermal energy (FERNANDES and MARIANI, 2019).

SRofB is currently inserted in a favorable regulatory environ-

ment for biogas in the region, from national initiatives, such as the RenovaBio program, to specific state policies related to the biogas chain, promoting greater legal certainty for entrepreneurs in the sector. On the other hand, the stakeholders perceive the need for a sector union to attract more investment in the biogas industry (SEBRAERS, 2018). Difficulty in accessing technical, commercial, and legal information and the uncertain relationship between cost and commercial benefit of projects are some of the barriers to developing a more competitive biogas market in Brazil (PROBIOGÁS, 2016).

Table 3 summarizes the primary information presented in this section as a SWOT matrix, with the attribution of strengths, weaknesses, opportunities, and threats for biogas from swine effluents e in Southern Brazil.

Table 3 - SWOT Matrix for Biogas from Swine Effluents in the SRofB

	Resources		Technology	
	Strengths	Weaknesses	Strengths	Weaknesses
Internal Factors	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Renewable resources</li> <li>- Expressive herd of swine.</li> <li>- The most significant potential for biomethane generation in the country (from swine production).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generation potential is not as significant as non-renewable sources.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relatively consolidated technologies in the sector.</li> <li>- Flexibility in the use of anaerobic digestion final products.</li> <li>- Promotes environmental protection.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lack of technological devices to contain the intermittence of biogas.</li> </ul>
	Policy		Market	
	Opportunities	Threats	Opportunities	Threats
External Factors	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alignment of the federal and state governments in stimulating the generation of biogas.</li> <li>- Positive regulatory environment.</li> <li>- Pioneering of the region in creating policies to stimulate biogas and biomethane production.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No threats regarding policy were identified.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibility use of products generated after the anaerobic digestion.</li> <li>- Strong commitment in the region to develop the market.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intermittence of biogas production depending on the seasons of the year.</li> <li>- Lack of an industry union to attract more investments.</li> <li>- Competition with other uses for biogas</li> </ul>

## 5. DISCUSSION

This work has compared three potential gaseous energy resources with high methane concentrations in the SRofB. Even though some sources may seem more promising than others, it is essential to note the diversity of unconventional energy alternatives available in

SRofB, fossil and renewable. We evaluate the effects that the new gas law No. 14.134/2021 could contribute to the downstream gas sector, allowing new entrants to the existing infrastructure.

Table 4 shows a summary of the potential production volume of each resource. Among the three gaseous energy sources analyzed in this work, the shale gas present in the Ponta Grossa formation of the PSB was the most considerable amount of available resources in the short and medium-term, followed by coalbed methane from the Rio Bonito formation. Biomethane from swine substrate has a smaller annual production potential, but it is a renewable source.

Table 4 - Methane gas production potential in southern Brazil by resources

Resource	States with greater potential	Methane gas volume (in millions of m <sup>3</sup> )	Reference
Shale gas – Ponta Grossa Formation	PR	2,270,000.00	EIA (2015b)
Coalbed Methane – Rio Bonito Formation	SC, RS	6,800.00	Kalkreuth et al. (2008), Levandowski (2013)
Biogas from swine effluents (Renewable source, annual value)	PR, SC, RS	566.10	Oliveira (1993), Probiogás (2015)

The hydraulic fracturing technique for extracting shale gas and, in some cases, coalbed methane has been on the market for a long time. However, its usage is associated with some environmental impacts, which were highly relevant and directly affected the public perception of PR. The public and private sectors' encouragement of research and development could minimize these impacts and improve the technique currently used, enabling a reassessment of the restrictions imposed on fracking.

Biogas generation by swine effluents showed great potential in southern Brazil due to the vast technological knowledge regarding biogas digesters that use animal production waste as substrate and the large pork production in the region. Furthermore, compared to the hydraulic fracturing technique, anaerobic digestion is viewed by the public as a solution to the environmental liabilities which directly affect their opinion.

The insertion of all three gaseous energy sources studied in this work in the natural gas market of the SRofB could significantly contribute to the development of the regional market. Incentive policies might increase price competitiveness, decrease dependence on foreign

natural gas and improve the productivity of the local industry. However, investments in infrastructure for natural gas distribution are essential for more significant ramifications and the efficiency of southern gas pipelines.

## **6. CONCLUSION**

We concluded that the technology used to explore the energy resources would directly influence policy and market issues, being a determining factor for the viability of each energy source. Public and private investments in research and development are essential for deploying new methods for risks mitigation to technologies with high risks of environmental impacts. The inclusion of the local community in the public debate will be crucial to avoid future legal problems, clarify any doubts and insecurities from residents, and create greater legal comfort for the investors. Specific regulation should provide each energy source with a more transparent and objective consolidation of the federal government and state competence. This definition would bring better stability, confidence, and predictability to the market.

## **7. ACKNOWLEDGMENTS**

We are grateful for the support of Gasbras Project Finep R&D Network 01.14.0215.00 through research grants. We are thankful for the support of the RCGI – Research Center for Gas Innovation, located at the University of São Paulo (USP) and funded by FAPESP – Foundation for Research Support of the State of São Paulo (2014/50279-4), Shell Brasil, and the strategic support given by the ANP (National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels) through regulatory incentives associated with the investment of resources arising from the Research, Development and Innovation Clauses. We are grateful for the financial support of the Human Resources Program of the National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels - PRH-ANP, supported by resources from the investment of oil companies in the R, D&I Clause of ANP Resolution No. 50/2015 (PRH 33.1 - Referring to BID NOTICE N°1/2018/PRH-ANP; FINEP/FUSP/USP Agreement Ref. 0443/19).

Rafael Sacco and Patrícia Matai acknowledge the National Council for the Development of Science and Technology (Reference Number: 380247/2021-6 and 380734/2021-4, respectively).

## REFERENCES

ABEGAS (2021). Concessionárias. Available at <<https://www.abegas.org.br/concessionarias>> (Accessed 29 May 2021).

ABIEC (2020). Perfil da Pecuária no Brasil. Available at <<http://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2020/#:~:text=Este%20Relat%C3%B3rio%20Anual%20tem%20como,cadeia%20da%20carne%20no%20Brasil>> (Accessed 29 May 2021).

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DO PARANÁ (2019). Paraná diz não ao uso do fracking na exploração do gás de xisto [Online]. Available at <<http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=102924&tit=Parana-diz-nao-ao-uso-do-fracking-na-exploracao-do-gas-de-xisto>> (Accessed 23 April 2021).

ANP (2010). Nota Técnica nº 09/2010-SCM – Gás natural não-convençional. Available at <<http://www.anp.gov.br/images/movimentacao-estocagem-comercializacao/transporte-gas-natural/estudos-notas-tecnicas/nota-tecnica-09-2010.pdf>> (Accessed 30 July 2021).

ANP (2013). 12ª Rodada de Licitações. Available at <<http://rodadas.anp.gov.br/pt/12-rodada-de-licitacao-de-blocos>> (Accessed 9 March 2021).

ANP (2015). Resolução nº 8. Available at <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-8-de-30-de-janeiro-de-2015-32367532>> (Accessed 12 April 2021).

ANP (2017). Resolução nº 685. Available at <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-685-2017-estabelece-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-e-a-especificacao-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes>> (Accessed 12 April 2021).

ANP (2020). Resolução nº 828, 2020. Available at <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-828-2020-dispoe-sobre-as-informacoes-constantes-dos-documentos-da-qualidade-e-o-envio-dos-dados-da-qualidade-dos-combustiveis-produzidos-no-territorio-nacional-ou-importados-e-da-outras-providencias?origin=insti>> (Accessed 12 April 2021).

ANDRADE, M. P. (2018). Eficiência de Biodigestores Canadenses no Tratamento de Dejetos de Suínos em Diferentes Fases de Produção [Master's Thesis, Universidade Federal de Lavras]. Available at <[http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/28923/1/DISSERTA%20c3%87%-c3%83O\\_Efici%20ancia%20de%20biodigestores%20canadenses%20no%20tratamento%20de%20dejetos%20de%20su%20adnos....pdf](http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/28923/1/DISSERTA%20c3%87%-c3%83O_Efici%20ancia%20de%20biodigestores%20canadenses%20no%20tratamento%20de%20dejetos%20de%20su%20adnos....pdf)> (Accessed 30 July 2021).

ANDRADE, B.; SCHNEIEDER, D.; PEREIRA, E.; DELGADO, F.; ANDRADE, I.; SIMOES, J.; LEMOS, V. (2021a). O desenvolvimento da exploração de recursos não-convencionais no Brasil: novas óticas de desenvolvimento regional. Chapter 5: Perspectivas socioeconômicas para o Brasil, p. 183-204 [Online]. Available at <[https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/30198/caderno\\_desenvolvimento\\_da\\_exploracao\\_de\\_recursos\\_nao-convencionais\\_no\\_brasil.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/30198/caderno_desenvolvimento_da_exploracao_de_recursos_nao-convencionais_no_brasil.pdf?sequence=1&isAllowed=y)> (Accessed 2 August 2021).

ANDRADE, B.; SCHNEIEDER, D.; PEREIRA, E.; DELGADO, F.; ANDRADE, I.; SIMOES, J.; LEMOS, V. (2021b). O desenvolvimento da exploração de recursos não-convencionais no Brasil: novas óticas de desenvolvimento regional. Chapter 2: Caracterização de Recursos não Convencionais no Brasil, p. 17-43 [Online]. Available at <[https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/30198/caderno\\_desenvolvimento\\_da\\_exploracao\\_de\\_recursos\\_nao-convencionais\\_no\\_brasil.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/30198/caderno_desenvolvimento_da_exploracao_de_recursos_nao-convencionais_no_brasil.pdf?sequence=1&isAllowed=y)> (Accessed 2 August 2021).

ARAÚJO, R. R. (2016). Aspectos regulatórios e institucionais do desenvolvimento de gás não convencional: uma análise comparativa entre Brasil e Estados Unidos [Doctoral Dissertation, Universidade de São Paulo]. Available at <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-15092016-115205/publico/renataaraujo.pdf>> (Accessed 30 July 2021).

BIOGÁS BRASIL (2019). Potencial de produção de biogás no Sul do Brasil, Foz do Iguaçu, Brazil. Available at <<https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-04/Potencial%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20biog%C3%A1s%20no%20Sul%20do%20Brasil.pdf>> (Accessed 23 April 2021).

BLACK, D. J. (2011). Factors affecting the drainage of gas from coal and methods to improve drainage effectiveness [Doctor of Philosophy thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong]. Available at <<https://ro.uow.edu.au/cgi/view-content.cgi?referer=https://scholar.google.com.br/&httpsredir=1&article=4339&context=theses>> (Accessed 30 July 2021).

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES (2013). Gás não convencional: experiência americana e perspectivas para o mercado brasileiro. Available at <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1508/2/A%20mar37\\_02\\_G%-c3%a1s%20n%c3%a3o%20convencional%20experi%c3%aancia%20americana.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1508/2/A%20mar37_02_G%-c3%a1s%20n%c3%a3o%20convencional%20experi%c3%aancia%20americana.pdf)> (Accessed 23 April 2021).

BRAZIL (1967). Decree-law No. 227/1967. Dá nova redação ao Decreto-lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940. (Código de Minas). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 February 1967.

BRAZIL (1997). Law No. 9.478/1997. 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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 August 1997.

BRAZIL (2017). Law No. 13.576/2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 December 2017.

BRAZIL (2021). Law No. 14.134/2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição Federal, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 April 2021.

CARBONE-NETO, J.; SÁ, P. S.; BRITO, T. L. F.; COSTA, H. K. de M.; MOUTINHO DOS SANTOS, E. (2021). Análise SWOT Aplicada ao Gás Não Convencional no Brasil. Evex, 2021.

CEPEA/CNA (2021). Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) - ESALQ/USP; Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). PIB do Agronegócio. Available at <[https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/sut.pib\\_dez\\_2020.9mar2021.pdf](https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/sut.pib_dez_2020.9mar2021.pdf)> (Accessed 29 May 2021).

CIBIOGÁS (2020). Nota Técnica: N° 002/2020 – Panorama do Biogás no Brasil em 2019. Foz do Iguaçu, April 2020. Available at <<https://biblioteca.cibioogas.org/biblioteca/notatecnica/pdf/panorama-do-biogas-no-brasil-em-2019.pdf>> (Accessed 2 August 2021).

COMPAGAS (2020). Relatório Integrado da Administração 2019. Available at <[http://compagas.com.br/images/pdf/demo-finan/Relatorio\\_Integrado\\_da\\_Administracao\\_2019\\_V21.pdf](http://compagas.com.br/images/pdf/demo-finan/Relatorio_Integrado_da_Administracao_2019_V21.pdf)> (Accessed 29 May 2021).

CRONSHAW, I.; GRAFTON, R. Q. (2016). Economic benefits, external costs and the regulation of unconventional gas in the United States. *Energy Policy*, v. 98, p. 180–186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.08.016>.

CTMA (2016). Aproveitamento de hidrocarbonetos em reservatórios não convencionais no Brasil: Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural. Brasília: CTMA/PROMINP – Projeto MA 09, 2016, Comitê Temático do Meio Ambiente. Available at <<http://www.anp.gov.br/images/central-de-conteudo/notas-estudos-tecnicos/estudos-tecnicos/aproveitamento-hidrocarboneto-reserva-2016.pdf>> (Accessed 22 April 2021).

DELGADO, F.; EVANGELISTA, M.; ROITMAN, T. (2017). Biofuels. Cadernos FGV Energia [Online]. Available at <[https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/book\\_caderno\\_biocombustivel\\_ingles\\_v2.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/book_caderno_biocombustivel_ingles_v2.pdf)> (Accessed 3 August 2021).

DYSON, R. G. (2004). Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick. *European Journal of Operational Research*, v. 152, doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00062-6).

EIA (2013). Technically recoverable shale oil and shale gas resources: an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States. Energy Information Administration – US Department of Energy.

EIA (2015a). Technically recoverable shale oil and shale gas resources: Argentina. Energy Information Administration – US Department of Energy.

EIA (2015b). Technically recoverable shale oil and shale gas resources: Brazil. Energy Information Administration – US Department of Energy.

EMBRAPA (2019). Suínos e aves, 2019. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Available at <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas>> (Accessed 1 April 2021).

EMBRAPA (2020). Mapas e Infográficos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Available at <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/mapas>> (Accessed 1 April 2021).

EPBR (2019). Conheça o projeto Poço Transparente. Available at <<https://epbr.com.br/conheca-o-projeto-poco-transparente/>> (Accessed 29 May 2021).

EPE (2018). Estudo Regional da Porção Gaúcha da Bacia do Paraná: Parte 2 - Análise sobre o potencial de metano de carvão. Available at <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-273/Estudo%20Regional%20da%20Por%20C3%A7%C3%A3o%20Gaucha%20da%20Bacia%20do%20Paran%C3%A1\\_PARTE%20\\_2018.09.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-273/Estudo%20Regional%20da%20Por%20C3%A7%C3%A3o%20Gaucha%20da%20Bacia%20do%20Paran%C3%A1_PARTE%20_2018.09.pdf)> (Accessed 3 August 2021).

EPE (2019). Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás 2019. Available at <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-435/EPE\\_DPG\\_ZNMT\\_2017-2019\\_18dez2019.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-435/EPE_DPG_ZNMT_2017-2019_18dez2019.pdf)> (Accessed 3 August 2021).

EPE (2020). Nota Técnica - A Indústria de Gás Natural na Argentina: Panorama, perspectivas e oportunidades para o Brasil. Available at <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-492/Nota%20Tecnica%20A%20Industria%20Gas%20Natural%20na%20Argentina\\_Panorama%20perspectivas%20e%20oportunidades%20para%20o%20Brasil\\_DPG\\_SPG.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-492/Nota%20Tecnica%20A%20Industria%20Gas%20Natural%20na%20Argentina_Panorama%20perspectivas%20e%20oportunidades%20para%20o%20Brasil_DPG_SPG.pdf)> (Accessed 29 May 2021).

FAO (2019). FAOSTAT database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL>> (Accessed 29 May 2021).

FERNANDES, D. M. (2012). Biomass And Biogas Pig Farming [Master's Thesis, Universidade Estadual do Oeste do Paraná]. Available at <<http://tede.unioeste.br/handle/tede/821>> (Accessed 3 August 2021).

FERNANDES, G.; MARIANI, L. (2019). O alto potencial de produção e uso fará do biogás a próxima fronteira da energia renovável no Brasil?. Caderno Opinião. FGV Energia. Available at <<https://fgvenergia.fgv.br/opiniones/o-alto-potencial-de-producao-e-uso-fara-do-biogas-proxima-fronteira-da-energia-renovavel-no>> (Accessed 23 April 2021).

FERTEL, C.; BAHN, O.; VAILLANCOURT, K.; WAAUB, J. P. (2013). Canadian energy and climate policies: A SWOT analysis in search of federal/provincial coherence. Energy Policy, v. 63, p. 1139–1150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.057>.

FGV (2014). Gás Natural. Cadernos FGV Energia [Online]. Available at <[https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno\\_fgv\\_energia\\_-\\_gas\\_natural\\_ok\\_19\\_11\\_14\\_0.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_fgv_energia_-_gas_natural_ok_19_11_14_0.pdf)> (Accessed 3 August 2021).

GOMES, A. P.; FERREIRA, J. A. F.; ALBUQUERQUE L. F.; SÜFFERT, T. (1998). Carvão fóssil. Estudos avançados, v. 12, n. 33, p. 89-106, doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-40141998000200006>.

GOMES, M. J. (2011). Estudo do mercado brasileiro de gás natural contextualizado ao Shale Gás [Diploma Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Available at <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38375/000823873.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> (Accessed 3 August 2021).

GOMES, I. (2014). Brazil: Country of the future or has its time come for natural gas?. The Oxford Institute for Energy Studies. University of Oxford [Online]. Available at <<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2014/07/NG-88.pdf>> (Accessed 3 August 2021).

GÜREL, E.; TAT, M. (2017). Swot Analysis: A Theoretical Review. Journal of International Social Research, Vol. 10 Issue 51, p994-1006. 13p.

HOLDITCH, S. A. (2013). Unconventional oil and gas resource development—Let's do it right. Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, v. 1, p. 2-8, doi: <https://doi.org/10.1016/j.juogr.2013.05.001>.

IBGE (2020a). Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. Available at <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>> (Accessed 28 July 2021).

IBGE (2020b). Produção da Pecuária Municipal. Available at <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm\\_2019\\_v47\\_br\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2019_v47_br_informativo.pdf)> (Accessed 04 August 2021).

IBGE (2021a). Área territorial brasileira 2020. Available at <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>> (Accessed 28 July 2021).

IRENA (2012). Biomass for Power Generation. Irena Working Paper; Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Available at <<https://www.irena.org/publications/2012/Jun/Renewable-Energy-Cost-Analysis---Biomass-for-Power-Generation>> (Accessed 29 May 2021).

JENNER, S.; LAMADRID, A. J. (2013). Shale gas vs. coal: Policy implications from environmental impact comparisons of shale gas, conventional gas, and coal on air, water, and land in the United States. Energy Policy, v. 53, p. 442-453, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.010>.

JOHNSON, R. L.; SCOTT, S.; HERRINGTON, M. R. (2006). Changes in completion strategy unlocks massive jurassic coalbed methane resource—the wallon subgroup, Surat Basin, Australia. In SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. OnePetro, doi: <https://doi.org/10.2118/101109-MS>.

JUSBRASIL (2014). Tribunal Regional Federal da 4ª Região TRF-4. Available at <<https://trf-4.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/136091871/agravo-de-instrumento-ag-50209994620144040000-5020999-4620144040000>> (Accessed 29 May 2021).

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; CASAGRANDE, J.; CRUZ, R.; OLIVEIRA, T.; KERN, M., LEVANDOWSKI, J.; ROLIM, S. (2008). O Potencial de Coalbed Methane (CBM) na jazida da Santa Terezinha-modelagem 3D e avaliação do poço de exploração CBM001-ST-RS. Revista Brasileira de Geociências, 38(2 suppl), 3-17.

KUTCHEROV, V.; MORGUNOVA, M.; BESSEL, V.; LOPATIN, A. (2020). Russian natural gas exports: An analysis of challenges and opportunities. *Energy Strategy Reviews*, v. 30, p. 100511, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100511>.

LENHARD, L. G.; ANDERSEN, S. M.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. (2018). Energy-environmental implications of shale gas exploration in Paraná hydrological basin, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 90, p. 56-69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.042>.

LEVANDOWSKI, J. H. (2013). Características petrográficas e geoquímicas das camadas de carvão do poço CBM 001-CL-RS, jazida Chico Lomã, e sua relação com o coalbed methane associado [Doctoral Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Available at <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75653/000891721.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> (Accessed 4 August 2021).

LIU, Y.; DUNN, P.; HATHERLY, P. (1998). In-seam drilling technologies for underground coal mines, Australia.

LOFTIN, P. (2009). Thirty years of lessons learned—Tips and tricks for finding, developing and operating a coalbed methane field. In: Proc 24th World Gas Conference 'The Global Energy Challenge: Reviewing the Strategies for Natural Gas. p. 5-9..

MME (2020a). O Novo Mercado de Gás. Available at <<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/conselhos-e-comites/cmgn/novo-mercado-de-gas>> (Accessed 29 May 2021).

MME (2020b). Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural - Dezembro, 2020, p. 38. Available at <<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/>> (Accessed 23 April 2021).

MME (2020c). Reate 2020. Available at <<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/reate-2020>> (Accessed 29 May 2021).

MOUTINHO DOS SANTOS, E. M.; PEYERL, D.; Netto, A. L. A. (2020). Oportunidades e Desafios do Gás Natural e do Gás Natural Liquefeito no Brasil [Online]. Available at <<http://www.brainmarket.com.br/wp-content/uploads/2021/02/Oportunidades-e-Desafios-do-Gas-Natural.pdf>> (Accessed 4 August 2021).

OLIVEIRA, P. A. V. (1993). Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos. Embrapa Suínos e Aves-Documents, 27 (INFOTECA-E).

PARANÁ (2018). Law No. 19.500/2018. Dispõe sobre a Política Estadual do Biogás e Biometano e adota outras providências. Diário Oficial n.º 10194, 22 May 2018. Curitiba, 21 May 2018.

PEREIRA, E. R.; DE ABREU DEMARCHI, J. J. A.; BUDIÑO, F. E. L. (2009). BIODIGESTORES –Tecnologia para o manejo de efluentes da pecuária.

PROBIOGÁS (2015). Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Oliver Jende ... [et al.]. Brasília, DF : Ministério das Cidades. Available at <<http://protegeer.gov.br/images/documents/394/Tecnologias%20de%20digest%C3%A3o%20anaer%C3%B3bia%20para%20o%20Brasil.pdf> > (Accessed 5 August 2021).

PROBIOGÁS (2016). Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil/ Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; authors, Oliver Jende ... [et al.]. Available at <[https://www.giz.de/en/downloads/giz\\_barreiras\\_digital\\_simples.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/giz_barreiras_digital_simples.pdf)> (Accessed 23 April 2021).

RIO GRANDE DO SUL (2016). Law No. 14.864/2016. Institui a Política Estadual do Biogás e do Biometano, o Programa Gaúcho de Incentivo à Geração e Utilização de Biogás e de Biometano - RS-GÁS -e dá outras providências. Porto Alegre, 11 May 2016.

RIO GRANDE DO SUL (2017). Law No. 15.047/2017. Cria a Política Estadual do Carvão Mineral, institui o Polo Carboquímico do Rio Grande do Sul e dá outras providências. Palácio Piratini, Porto Alegre, 29 November 2017.

ROCKETT, G. C.; MACHADO, C. X.; KETZER, J. M. M.; CENTENO, C. I. (2011). The CARBMAP project: Matching CO<sub>2</sub> sources and geological sinks in Brazil using geographic information system. Energy Procedia, 4, 2764-2771, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.179>.

SANTA CATARINA (2018). Law No. 17.542/2018. Institui a Política Estadual do Biogás e estabelece outras providências. DOE – SC, 13 July 2018. Florianópolis, 12 July 2018.

SEBRAERS (2018). Os desafios para desenvolver o biogás. Available at <<https://sebraers.com.br/energia/os-desafios-para-desenvolver-o-biogas/>> (Accessed 23 April 2021).

ULIASZ-MISIAK, B.; MISIAK, J.; LEWANDOWSKA-ŚMIERZCHALSKA, J.; MATUŁA, R. (2020). Environmental Risk Related to the Exploration and Exploitation of Coalbed Methane. *Energies* 2020, 13, 6537. <https://doi.org/10.3390/en13246537>

UN (2019). World Population Prospects, Department of Economic and Social Affairs. United Nations. Available at <<https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>> (Accessed 28 July 2021).

WAN, Z.; HUANG, T.; CRAIG, B. (2014). Barriers to the development of China's shale gas industry, *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.073.

WATERWORTH, A.; & BRADSHAW, M. J. (2018). Unconventional trade-offs? National oil companies, foreign investment and oil and gas development in Argentina and Brazil. *Energy policy*, 122, 7-16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.011>.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCELCAO, J. C. J.; APPI, V. T., NETO, E. V. S.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. (1990). The Parana Basin, Brazil: Chapter 33: Part II. Selected Analog Interior Cratonic Basins: Analog Basins.

ZOBACK, M.; KITASEI, S.; & COPITHORNE, B. (2010). Addressing the environmental risks from shale gas development: briefing paper 1. Washington, DC: Worldwatch Institute.

## **ADVOCACY E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: O CASO DO FÓRUM DE ENERGIAS RENOVÁVEIS DE RORAIMA**

André Andriw Santos da Silva<sup>1</sup>

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

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.679

### **RESUMO**

A transição energética no Brasil se diferencia de outros processos implementados em nações desenvolvidas e em desenvolvimento. Dada elevada presença de fontes renováveis nas matrizes energética e elétrica nacional, a transição aparentemente já ocorreu no país. Contudo, identificam-se na Amazônia brasileira uma forte dependência de geração elétrica com combustível fóssil que, além de ineficiente, possui um custo de operação elevado. Tal fato motivou a formação de redes de *advocacy* em prol da transição energética regional baseada em tecnologias renováveis. Assim, este trabalho questiona como a rede local de *advocacy* está comprometida com a transição energética amazônica. A hipótese do estudo é que a rede local de *advocacy* tende a adotar propostas pragmáticas de transição, caracterizadas pela adoção de tecnologias renováveis sem romper bruscamente o regime dos combustíveis fósseis. Neste sentido, o objetivo do artigo é analisar os grupos de interesse que formam a rede local de *advocacy* favorável à inserção das tecnologias renováveis na Amazônia, concentrando-se no caso do Fórum de Energias Renováveis de Roraima (FERR). Os procedimentos metodológicos adotados para atingir o objetivo foram determinados por uma análise integrativa que contou com uma revisão da literatura sobre o papel dos atores na construção do sistema específico de inovação tecnológica (SEIT) e um estudo de caso sobre a atuação do FERR na transição energética em Roraima. Para fundamentar o estudo de caso, revisou-se notícias e material audiovisual do FERR entre 2019 e abril de 2021. Após combinar o referencial teórico e o estudo de caso, o estudo concluiu que os membros do FERR preferem soluções pragmáticas, que não rompem bruscamente com o regime vigente, uma vez que a rede cumpre parcialmente as funções de um SEIT, carecendo de apoio da sociedade e da indústria para buscar propostas mais ambiciosas de transição energética junto ao governo brasileiro.

Palavras-chave: *Advocacy*; Transição Energética; Amazônia; Brasil; Roraima.

## ABSTRACT

The energy transition in Brazil differs from the processes implemented in other developed and developing nations. Given the high presence of renewable sources in the national energy and electricity matrix, the transition has apparently already taken place in the country. However, a strong dependence on fossil fuel for electrical generation is identified in the Brazilian Amazon, which, in addition to being inefficient, has a high operating cost. This motivated the formation of advocacy coalition networks in favor of the regional energy transition based on renewable technologies. Therefore, this study inquires how local advocacy networks are committed to the Amazon energy transition. The hypothesis of the study is that the local advocacy network tends to adopt pragmatic transition proposals, characterized by the adoption of renewable technologies without abruptly breaking the fossil fuel flow. In this sense, the objective of the article is to analyze the stakeholders that formed the local advocacy coalition network in favor of renewable energy sources in the Amazon, focusing on the case of Renewable Energy Forum of the Brazilian State of Roraima (FERR). To achieve the objective, the methodological procedures adopted were determined by an integrative analysis that included a literature review on the role of actors in the construction of the specific technological innovation system (SEIT) and a case study on the role of FERR in the energy transition in Roraima. To support the case study, news and audiovisual material about the FERR, from 2019 to April 2021, were collected. After combining the theoretical framework and the case study, it was concluded that FERR members prefer pragmatic solutions, which do not abruptly break the current system, since the network partially fulfills the functions of a SEIT, lacking support from society and industry to seek more ambitious energy transition proposals with the Brazilian government.

Keywords: Advocacy; Energy Transition; Amazon, Brazil.

## 1. INTRODUÇÃO

A transição para uma economia com baixa emissão de carbono é considerada o único caminho para mitigar os impactos das mudanças climáticas e, assim, manter a sobrevivência da humanidade. Por se tratar de um processo complexo, pois envolve múltiplos fatores e atores, não existe um mapa comum para todos os países, o que estimula a disputa entre o regime fundamentado em combustíveis fósseis e a ascensão de atores que dominam tecnologias mais sustentáveis (ARENTE et al., 2017; SURRS; HEKKERT, 2012).

Rogge e Reichardt (2016) argumentam que é justamente na política que os caminhos para transição ganham forma, já que os atores

organizam seus interesses em uma agenda com intuito de ganhar apoio governamental. Assim, a transição deve ser interpretada mais como um processo sociotécnico complexo, não linear, do que simplesmente a substituição de uma fonte energética fóssil por renováveis, uma vez que a ascensão das tecnologias renováveis envolve a formação de novos arranjos institucionais e mercadológicos ao longo do tempo (ELLIOT, 2000).

No Brasil, o desafio diz respeito não só diminuir a dependência das hidrelétricas na geração de eletricidade, uma vez que a expansão dessas estruturas se tornou limitada perante as variações climáticas, mas também levar energia de qualidade e sustentável para regiões isoladas, como a Amazônia, onde residem 950 mil habitantes sem energia elétrica (IEMA, 2019). O fornecimento de eletricidade para Amazônia é majoritariamente encabeçado pelos sistemas isolados (SISOLs), isto é, o conjunto de usinas termoelétricas alimentadas a óleo diesel (EPE, 2021). A operação dos SISOLs, com geração média de 449 MW, possui um custo anual de 7 bilhões de reais em subsídios, tornando-se um dos sistemas elétricos mais caros do Brasil. Ao considerar os custos ambientais, sociais e financeiros inerentes ao funcionamento dos sistemas isolados, a transição para um complexo de energias renováveis se tornou uma alternativa para os estados amazônicos combinarem segurança energética com desenvolvimento sustentável (IEMA, 2019).

Essa condição fomentou a articulação de atores locais e regionais em prol das fontes renováveis. Contudo, o desconhecimento em relação as tecnologias por governadores e prefeitos, bem como a manutenção do *status quo* por atores ligados aos privilégios dos sistemas isolados tem limitado as discussões sobre a transição energética amazônica. Assim, este estudo questiona até que ponto as redes de *advocacy* estão comprometidas com a transição energética amazônica. A hipótese adotada diz que as redes de *advocacy* tendem a adotar propostas pragmáticas de transição, que são caracterizadas pela adoção de tecnologias renováveis sem romper bruscamente com o regime dos combustíveis fósseis da região. Nesse sentido, o objetivo do artigo é analisar os grupos de interesse favoráveis às energias renováveis na Amazônia, concentrando-se no caso do Fórum de Energias Renováveis de Roraima (FERR).

Os procedimentos metodológicos adotados para atingir tal fim foram balizados por uma análise integrativa que envolveu uma revisão da literatura sobre sistemas de inovação, que aponta a função das redes de *advocacy* na legitimação da transição energética. Ademais, aplicou-se um estudo de caso sobre a atuação do FERR entre 2019 e abril de 2021. Para embasar o estudo, revisou-se notícias e material audiovisual disponibilizado no site do FERR.

A discussão do estudo foi dividida em quatro seções. Na pri-

meira, busca-se ilustrar a concepção do sistema específico de inovação tecnológica e como as redes de *advocacy* se articulam para legitimar a transição energética. Na segunda seção, contextualiza-se os problemas energéticos do estado de Roraima, ao passo que na terceira apresenta-se a atuação do FERR, como também o posicionamento dos membros frente as soluções energéticas para o estado. Por último, faz-se uma síntese acerca dos laços teóricos do SEIT e o caso estudado.

## 2. SISTEMAS DE INOVAÇÃO E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A compreensão da transição energética tem ocorrido por meio da combinação interdisciplinar das teorias institucionalistas e evolucionárias, já que a passagem de um regime sociotécnico para outro mais sustentável envolve principalmente o desenvolvimento de inovações e tecnologias (KEMP; SOETE, 1992). Conforme Hekkert et al. (2007), o modelo dos Sistemas de Inovação tem cumprido a função de entender a trajetória do desenvolvimento tecnológico sustentável. Nesse caso, o modelo tem como premissa básica que tanto a inovação como a difusão de tecnologia são processos individuais e coletivos, o que abarca interações no nível da firma, bem como dinâmicas interdependentes com o sistema nacional de inovação.

Um Sistema de Inovação pode ser entendido como o conjunto de instituições públicas e privadas e mecanismos econômicos que afeta tanto a direção do desenvolvimento como a mudança tecnológica em uma sociedade (EDQUIST; LUNDEVALL, 1993; HEKKERT et al., 2007). Como a transição energética envolve a adoção de energias renováveis, o que está em questão é quando essas tecnologias se tornarão competitivas ao ponto de superarem as fontes fósseis e se acoplarem ao regime vigente, ou estabelecerem um novo. Responder essa indagação depende de quais tecnologias estamos abordando, já que cada fonte renovável possui especificidades técnicas dependentes do contexto socioeconômico local, regional, nacional e internacional, o que determinará sua inserção e difusão – ou não – no mercado (VERBONG; LOORBACH, 2012).

Por isso, Hekkert et al. (2007) prefere uma abordagem específica da tecnologia, ou *Technology Specific Innovation System* (TIS), como meio de analisar a direção e o desenvolvimento das fontes renováveis. Por Sistema Específico de Inovação Tecnológica (SEIT) entende-se a combinação inter-relacional de setores e empresas, circunscrita por um conjunto de regulações e instituições que moldam o comportamento e a infraestrutura de conhecimento inerente à tecnologia específica (SUURS; HEKKERT, 2012).

O Sistema Específico de Inovação Tecnológica (SEIT) faz parte do conjunto do Sistema Nacional de Inovação (SNI), sendo este constituído a partir do agregado de instituições e organizações industriais e de ensino que interagem para produzir, difundir, importar e aplicar inovações e tecnologias. Internamente, o SNI possui diversos setores de inovação que se relacionam, industrial e economicamente, com o Sistema Específico de Inovação Tecnológica (HEKKERT et al., 2007).

Essa interação se torna perceptível a partir da contextualização com uma tecnologia renovável. Vejamos o caso dos aerogeradores, utilizados pelo setor eólico: estes precisam de recursos de pesquisa e desenvolvimento aplicados em centros de pesquisa para aprimorar sua estrutura a fim de produzir mais energia elétrica; a fabricação dos aerogeradores possui conhecimento aplicado dos setores aeronáutico, mecânico, microeletrônico e da construção civil (GWEC, 2019).

Por se tratar de uma tecnologia emergente, diversos riscos inerentes ao seu funcionamento precisam ser tomados por uma entidade financiadora, geralmente o governo, o qual pode incentivar a difusão dos aerogeradores no mercado. Contudo, a aceitação desse artefato tecnológico pela sociedade depende de informações, cujas organizações que formam o SEIT são responsáveis por compartilhar, e legitimar as ações em prol da energia eólica.

A partir dessa abstração observa-se a existência de funções do sistema de inovação, que do ponto de vista da abordagem do Sistema Específico de Inovação Tecnológica (SEIT) se dividem em sete, como destacado na Tabela 1, elaborada com base em Hekkert e Suurs (2012). A atividade empreendedora (F1) é fundamental para o funcionamento do SEIT, pois o empreendedor é responsável por traduzir o conhecimento em oportunidades de negócios geralmente inovadores que desafiarão o *status quo*.

De acordo com Hekkert et al. (2007), a atividade empreendedora pode ser exercida tanto por empresas entrantes no mercado como por incumbentes que buscam diversificar o seu portfólio de ativos a fim de explorar novas oportunidades de negócios. Neste caso, expor-se ao risco torna-se uma característica chave dos empreendedores, já que estes demonstram e testam a tecnologia no mercado, compartilhando informações (*feedbacks*) com centros de pesquisa para aprimoramento da tecnologia.

Essa interação faz parte da segunda função do SEIT, desenvolvimento de conhecimento, cuja dinâmica diz respeito a existência de atividades que envolvam aprendizado por meio da pesquisa científica e da aplicação tecnológica. Essa função é desempenhada principalmente por centros privados de pesquisa e universidades, que demandam investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) a fim de avançar o conhecimento e, propriamente, o domínio da tecnologia (SUURS; HEKKERT, 2012).

A terceira função, difusão de conhecimento, encontra-se no eixo da produção do saber. O bom funcionamento do sistema específico de inovação tecnológica é determinado pela capacidade de circulação da informação em diversas organizações que sustentam a inovação, como o mercado, as universidades e o governo. Por isso, a elaboração de relatórios, conferências, *workshops* e redes de diálogo com empresas, centros de ensino e entidades governamentais são fundamentais para fortalecimento informacional acerca dos projetos de pesquisa e desenvolvimento enquadrados no SEIT.

Como a pesquisa e o desenvolvimento demandam recursos financeiros e humanos, a ativação da função orientação da pesquisa (F4) é primordial para melhor alocar os recursos escassos. Hekkert et al. (2007) afirmam que enquanto o desenvolvimento de conhecimento (F2) busca uma gama de tecnologias, a orientação dada por empresas, universidades e entidades governamentais delimita o que será utilizado por meio de critérios, metas e objetivos de médio e longo prazo.

O efeito dessa função no sistema de inovação pode ser observado pela mudança na preferência da sociedade, influenciando a aplicação de recursos em P&D (F2) e determinando a trajetória da mudança tecnológica. Além da expectativa da população e do mercado, são atividades da orientação da pesquisa a definição de áreas estratégicas para políticas públicas de Ciência, Tecnologia e Inovação (CTI), critérios para P&D e padronização de *designs* (HEKKERT et al., 2007).

Sobre a função de formação de mercado (F5), o que se observa é que as tecnologias emergentes não conseguem competir igualmente com as incumbentes. Nesse sentido, busca-se a criação de mercados artificiais através de mecanismos econômicos e legais para proteger e nutrir o desenvolvimento das tecnologias no seu nicho, até atingir a maturidade, determinada pela redução dos custos de produção e aceitação pela sociedade, ganhando aderência ao regime sociotécnico.

Suurs e Hekkert (2012) apontam que a formação de mercado corresponde a uma função complexa do sistema de inovação. Isso porque sua performance depende do funcionamento integrado das funções anteriores (F1, F2, F3 e F4), além da mobilização de recursos (F6), financeiros e humanos, que são aplicados por meio de instrumentos como subsídios, compras públicas, isenções fiscais, e programas de capacitações. A grande questão diz respeito ao tempo de uso dos instrumentos na sustentação do mercado artificial, que geralmente se perdem ao longo do tempo e, portanto, deformam o funcionamento do SEIT.

A mobilização de recursos (F6) para desenvolver novas tecnologias enfrentam ampla resistência do regime vigente. Por isso, as redes de *advocacy* (F7) são fundamentais para legitimar as demais funções do SEIT diante da inércia do *status quo* e angariar o apoio

social e governamental para viabilizar as inovações. É justamente sobre essa função que este estudo tratará de aprofundar no tópico a seguir (HEKKERT et al., 2007).

Tabela 1 – Funções do Sistema Específico de Inovação Tecnológica

Função	Descrição	Exemplificação
F1 - Atividade empreendedora	A função do empreendedor e traduzir o conhecimento em oportunidades de negócio, e eventualmente em inovação. Ele performa experimentos orientados para o mercado, estabelecendo a mudança tanto tecnológica como institucional	Projetos com foco comercial, demonstrações tecnológicas, expansões de portfólio
F2 - Desenvolvimento de conhecimento	Atividades que envolvem aprendizado, sobretudo no desenvolvimento de novas tecnologias, bem como para mercados, redes e usuários. O aprendizado pode ser fazendo ou pesquisando.	Estudos, testes em laboratório, projetos pilotos.
F3 - Difusão de conhecimento	Inovações ocorrem quando atores de diferentes contextos interagem. A difusão de conhecimento pode ser através da interação usando e compartilhando experiências.	Conferências, <i>workshops</i> , redes de pesquisa e universidades
F4 - Orientação da pesquisa	Definição de critérios e objetivos para alocação dos recursos financeiros e humanos. Expectativas dos atores sobre desenvolvimento de novas tecnologias também são enquadradas.	Expectativas, critérios para políticas públicas, padronização.
F5 - Formação de mercado	Tecnologias emergentes não conseguem competir igualmente com as incumbentes. Por isso, necessita-se de instrumentos legais e econômicos para criar mercados artificiais a fim de criar demanda e sustentar a inovação.	Regulação do mercado e isenções fiscais.
F6 - Mobilização de recursos	Alocação de recursos financeiros, materiais e humanos. Primordial para todo o SEIT.	Subsídios, investimentos e capacitação dos recursos humanos.
F7 - Legitimação/ <i>advocacy</i>	A ascensão de tecnologias emergentes sempre resiste no regime vigente. Para o SEIT se desenvolver, é necessário atacar a inércia, tanto utilizando autoridades para reconfigurar o sistema como conscientizando a sociedade sobre as vantagens competitivas da tecnologia.	<i>Lobbies</i> , consultorias, redes de <i>advocacy</i> e mídia especializada.

## 2.1 Casos de atuação da rede de *advocacy* na transição energética

A função de legitimar as tecnologias mais sustentáveis na transição energética é a principal missão da rede de *advocacy*. A sociedade civil, geralmente organizada em torno das Organizações Não-Governamentais (ONGs) vinculadas ao ambientalismo, desempenha historicamente a função de criticar a inércia do regime vigente a fim de que se adote caminhos mais sustentáveis (GOMEL; ROGGE, 2020).

Contudo, as mudanças profundas na sociedade sempre foram determinadas por disputas de poder entre grupos de interesse vinculados ao mercado, aos quais recorrem as instituições governamentais para angariar apoio financeiro, proteção/incentivo legal ou modificar posturas decisórias. Os atores utilizam o *lobby* e o *advocacy* como estratégias<sup>1</sup> de convencimento da população e dos formuladores de políticas públicas para apoiar determinadas agendas (GOMEL; ROGGE, 2020; JACOBSSON; LAUBER 2006).

No caso da transição energética, a prática do *advocacy* esteve presente, em menor ou maior grau, no desenvolvimento das tecnologias renováveis, determinando o sucesso – ou não – da trajetória tecnológica renovável ao cumprir as funções de buscar recursos e instrumentos de apoio mercadológico. Suurs e Hekkert (2012) argumentam que o papel das redes de *advocacy* no bojo do sistema específico de inovação tecnológica cresce conforme o apoio governamental e a difusão da tecnologia no mercado, ampliando a legitimidade e a influência perante as instituições governamentais. Por outro lado, essas redes são fragilizadas quando não contam com recursos (F6), empresários (F1) e apoio mercadológico (F5).

Casos de sucesso que revelam a participação das redes de *advocacy* na promoção das fontes renováveis são encontrados na Europa e em menor grau na América Latina. Destaca-se que o sucesso dessas redes em atingir o objetivo também foram determinados pelo grau de abertura da administração governamental em aceitar a participação dessas organizações no desenho das políticas públicas, convergindo para um modelo *botton-up* – construção das ações de baixo para cima –, em vez do *top-down*, que é um modelo com poucas aberturas e característico de um Estado centralizador (JACOBSSON; LAUBER, 2006).

O caso da Alemanha se revela justamente por um modelo *botton-up*, onde as redes de *advocacy* conseguem participar ativamente na formulação e implementação das políticas de apoio setoriais. Jacobsson

---

<sup>1</sup> O conceito de *advocacy* ainda não possui uma padronização. Nesse sentido, adota-se a concepção de redes de *advocacy*, que consistem em um conjunto de atores que atuam estrategicamente em defesa de uma causa comum (GOMEL; ROGGE, 2020).

e Lauber (2006) analisaram o papel das coalizações de *advocacy* na estruturação dos mecanismos de apoio à difusão da energia eólica e solar no país. Nesse contexto, as redes de *advocacy* muniram parlamentares com informações robustas sobre o nível de desenvolvimento tecnológico dos aerogeradores e das células solares, ao passo que denunciavam os danos ambientais à saúde pública causados pela indústria carvoeira e nuclear.

Rogge e Reichardt (2016) acrescentam que o principal fator para o apoio do governo alemão ao setor eólico e solar diz respeito a participação da indústria dentro das redes de *advocacy*, que se nutria a partir de ONGs e empresas. Outro caso alemão diz respeito ao setor das células combustíveis, em que o sistema de inovação tecnológica foi organizado em redes de *advocacy* que atuavam estrategicamente na consecução de recursos para P&D, capacitação de profissionais, criação de manuais de instalação e padronização de componentes (MUSIOLIK; MARKARD, 2011).

Na América Latina existem casos em estágio embrionário. Gomel e Rogge (2020) analisaram o caso da Argentina, que apesar da presença das coalizações de *advocacy* a favor das fontes renováveis, não possuía uma indústria capaz de convencer os formuladores de políticas públicas a implementarem ações integradas de apoio ao setor, criando um sistema disfuncional. Por outro lado, há organizações no Brasil que formam coalizações de *advocacy* no âmbito das energias renováveis, que contam com apoio da indústria. Destaca-se a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) e a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica). Porém, ainda não há estudos que sistematizem suas ações no modelo de sistema específico de inovação tecnológica.

### **3. INSUSTENTABILIDADE DA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DE RORAIMA**

O estado de Roraima está localizado no extremo norte da Amazônia Legal, fazendo fronteira com a Venezuela e a República Cooperativa da Guiana. Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), a unidade federativa possui uma população estimada em 631.181 pessoas, distribuídas em 15 municípios. Trata-se da única unidade federativa brasileira que não está conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), o que deixou o estado na dependência de importação de energia elétrica da Venezuela, via Linha de Transmissão de Guri/Macáguas, por duas décadas (EPE, 2020).

Com a suspensão do fornecimento em março de 2019, em razão do colapso político e socioeconômico da Venezuela, Roraima pas-

sou a ser abastecida por usinas termelétricas a diesel que fazem parte dos Sistemas Isolados<sup>1</sup> (SISOL) da Amazônia. Os SISOLs foram projetados para se adaptarem as barreiras físicas e geográficas da região amazônica, tornando-se os principais geradores de energia elétrica da região Norte. Entretanto, os SISOLs possuem um custo anual de R\$ 7 bilhões em subsídios que são cobertos pelo consumidor através da Conta de Consumo de Combustíveis<sup>2</sup> (CCC), além de ser ambientalmente insustentável (EPE, 2021).

A insustentabilidade da matriz elétrica de Roraima se amplia também pelas dificuldades de implementar não só soluções coerentes com o espaço amazônico, mas também que respeitem os povos tradicionais da região. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), o Ministério de Minas e Energia (MME) licitou em 2011 o sistema de transmissão, tendo a Sociedade de Propósito Específico Transnorte como vencedora para fornecer o serviço por 30 anos. Em 2012, a empresa solicitou a abertura do processo de licenciamento ambiental junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), e obteve uma licença prévia em 2015, mas que foi anulada em 2016 por questões envolvendo a passagem do linhão dentro da Terra Indígena Waimiri-Atroari, cujas lideranças são contra o empreendimento (Figura 1) (EPE, 2021).

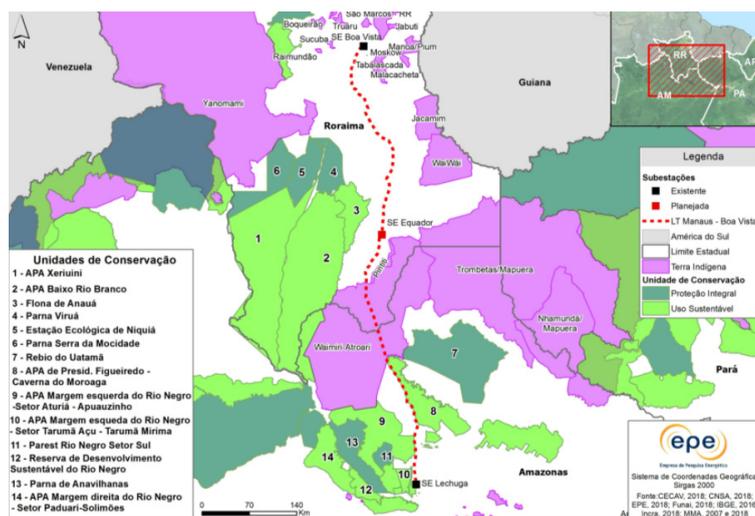


Figura 1 – Traçado planejado da Interligação Manaus-Boa Vista

1 Conforme o ONS (2021), os sistemas isolados são um conjunto de termelétricas abastecidas com óleo diesel, que operam em regiões desconectadas do Sistema Interligado Nacional (SIN).

2 Conforme a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a CCC é um encargo do setor elétrico brasileiro, pago por todas as concessionárias de distribuição e de transmissão de energia elétrica, de forma a subsidiar os custos anuais de geração em áreas ainda não integradas ao Sistema Interligado Nacional - SIN, chamadas de Sistemas Isolados.

Outra solução em estudo diz respeito à construção da Usina Hidrelétrica Bem Querem, com potência instalada de 650MW. Trata-se de um projeto com forte apoio do governo estadual e do MME, uma vez que permitiria ao estado de Roraima exportar o excedente de energia elétrica para o restante do país<sup>1</sup>. Soma-se a isso a instalação de eclusas que possibilitaria a navegação entre o município de Caracará e a capital Boa Vista (EPE, 2018).

Contudo, os impactos ambientais são elevados, já que se prevê a construção do reservatório com 150 km de extensão e uma área aproximada de 520 km<sup>2</sup>. Dessa área, 37% correspondem a calha do rio Branco e de seus afluentes, ao passo que 63% seriam áreas inundadas entre Boa Vista, Mucajaí, Caracará, Cantá e Iracema (EPE, 2018). A inundação causada pelo reservatório afetaria principalmente as comunidades ribeirinhas e áreas indígenas que possuem rios tributários ao rio Branco, bem como alagaria parte da BR-174, principal rodovia que liga Roraima ao Amazonas (EPE, 2018).

A demanda por soluções com menos impactos ambientais fez com a EPE apresentasse alternativas que mitigassem a insegurança energética roraimense e aproveitasse o potencial energético renovável de Roraima. O primeiro passo diz respeito às alterações no Decreto nº 9.047/2017, que substituiu os Projetos de Referência elaborados pelas distribuidoras, pelas Propostas de Solução de Suprimentos, que devem ser apresentadas por agentes interessados nos leilões dos Sistemas Isolados (EPE, 2019).

O segundo passo veio com a Portaria MME nº 512/2018, que determinava a realização do leilão para os SISOLs com fontes variadas, totalizando nove projetos com 294 MW de potência. Pela primeira vez, o leilão possibilitou a participação de agentes interessados em soluções híbridas, tecnologia fotovoltaica, termelétricas a gás natural, biogás e óleo combustível (EPE, 2019).

Fruto dessa política foi a construção da Usina Termelétrica de Jaguatirica II, cujo combustível é o gás natural extraído no campo do Azulão, no estado do Amazonas. O processo consiste na transformação do gás natural em gás natural liquefeito (GNL), possibilitando o seu transporte por caminhões até Boa Vista, capital roraimense. Trata-se de um empreendimento da Eneva, a qual incorporou, em 2017, as operações de extração e produção de gás natural da Petrobras na Bacia do Amazonas (ENEVA, 2022, EPE, 2020).

A entrada da Eneva na extração e produção de gás natural no Amazonas gerou externalidades positivas em termos socioeconômicos e funcionamento da matriz energética amazônica. Socioeconomicamente, a empresa injetou R\$ 1,8 bilhão para construir a UTE Jaguati-

---

<sup>1</sup> Conforme a EPE (2018), isso se daria pelo aproveitamento das cheias do rio Branco, entre junho e agosto, período em que outros reservatórios brasileiros têm pouca água.

rica II, sendo R\$ 90 milhões aplicados somente na aquisição de bens e serviços roraimenses (ENEVA, 2022).

Do ponto de vista da matriz energética regional, concretizou-se a antiga estratégia desenhada entre a Petrobras e Eletronorte, de ativar a produção de gás natural na Amazônia com intuito de usar o suprimento nos sistemas isolados amazônicos. Todavia, a baixa demanda e as dificuldades financeiras das duas empresas estatais dificultaram a realização de novos investimentos em infraestrutura de extração, transporte e transmissão de gás e eletricidade (AGUIAR, 2011; EPE, 2020).

Conforme a Eneva (2022), ao entrar em operação em fevereiro de 2022, a UTE Jaguatirica II passou a ter 140.834 megawatts (MW) de capacidade, isto é, 70% da carga de eletricidade em Roraima. Isto diminuiu não só a dependência das termelétricas a óleo diesel, mas também o ritmo das emissões de gases de efeito estufa, já que se considera o gás natural menos poluente que o diesel.

A presença de agentes interessados em desenvolver projetos com fontes alternativas conflita com os interesses das distribuidoras que sobrevivem via operação das termelétricas dos Sistemas Isolados. Tal situação fez com diversos atores locais se mobilizassem para buscar alternativas renováveis e remediassem os conflitos de interesse em torno das reformas da matriz elétrica roraimense, como é o caso do Fórum de Energias Renováveis de Roraima (FERR).

## **4. O FÓRUM DE ENERGIAS RENOVÁVEIS DE RORAIMA COMO REDE DE ADVOCACY**

### **4.1 Caracterizando os membros do FERR**

O Fórum de Energias Renováveis de Roraima (FERR, 2021) foi criado em 2019 com intuito de formular propostas de políticas públicas e propor interlocução e articulação institucional em prol do desenvolvimento energético de Roraima. Conforme seu site institucional, a organização tem como objetivo sensibilizar, conscientizar e qualificar a opinião pública em relação aos desafios da questão energética em Roraima, com ações efetivas e soluções sustentáveis para a sociedade (FERR, 2021).

A Tabela 2, elaborada conforme dados disponibilizados no site do FERR, apresenta os membros da organização. Tais atores representam setores importantes do âmbito público e privado do estado de Roraima. Dentro da lógica do Sistema Específico de Inovação Tecnológica (SEIT), tais atores desempenham funções com complexidades variadas, destacando-se a combinação de instituições de ensino e pes-

quisa que desenvolvem (F2), difundem (F3) e orientam (F4) conhecimento sobre tecnologias renováveis.

A Universidade Federal de Roraima (UFRR) é a principal instituição pública com foco em P&D na região. Não obstante, o FERR possui acordo de cooperação com a UFRR para desenvolver projetos com tecnologia fotovoltaica sob coordenação do Departamento de Engenharia Elétrica (FERR, 2021b). Complementarmente, o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e o Instituto Evaldo Lodi (IEL) formam o eixo de capacitação de recursos humanos por meio de cursos técnicos e inserção da mão de obra qualificada no mercado de trabalho.

No eixo empresarial (F1) visualiza-se a presença de incumbentes do setor elétrico amazônico, como a Roraima Energia e a Eletronorte, subsidiária da Eletrobrás. A Roraima Energia é a principal distribuidora de energia elétrica em Roraima, formada a partir da parceria entre a Oliveira Energia (54% do capital) e a Atem's Distribuidora de Petróleo S.A (36% do capital). No levantamento do portfólio das empresas não foram encontrados ativos vinculados a geração de energia renovável (RORAIMA ENERGIA, 2021).

Tabela 2 – Membros do Fórum de Energias Renováveis de Roraima (FERR)

<b>Governo Estadual</b>	<b>Org. Não-Governamentais</b>	<b>Empresas</b>
SEAPA/RR	Clima e Sociedade – iCS	Roraima Energia
SEINF	Instituto Socioambiental - ISA	Eletrobras Eletronorte
	Hutukara Associação Yanomami	
	Conselho Indígena de Roraima - CIR	
<b>Agências Industriais</b>	<b>Instituições de Ensino e Pesquisa</b>	<b>Conselhos Profissionais</b>
Federação das Indústrias de RR – FIER	Universidade Federal de Roraima – UFRR	AEER
SEBRAE	SENAI	CAU/RR
FECOMÉRCIO/RR	Inst. Evaldo Lodi - IEL	CREA/RR
Sist. FAER/SENAR/RR		
Sist. OCR		

A Eletronorte é a principal empresa pública inserida no setor elétrico amazônico. O portfólio da empresa divide-se em geração, sobretudo por hidrelétricas, e transmissão de energia, em que constitui uma Sociedade de Propósito Específico (SPE) com a Alupar para formar a Transnorte Energia S.A e explorar a concessão do Linhão de Tucuruí (interligação Manaus-Boa Vista) (ELETRONORTE, 2021).

As Organizações Não-Governamentais (ONGs) associadas ao FERR possuem bases de atuação diversificada. O portfólio do Instituto Clima e Sociedade (iCS) e do Instituto Socioambiental (ISA) estão inseridos na agenda do desenvolvimento sustentável, assessorando o FERR com estudos técnicos sobre governança ambiental e exploração do potencial energético sustentável de Roraima, como também mobilizando recursos (F6) para financiamento de projetos locais. As participações do Conselho Indígena de Roraima (CIR) e da Hutukara Associação Yanomami envolvem discussões sobre como as soluções podem afetar os povos indígenas, mas também encontrar apoio para solucionar problemas de infraestrutura elétrica nas comunidades isoladas (FERR, 2021).

Por parte do Governo Estadual existem duas secretarias estratégicas vinculadas ao FERR, como a Secretaria Estadual de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (SEAPA/RR) e a Secretaria Estadual de Infraestrutura de Roraima (SEINF/RR). A importância se revela pela necessidade de acompanhar os trâmites burocráticos para aprovar projetos privados e políticas públicas de eletrificação rural, como o Mais Luz para a Amazônia.

As Agências Industriais formam o eixo com maior dinamismo dentro do FERR. Isso porque a presença da Federação das Indústrias do Estado de Roraima (FIER) e da Federação do Comércio de Bens, Serviços e Turismo do Estado de Roraima (FECOMÉRCIO/RR) representa o eixo empresarial roraimense, com forte poder de mobilização de recursos. Adicionalmente, a articulação da Federação da Agricultura e Pecuária do Estado de Roraima (FAER) com o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR) e a Organização das Cooperativas de Roraima (OCR) formam um sistema com capilaridade no meio rural roraimense (FERR, 2021).

A agenda dessas organizações envolve principalmente a capacitação do empreendedor urbano e rural, convergindo interesses quanto ao fornecimento de infraestrutura energética para o desenvolvimento de Roraima. Por último, encontram-se os conselhos profissionais que apresentam interesses difusos, visto que são formados pelo Conselho Regional de Arquitetura e Urbanismo (CAU/RR), Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA/RR) e Associação dos Engenheiros Eletricistas de Roraima (AEER). Dentro do FERR, tais conselhos possuem uma agenda vinculada ao fornecimento de opinião técnica sobre a questão energética roraimense, tanto na mídia como em eventos oficiais do FERR.

#### **4.2 Posicionamento dos atores sobre as soluções**

A análise sobre o posicionamento dos atores sobre as soluções

para a reforma da matriz elétrica roraimense considerou principalmente a opinião não só dos membros do FERR no noticiário da instituição, mas também de atores externos, que são relevantes na implementação de soluções enérgicas. As principais propostas para transição energética de Roraima são: a) construção da Usina Hidrelétrica de Bem Querer; b) construção do linhão de Tucuruí; e c) adoção de tecnologias mais sustentáveis.

Tabela 3 – Propostas para reforma da matriz elétrica de Roraima

Solução	Característica	Preferência dos atores
UHE Bem Querer	Centralização. Considerada limpa se comparado as UTEs, porém com impactos sociais e ambientais elevados. Empregos durante a obra.	Governo Estadual, MME, Eletronorte, Roraima Energia.
Linhão de Tucuruí	Centralização. Permite a interligação de RR com o SIN. Impactos sociais e ambientais médios. Empregos gerados durante a obra.	Governo Estadual, Eletronorte, Roraima Energia, MME, FERR*
Tecnologias mais sustentáveis	Descentralização. Combinação de tecnologia fotovoltaica com baterias, biomassa e PCHs. Adoção de políticas de eficiência energética. Capacidade de gerar empregos no longo prazo.	FERR*, Instituto Clima e Sociedade, Instituto Socioambiental, CIR, Hutukara Associação Yanomami.

A Tabela 3, elaborada com base no site de notícias do FERR (2021b), apresenta as características das soluções e as respectivas preferências dos atores. Dentre as propostas, a construção da UHE Bem Querer possui preferência do Governo Estadual, Ministério de Minas e Energia (MME) e da Eletronorte. Trata-se de um projeto infraestruturaante que sustenta a manutenção do regime centralizado de expansão das hidrelétricas na Amazônia sob coordenação de associações de empresas. A aderência do MME e da Eletronorte se fundamenta na visão de que a hidrelétrica solucionaria não só os problemas energéticos de Roraima, mas também permitiria a exportação do excedente via Sistema Interligado Nacional (SIN) para regiões com alta demanda, como as regiões Sul e Sudeste, em períodos de seca dos reservatórios (EPE, 2021).

Dada a dimensão da obra, o interesse do Governo Estadual se estende para atração de investimentos públicos e privados, bem como geração de emprego. Contudo, Fearnside e Laurence (2015) apontam justamente para os riscos envolvendo o superdimensionamento da obra, cuja extensão dos impactos ambientais e sociais são imprevisíveis. O receio se nutre pelo histórico de construção da UHE Belo Monte, que foi marcada pela corrupção e judicialização da obra. No

todo, a UHE Bem Querer geraria menos eletricidade, mas com uma área alagada maior que Belo Monte (EPE, 2021; FERR, 2021a).

A construção do Linhão de Tucuruí, que busca interligar Roraima ao SIN, se mostra como uma proposta pragmática com preferência do Governo Estadual, Eletronorte, Roraima Energia e o FERR. Além de atender a demanda do estado a partir da UHE Tucuruí (Pará), a solução mantém a centralização da distribuição de eletricidade pelas incumbentes (Eletronorte e Roraima Energia), que também podem se beneficiar da combinação Linhão de Tucuruí-UHE Bem Querer para vender eletricidade as outras regiões do país. A posição do FERR diz respeito a uma manobra pragmática para encontrar uma solução de médio prazo para o estado, já que as demais são vistas no horizonte por estarem cercadas de incertezas quanto a capacidade de atender a demanda da população (FERR, 2021a).

Por outro lado, as soluções enquadradas em tecnologias mais sustentáveis (solar, biomassa e PCHs) são preferidas justamente pelo FERR, seguido por Instituto Clima e Sociedade, Instituto Socioambiental, CIR e Hutukara Associação Yanomami. O FERR expressou sua preferência por meio da carta em defesa da manutenção de regras para Geração Distribuída (GD) de energia. Como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) defende a retirada dos incentivos que estimulam a geração por fontes renováveis, já que os custos são repassados para os consumidores fora da geração distribuída, o FERR alegou que a medida trará prejuízos para o estado, já que a GD estimula a mitigação da dependência das termelétricas, e que os custos dos subsídios da conta de consumo de combustível (CCC) são maiores que os da GD (FERR, 2020).

Complementarmente, o FERR contribuiu à Consulta Pública nº 47/2019, que visava a coleta de informações para o edital do Leilão de Eficiência Energética nº 4/2020-ANEEL, o qual busca contratar um agente para o desenvolvimento de ações de eficiência orientadas para redução do consumo de eletricidade (ANEEL, 2020). O Fórum apontou para a necessidade de substituição da geração termelétrica a diesel, demandando esforços para expansão da GD fotovoltaica na capital Boa Vista, como também a criação de um mecanismo de contabilização de energia a fim de que se possa criar um mercado livre de energia em Roraima (FERR, 2021a).

O Instituto Socioambiental e Instituto Clima e Sociedade convergiram para a decisão do FERR em questionar as iniciativas da ANEEL. Faz parte da atuação dessas organizações a consolidação de soluções descentralizadas, cujo fator de adaptação ao espaço amazônico é maior que os projetos infraestruturantes. A própria instalação de módulos solares em comunidades indígenas e ribeirinhas na Amazônia fortaleceu a aderência da Hutukara Associação Yanomami e o Conse-

lho Indígena de Roraima (CIR) por soluções mais sustentáveis.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou responder de que maneira a rede local de *advocacy* está comprometida com a transição energética amazônica. A hipótese adotada é que a rede local de *advocacy* possui uma tendência em adotar propostas pragmáticas, que são caracterizadas pela adoção de tecnologias renováveis sem romper bruscamente o regime vigente.

No estudo de caso do Fórum de Energias Renováveis de Roraima (FERR), evidenciou-se que existem atores que, mesmo parcialmente, cumprem funções enquadradas no Sistema Específico de Inovação Tecnológica (SEIT). É o caso do eixo desenvolvimento, difusão e orientação do conhecimento, formado pela UFRR, SENAI e Instituto Evaldo Lodi, cujos esforços se baseiam no desenvolvimento de projetos de P&D no âmbito solar fotovoltaico e eficiência energética. Além disso, tais organizações possuem capacidade de formar recursos humanos para a transição energética por meios dos cursos técnicos e superiores.

Visto que a força das redes de *advocacy* na Europa se concentra principalmente na presença da indústria da energia renovável, é possível admitir que a grande fraqueza do FERR reside na ausência de empresas do mercado de fontes renováveis, tanto no âmbito regional como nacional. No mais, observou-se que a participação de incumbentes, como a Roraima Energia e a Eletronorte, pode limitar o ritmo da transição energética em Roraima ao defender a manutenção das termelétricas a diesel e construção de hidrelétricas, desestimulando a inserção de tecnologias renováveis descentralizadas.

Isso é visível no posicionamento dos atores quanto as propostas de reforma da matriz elétrica roraimense. A preferência do FERR pela construção do Linhão de Tucuruí é acertada em razão da demanda por soluções de médio prazo. Contudo, a inclinação do FERR pelas tecnologias mais sustentáveis depende do fortalecimento do mercado regional. Por isso, recomendam-se estudos para avaliar o mercado de geração distribuída não só em Roraima, mas também na Amazônia. Além disso, o FERR deve buscar a inserção de empresas que forneçam ou comercializam tecnologias renováveis em seus quadros, como forma de aumentar a força da organização.

Notadamente, o motor que dita o ritmo da transição energética é conformado pela integração entre mercado e Estado por meio das políticas públicas. Neste sentido, a organização dos atores em redes de *advocacy* facilita a construção de diálogo e propriamente de políticas públicas em regiões historicamente marcadas pelo isolamento institucional e político.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENT D. J.; ARNDT, M.; MILLER, M.; TARP, F.; ZINAMAN, O. The political economy of clean energy transitions. Oxford University Press, 2017.

ANEEL. Plano anual de operação dos Sistemas Isolados. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017801.pdf> Acesso em 22 de dez. 2020.

AGUIAR, G. P. Integração Regional pela via energética: estudo de caso da interligação elétrica Venezuela-Brasil. Brasília: tese de Doutorado. (Programa de Pós-Graduação em Relações Internacionais – Universidade de Brasília (UnB). Brasília – DF, p. 281, 2011.

ELLIOT, D. Renewable energy and sustainable futures, futures, vol. 32, pp. 261–274, 2000.

EDQUIST, Charles; LUNDEVALL, Bengt-Ake. Comparing the Danish and Swedish systems of innovation. National innovation systems: A comparative analysis, p. 265-298, 1993.

EPE. Hidrelétrica Bem Querer. 2018. Disponível em: <https://gisepe-prd2.epe.gov.br/arcgisportal/apps/MapJournal/index.html?appid=255343dae17c4ee39a5b8cc9e4160f34> Acesso em: 12 jun. 2021.

\_\_\_\_\_. Resultado do Leilão para suprimentos a Boa Vista e localidades conectadas. 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-344/Resultado%20Leil%C3%A3o%20Roraima.pdf#search=Roraima> Acesso em 12 jun. 2021.

\_\_\_\_\_. Roraima: planejamento energético. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roraima-planejamento-energetico> Acesso em: 12 jun. 2021.

ENEVA. Série Azulão – Jaguarica. Disponível em: < <https://eneva.com.br/serie-azulao-jaguatirica/> > Acesso em: 12 de mar. 2022.

ELETRONORTE. Participações Societárias. 2021. Disponível em: <https://www.eletronorte.gov.br/participacoes-societarias/> Acesso em: 12 jun. 2021.

FEARNSIDE, Philip Martin; LAURANCE, William Frederick. Infraestrutura na Amazônia: As lições dos planos plurianuais. Caderno CRH, v. 25, n. 64, p. 87-98, 2012.

FERR. Quem somos. Disponível em: <https://energiasroraima.com.br/quem-somos/> Acesso em: 12 jun. 2021.

\_\_\_\_\_. Contribuição do FERR à consulta pública ANEEL 047/2019. 2021a. Disponível em: <https://energiasroraima.com.br/contribuicao-do-forum-de-energias-renovaveis-de-roraima-a-consulta-publica-aneel-047-2019/> Acesso em: 12 jun. 2021

\_\_\_\_\_. Fórum defende manutenção de regras para geração distribuída. 2020. Disponível em: <https://energiasroraima.com.br/forum-defende-manutencao-de-regras-para-geracao-distribuida-de-energia/> Acesso em: 12 jun. 2021.

\_\_\_\_\_. Acordos de cooperação técnica entre FERR e UFRR vão ampliar conhecimentos sobre energia solar fotovoltaica no meio acadêmico. 2021b. Disponível em: <https://energiasroraima.com.br/acordos-de-cooperacao-tecnica-entre-forum-e-ufrr-va-ampliar-conhecimentos-sobre-energia-solar-fotovoltaica-no-meio-academico/> Acesso em: 12 jun. 2021.

GOMEL, D.; ROGEE, K. S. Mere deployment of renewables or industry formation, too? Exploring the role of advocacy communities for the Argentinean energy policy mix. 2020. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 36, 345–371. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.02.003>

GWEC. Annual Wind Report 2019. Disponível em: [https://gwec.net/wp-content/uploads/2020/08/Annual-Wind-Report\\_2019\\_digital\\_final\\_2r.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2020/08/Annual-Wind-Report_2019_digital_final_2r.pdf) Acesso em 12 jun. 2021.

HEKKERT, Marko P. et al. Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological forecasting and social change*, v. 74, n. 4, p. 413-432, 2007

IEMA. Excluídos elétricos na Amazônia: um novo caminho a percorrer. 2019. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/apresentacoes-em-eventos/2019/26-11-2019-energia-renovavel-descentralizada-para-acabar-com-a-exclusao-eletrica/3-IEMA%20-%20Pedro%20Bara.pdf> Acesso em: 12 jun. 2021.

IBGE. Roraima – Cidades e estados. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rr/> Acesso em 12 jun. 2021.

JACOBSSON, S.; LAUBER, V. The politics and policy of energy system transformation—explaining the German diffusion of renewable energy technology. *Energy Policy, Renewable Energy Policies in the European Union*. v. 34, n. 3, p. 256–276, 1 fev. 2006.

KEMP, R.; SOETE, L. The greening of technological progress: An evolutionary perspective, *Futures*, Volume 24, Issue 5, June, pp. 437-457, 1992.

LINDBERG M.B.; MARKARD, J. ANDERSEN, A. D. Policies, actors and sustainability transition pathways: A study of the EU's energy policy mix, *Research Policy* vol. 48, 103668, 2019.

MUSIOLIK, Jörg; MARKARD, Jochen. Creating and shaping innovation systems: Formal networks in the innovation system for stationary fuel cells in Germany. *Energy Policy*, v. 39, n. 4, p. 1909-1922, 2011.

RORAIMA ENERGIA. Demonstrações Financeiras em 31 de dezembro 2019. Disponível em: [https://www.roraimaenergia.com.br/wp-content/uploads/2020/08/695858-RORAIMA-ENERGIA-DFS-31-12-2019-\\_Roraima-1.pdf](https://www.roraimaenergia.com.br/wp-content/uploads/2020/08/695858-RORAIMA-ENERGIA-DFS-31-12-2019-_Roraima-1.pdf) Acesso em: 12 jun. 2021.

ROGGE, Karoline S.; REICHARDT, Kristin. Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy*, v. 45, n. 8, p. 1620-1635, 2016.

SUURS, R.; HEKKERT, M. Motors of Sustainable Innovation: Understanding Transitions from a technological innovation system's perspective. In VERBONG, G.; LOORBACH, D (Org.) *Governing the Energy Transition: Reality, Illusion or Necessity?* Edited by Routledge, New York and London, 2012.

VERBONG, G.; LOORBACH, D. Introduction. In *Governing the Energy Transition: Reality, Illusion or Necessity?* VERBONG, G.; LOOBARCH, D. (Org.). Edited by Routledge, New York and London, 2012.

## ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO PARA INSTALAÇÃO DE USINA À BASE DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA

Maria Isadora de Faveri Marquesine<sup>1</sup>  
Willian Douglas Sbitkowski Chamma<sup>1</sup>  
Danielli Batistella<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.693

### RESUMO

Diante da atual necessidade da transição para energias renováveis, o trabalho apresenta um estudo de localização para instalação de usina à base de energia solar concentrada (CSP) no município de Pato Branco, localizado no sudoeste do Paraná. Utilizaram-se fatores restritivos, para remover áreas de preservação ou de interesse econômico, e fatores de ponderação, para indicar qual a aptidão da área disponível. Para normalizar diferentes critérios qualitativos e quantitativos e obter a importância relativa de cada critério, utilizou-se o Processo Analítico Hierárquico (AHP), um método de decisão multicritério amplamente utilizado na literatura. Algumas áreas aptas para a disposição de coletores e energia solar concentrada foram encontradas, e sugere-se a instalação de uma usina híbrida CSP-biomassa para melhor aproveitar os recursos disponíveis no município.

Palavras-chave: Estudo de localização; Energia Solar Concentrada; Geoprocessamento; AHP.

### ABSTRACT

Due to the current need of energy transition to renewables, this work presents a location study for the installation of a power plant based on concentrated solar power (CSP) in the municipality of Pato Branco, located in southwestern Paraná, Brazil. Restrictive criteria were applied to remove environmental preservation areas and high economic interest areas. Positive indicators were combined to identify the suitability of the available land. To normalize different qualitative and quantitative criteria, the Analytic Hierarchy Process (AHP) — a multicriteria decision-making method widely used in location studies — was used. Some suitable areas for the set-up of CSP collectors were found, and we suggest that hybrid CSP-biomass plants would be installed, so that the resources available can be used to their fullest.

Keywords: Location study; Concentrated Solar Power; Geoprocessing; AHP.

## 1. INTRODUÇÃO

O sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) afirma que, inequivocamente, a ação humana causou alterações climáticas rápidas e difundidas na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera. Como o aquecimento médio desde 1850 encontra-se na casa dos 1,07°C, faz-se necessário que as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> tornem-se zero a fim de mitigar as mudanças climáticas e evitar futuros desastres ambientais (IPCC, 2021). Estima-se que 85% da energia primária provém de combustíveis fósseis, e a queima destes é responsável por 56,6% das emissões globais de gases de efeito estufa (IPCC, 2021). Desta forma, é notável que as energias renováveis terão um papel crucial na política climática nas próximas décadas.

A matriz elétrica mundial é composta majoritariamente de fontes não renováveis, com a queima de combustíveis fósseis, como carvão e gás natural (INTERNACIONAL ENERGY AGENCY, 2020). A matriz brasileira é uma exceção, já que as fontes renováveis representam 83% da oferta de eletricidade no país, sendo que 64,9% da energia provém de usinas hidrelétricas (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). No entanto, com a crescente demanda por energia elétrica, a escassez de rios com potencial hidrelétrico inexplorado e as preocupações climáticas, é necessário que o país volte suas atenções a outras fontes renováveis, a fim de gerar energia limpa e sustentável.

O potencial técnico da energia solar tem estimativas variáveis, que ficam entre 1.575 e 49.837 exajoules<sup>1</sup> por ano (EJ/ano) (IPCC, 2012). A produção de energia mundial no ano de 2018 foi de 14.282 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (INTERNACIONAL ENERGY AGENCY, 2020), o equivalente a 597,96 EJ. Dessa forma, a energia solar tem capacidade de suprir, grosseiramente, de 2 a 83 vezes toda a energia utilizada no planeta.

A energia solar tem o maior potencial energético dentre as fontes renováveis, e transformar a radiação em energia elétrica tem sido um desejo desde o século XIX. No entanto, os maiores desenvolvimentos vieram somente com as crises do petróleo, nos anos 1970. A pesquisa sobre a energia solar também tem sido motivada pela preocupação sobre a possível escassez dos combustíveis fósseis. Com o declínio dos preços do petróleo, nos anos 1980, o interesse internacional na substituição gradativa de combustíveis fósseis em favor de fontes de energia limpas se dissipou (BANCO MUNDIAL, 2021; MANN, 2018). Não obstante, a recente perspectiva crítica das mudanças climáticas reacendeu o interesse em fontes renováveis para a geração e fornecimento de energia elétrica, em prol da sustentabilidade e acesso

---

1 1 EJ = 10<sup>18</sup> J

A Energia Solar Concentrada (CSP) é gerada a partir de arranjos de espelhos que concentram a radiação solar (principalmente a radiação solar direta normal) em superfícies pequenas, a fim de aquecer um líquido, sólido ou gás que é utilizado em um processo termodinâmico que converte o calor em energia elétrica (AZEVEDO, 2016; IPCC, 2012). A maioria das formas de gerar energia elétrica envolve o aquecimento de um fluido a altas temperaturas. Portanto, uma vantagem da energia solar concentrada é que ela utiliza processos térmico-elétricos bem conhecidos. Assim, há quatro vantagens-chave da tecnologia CSP: (i) Pode ser instalada para suprir diferentes capacidades e condições, indo desde dezenas de kW até múltiplos MW de potência; (ii) pode integrar armazenamento térmico/termoquímico e outras fontes de calor (biomassa, gás natural, etc.), que permite a geração de energia por horas após o pôr do sol; (iii) tem componentes modulares e escaláveis; (iv) não requer materiais exóticos (e.g. silício e lítio) para a construção, sendo que a maioria dos materiais são abundantes no mundo (vidro, alumínio, concreto) (IPCC, 2012).

Há quatro tipos principais de coletores de energia solar concentrada, como exibido na Figura 1, adaptada de IPCC (2012). Essas tecnologias estão em níveis de maturidade tecnológica distintos, sendo que o tipo de coletor mais comum é o cilíndrico parabólico, que conta com 85% da quota de mercado atual (BANCO MUNDIAL, 2021).

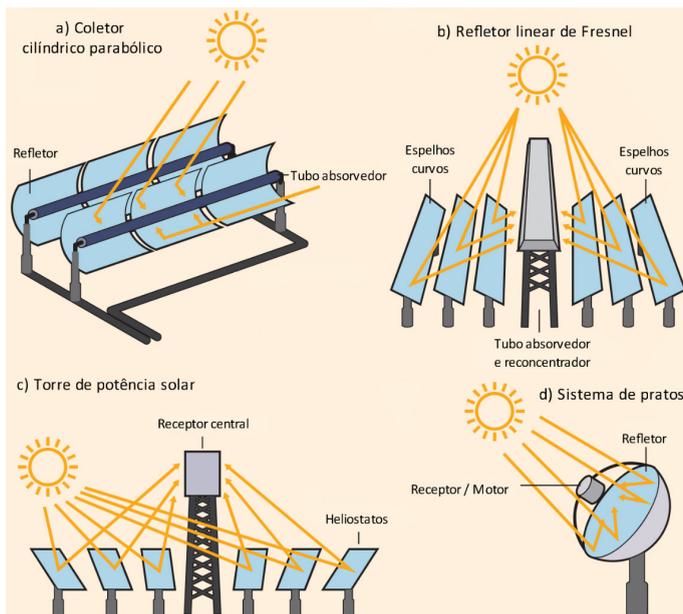


Figura 1 - Tipos de coletores CSP

No que concerne a competitividade no mercado, o custo da energia solar concentrada tende a diminuir progressivamente nos próximos anos. Atualmente, o custo médio nivelado de energia está na casa de 18 centavos de dólar (na cotação de 2019) por kWh gerado (IRENA, 2019). O custo já é competitivo com combustíveis fósseis, chegando a 0,073 centavos de dólar por kWh em algumas localidades (DLR, 2021), e previsões apontam que a tecnologia CSP terá custos plenamente competitivos com tecnologias não renováveis em 2025 (BANCO MUNDIAL, 2006). Essa previsão é plausível, já que na década de 2010 o custo da CSP caiu 50% e a capacidade instalada chegou a 6,2 GW (REN21, 2021).

A geração de eletricidade a partir de fontes renováveis tem mostrado contínuo aumento, e vários estudos de localização de usinas solares têm sido realizados ao redor do mundo. Nesse sentido, o uso de tecnologias da geoinformação (sistemas de informação geográfica, banco de dados geográficos, álgebra de mapas, análise multicritério, etc.) tem sido imprescindível, já que elas permitem a realização de procedimentos tecnológico-científicos necessários para identificar áreas com grande potencial energético (AZEVEDO, 2016). Dessa forma, a geoinformação pode fornecer conhecimento à esfera pública e privada, auxiliando na tomada de decisões para o desenvolvimento sustentável (RODRIGUES; COELHO; CABRAL, 2017).

O número de estudos de localização de empreendimentos de energia renovável que utilizam métodos de análise multicritério tem aumentado a cada ano. Esses métodos são altamente eficazes para chegar à soluções eficientes, já que eles consideram vários fatores que permeiam as análises espaciais, tais como condições ambientais, topográficas, econômicas, etc. (ILBAHAR; CEBI; KAHRAMAN, 2019). Contudo, esse tipo de estudo ainda não é amplamente difundido no Brasil.

Em um estudo de localização de usina solar termoelétrica de autoria brasileira, o potencial energético de Pernambuco foi analisado. A partir dos dados, excluiu-se áreas inadequadas, tais como unidades de conservação, áreas de preservação permanente (APPs), territórios indígenas e quilombolas, áreas urbanas e de expansão urbana e áreas de alto potencial agrícola. Em seguida, foi feita a análise ponderada multicritério, levando em conta critérios ambientais (uso do solo), climáticos (irradiação solar direta normal), topográficos (declive) e de localização (distância a linhas de transmissão, distância aos recursos hídricos, distância às principais estradas, distância às áreas urbanas). O estudo revelou que algumas municipalidades pernambucanas tem grande potencial de geração de energia solar (AZEVEDO; CANDEIAS; TIBA, 2017).

Em outro estudo nacional, Burgi (2013) afirma que vários estados brasileiros têm potencial para a instalação de usinas CSP, consta-

tando que essa tecnologia pode ter presença considerável na matriz elétrica brasileira no longo prazo. Os autores destacam os estados da Bahia e de São Paulo como tendo os maiores potenciais para a instalação de plantas heliotérmicas.

Buscando promover uma política de desenvolvimento da CSP no Brasil, Peñafiel (2016) analisou o potencial técnico, aspectos econômicos, e modelos de expansão da energia solar térmica no país, e defende a implantação de usinas CSP combinadas com biomassa.

Outro estudo excluiu sítios religiosos, turísticos e de patrimônio mundial, áreas de vegetação nativa e vida silvestre, aeroportos, corpos d'água e áreas de grande ocupação humana. Após, os pesos foram calculados através do Processo Analítico Hierárquico (AHP), utilizando fatores de climatologia (radiação solar global, duração da luz solar, temperatura, umidade relativa), topografia (altitude, declive, orientação), e de localização (proximidade a linhas de transmissão, proximidade à estrada). Este projeto, desenvolvido por Doorga et al. (2019) na ilha de Mauritius, apontou que três sítios são altamente adequados para a instalação de uma usina solar. Também vale a pena mencionar os trabalhos de Lindberg et al. (2021), Mensour et al. (2019) e Sánches-Lozano et al. (2015), que oferecem uma visão norteadora do estado-da-arte dessa área de estudo.

Constata-se que há extensa literatura científica internacional sobre o tópico, que apenas recentemente recebeu atenção no Brasil. Geralmente, os estudos de localização levam em consideração os critérios supramencionados, com exceção ou adição de alguns fatores, a depender de cada caso. Sem embargo, os fatores base são o uso do solo, climático, topográfico e de infraestrutura, além do econômico, não abordado neste trabalho.

O presente trabalho busca dispor da metodologia AHP para conduzir um estudo de localização no município de Pato Branco - PR, a fim de investigar se existem áreas adequadas à instalação de usinas à base de energia solar concentrada no município, e identificar quais as regiões potenciais mais apropriadas.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Delimitação da área de estudo**

A área de estudo compreende o município de Pato Branco – PR (Figura 2), localizado no sudoeste paranaense. Encontra-se na latitude  $26^{\circ}13'43.04''S$  e longitude  $52^{\circ}40'24.40''O$ , a uma altitude média de 760m (FEPESE, 2020).

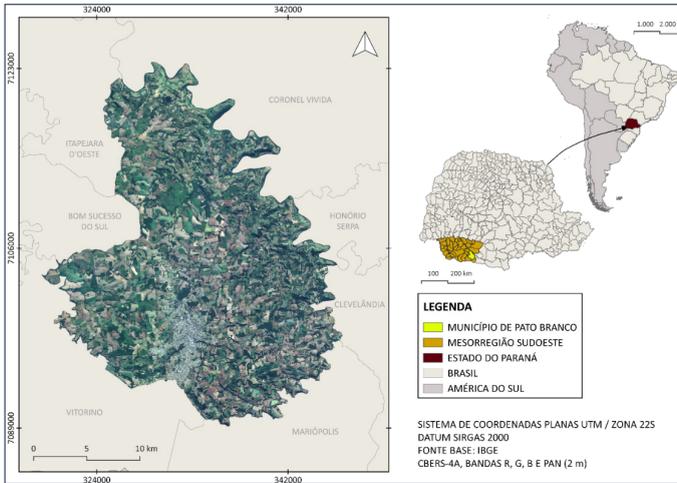


Figura 2 - Mapa de localização de Pato Branco – PR

## 2.2 Metodologia de definição e processamento dos dados

Neste trabalho, a metodologia (Figura 3) baseia-se na definição hierárquica dos critérios de uso do solo, climático, topográfico e de infraestrutura, e seus respectivos subcritérios dos Planos de Informação (PIs), com a aplicação de técnicas de geoprocessamento em sistemas de informações geográficas. Tanto o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) quanto a álgebra de mapas contribui para a remoção de áreas em condições restritivas, assim como a ponderação sobre a área de proveito, a fim de executar uma combinação matemática dos PIs utilizados.

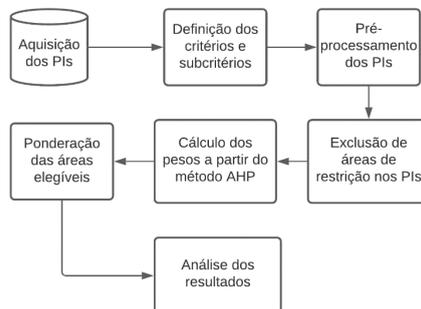


Figura 3 - Fluxograma da metodologia do trabalho

Os PIs abarcaram os principais fatores de interferência na manipulação do solo, para averiguar qual é o melhor local para a possível implantação de uma usina de energia solar concentrada.

Levando em consideração a realidade de médio porte (SECRETARIA NACIONAL DE ASSISTÊNCIA SOCIAL - SNAS, 2015) do município de Pato Branco – contando com aproximadamente 85 mil habitantes (IBGE, 2021) –, os parâmetros de influência sobre o projeto de estudo pautaram-se nos seguintes critérios de ponderação: Radiação Solar Direta Normal, obtida a partir do SolarGIS (SOLARGIS, 2021); declividade, obtida a partir do TOPODATA (VALERIANO, 2008); distância aos recursos hídricos, às rodovias, às linhas de transmissão e à mancha urbana, obtidas a partir do processamento dos shapefiles disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) (CATÁLOGO DE METADADOS DA ANA, 2019), Departamento de Estradas e Rodagem (DER) (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO PARANÁ, 2020), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016) e Instituto de Água e Terra (IAT) (INSTITUTO DE ÁGUA E TERRA, 2020), respectivamente.

Também há os fatores de restrição do uso do solo: a alta aptidão agrícola, mancha urbana, corpos d'água, floresta nativa, plantios florestais, várzeas, áreas construídas e as áreas respaldadas pelo Código Florestal (Lei nº 12.651/12, art. 30), que legisla sobre a preservação das Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Unidades de Conservação (UCs), além dos recursos hídricos já inclusos como áreas inaptas para uso. Cumpre-se assim, o objetivo de “preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas” (CASA CIVIL - PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2012).

Desse modo, as aptidões agrícolas média e baixa, conjuntamente com as áreas de pastagem e campo, mineração e solo exposto foram consideradas aptas a posterior sobreposição dos PIs. E para isso, com a aplicação de operações topológicas em ambiente SIG, foi possível excluir as porções de restrição sobre a extensão do município, utilizando a lógica booleana.

Como se trata de uma restrição, a lógica booleana faz a distinção primária do que pode e do que não pode ser ocupado para a determinada proposta de implantação de uma usina solar. Esta operação proporciona um diagnóstico qualitativo, gerando um mapa temático a partir de regras aplicadas a geo-campos, como visto no mapa da Figura 4d. Além disso, dispõe da ferramenta de cruzar dois ou mais planos de informação. Pode-se tomar como exemplo o próprio mapa de aptidão agrícola, sintetizando os mapas de solo, de declividade e demais conjuntos adicionais.

Com o uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) ArcGIS Pro (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI), 2021) e QGIS 3.18.2 with GRASS 7.8.5 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021), os mapas de restrição, dos PIs e o de síntese puderam ser elaborados de modo a prever a disponibilidade e nível de aptidão do território do município de Pato Branco, segundo suas condições climáticas, topográficas e de infraestrutura. Por conseguinte, a supressão de áreas inaproveitáveis constituiu a parte restritiva de todo o perímetro do município.

Para garantir a consistência do modelo e dos respectivos resultados, os SIGs utilizados serviram como recursos que auxiliam a prever e visualizar um evento, determinado pelos critérios empregados, em forma de dados geográficos, tanto qualitativos quanto quantitativos. Por definição, o SIG se caracteriza como um conjunto de tecnologias implementadas em ambiente computacional que é capaz de manipular, armazenar e recuperar dados objetivando simular, a partir de simplificações, situações e contextos existentes no mundo real (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Mediante a manipulação dos PIs nos *softwares*, é possível realizar análises espaciais e integrar diferentes dados, gerando informações associadas a diversos fatores que influenciam a decisão e efetivação de um projeto e/ou evento, como ocorre na instalação de uma usina a base de energia solar. Neste caso, como propõe (FISCHER; SCHOLTEN; UNWIN, 2019), há dois seguimentos: a modelagem do terreno, que se baseia em modelos determinísticos nas áreas socioeconômica e ambiental; e a investigação estatística a partir de dados geográficos, usando-os de base para verificar a compatibilidade entre as informações coletadas e fundamentar sua escolha.

Neste trabalho, tomou-se como finalidade a determinação de um modelo espacial, por meio da integração de informações (PIs) favoráveis ao propósito de estudo, após a eliminação de fatores excludentes.

As técnicas utilizadas na análise exploratória e de análise espacial ampararam-se na utilização de operadores topológicos e de transformação, como o fatiamento e a ponderação. Os critérios e pesos apresentados abaixo (Tabela 1) foram determinados de acordo com práticas presentes na literatura, e os processos para a estipulação desses valores estão detalhados no restante da seção.

Tabela 1 - Critérios para ponderação dos Planos de Informação pelo método de análise de decisão multicritério

Critério (fonte)	Subcritério	Classificação	Peso
Climático (SolarGIS)	Radiação Solar kWh / m <sup>2</sup> /dia)	4,37 - 4,72	1
		4,73 - 4,82	3
		4,83 - 4,89	5
		4,90 - 4,94	7
		4,95 - 5,00	9
Topográfico (TOPODATA)	Declive (%)	0 - 3	9
		3 - 8	8
		8 - 20	7
		20 - 45	5
		45 - 75	3
Infraestrutura (ANA, ONS, IAT e DER)	Recursos hídricos (km)	0 - 0,97	9
		0,98 - 2,03	7
		2,04 - 3,12	5
		3,13 - 4,28	3
		4,29 - 6,17	1
	Rodovias (km)	0 - 1,79	9
		1,80 - 3,91	7
		3,92 - 6,19	5
		6,20 - 9,01	3
		9,02 - 13,84	1
	Linhas de Transmissão (km)	0 - 0,94	9
		0,95 - 2,15	7
		2,16 - 3,85	5
		3,86 - 5,96	3
		5,97 - 9,63	1
	Mancha urbana (km)	0 - 1,92	1
		1,93 - 4,19	3
		4,20 - 6,41	5
		6,42 - 8,72	7
		8,73 - 12,56	9

O PI de fator climático, exposto na Figura 4a, foi obtido do recorte de dados do SolarGIS (média anual do período 1999-2018) (SOLARGIS, 2021) a partir dos limites do município disponibilizados

pelo (IBGE, 2021). O *raster* foi classificado pelo fatiamento da radiação solar por  $\text{m}^2$  dia ( $\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ ) a partir do método das Quebras Naturais de Jenks, como sugerido por (AZEVEDO, 2016). Assim, há preferência pelos maiores valores de irradiação, ou seja, com os tons mais escuros no mapa.

O fatiamento do critério topográfico foi feito a partir das classes de declividade da (EMBRAPA, 2006), e possibilitou retirar da topografia do município de Pato Branco percentuais claros sobre sua inclinação em relação a sua horizontalidade, obtendo uma escala do mais plano ao mais íngreme. São classificados, assim: plano (0 – 3%), suave ondulado (3 – 8%), ondulado (8 – 20%), forte ondulado (20 – 45%), montanhoso (45 – 75%) e escarpado (>75%).

Partindo da necessidade de se ter um terreno mais plano, que permite leve inclinação para escoamento da água, as classes de declive plano e suave ondulado, como visto no Mapa de Declividade (Figura 4b), são as mais favoráveis para a implementação da usina. A partir disso, é factível concluir que porções muito íngremes não apresentam condições satisfatórias para a implementação de usinas heliotérmicas.

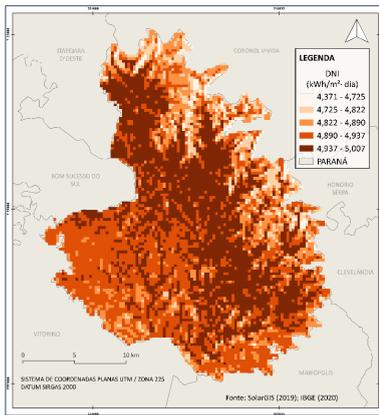
No Mapa de Infraestrutura (Figura 4a), os quatro subcritérios foram julgados segundo a aplicação da distância euclidiana – uma das operações globais da álgebra de mapas –, dentro do limite do município, em relação às linhas de transmissão de energia (ONS), à mancha urbana (IAT), às rodovias (DER) e aos rios (ANA). Esses quatro fatores repercutem na disponibilidade de recursos para a instalação e maior viabilidade econômica de uma usina solar, e por isso, quanto mais distante da mancha urbana e mais próximo às linhas de transmissão de energia, das rodovias e dos rios, mais apta a área é considerada.

A distância euclidiana funciona por meio de uma regra matemática, que opera em ambiente SIG, a partir da menor distância do objeto de interesse em um arquivo matricial. Para isso, as informações em vetor são transformadas para serem submetidas a essa função, o que permite o cálculo matricial da distância. Esse cálculo ocorre a partir da hipotenusa formada pelo centroide da célula origem e o centroide das outras células, de modo sequencial, estendendo-se por toda a delimitação dos elementos. A combinação entre as células gera as distâncias finais (AZEVEDO, 2016), já disponíveis para o fatiamento em classes. De modo igual ao critério climático, o fatiamento se deu pelo método das Quebras Naturais.

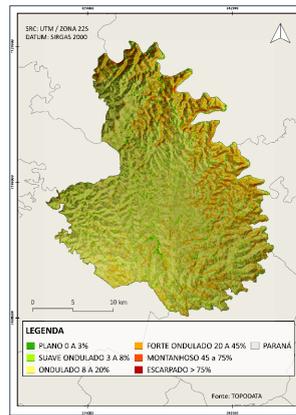
Na Figura 4d, a disposição e influência que cada um dos subcritérios restritivos tem sobre a determinação da aptidão do solo do município pode ser vista de maneira mais clara, por meio da equiparação dos níveis de aptidão agrícola (dados obtidos de MARQUESINE, 2020), do uso do solo (IAT), das APPs (dados da FUNDAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2018) e das ínfimas porções de UCs (dados advindos do CNUC - MINISTÉRIO DO

MEIO AMBIENTE, [s.d.]).

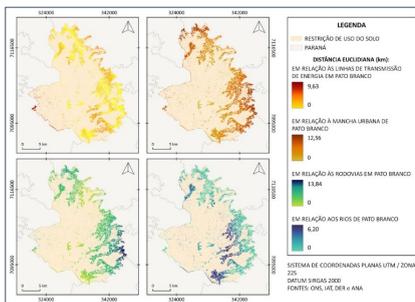
Para fundir todas as informações presentes nos PIs, realizou-se a associação de pesos a cada classe dos subcritérios (Tabela 1) e, através do método AHP, que será apresentado na Seção 2.3, calculou-se o peso relativo de cada subcritério, o que possibilita o uso da álgebra de mapas para indicar o nível de aptidão das áreas disponíveis para a instalação de coletores de energia solar concentrada em Pato Branco – PR.



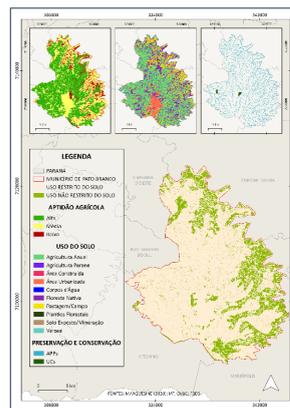
a) Mapa de incidência solar



b) Mapa de declividade



c) Mapa de infraestrutura



d) Mapa restritivo

Figura 4 - Mapas dos critérios climático, topográfico, infraestrutural e restritivo

### 2.3 Método AHP

O Processo Analítico Hierárquico (AHP) é uma ferramenta matemática desenvolvida por Thomas Saaty na década de 1970 (SAATY, 1977), sendo amplamente utilizada para o estabelecimento de prioridades e tomada de decisão. O método baseia-se na estruturação de um problema em componentes hierárquicos (critérios e subcritérios, etc.), e na comparação pareada entre atributos (SAATY, 2008). Assim, são feitos julgamentos subjetivos entre critérios não-trivialmente comparáveis, baseados em dados empíricos ou opiniões de especialistas (PIMENTA et al., 2019). As comparações são feitas usando a Escala Fundamental de Saaty (EFS), que vai de 1 a 9. Nessa escala, 1 significa que o critério A é igual ao critério B, e 9 denota que A é extremamente mais importante do que B (PIMENTA et al., 2019; SAATY, 1987, 1990, 2008).

Após a construção da matriz de comparações pareadas e da atribuição dos pesos relativos, deve-se verificar se o modelo é consistente. A matriz é normalizada, e calculam-se os autovalores ( $\lambda$ ) dessa matriz. Então, calcula-se o Índice de Consistência (IC), uma relação entre o maior autovalor e a ordem da matriz ( $n$ ) a partir da Equação 1 (SAATY, 1990):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Finalmente, utiliza-se o IC para calcular a Razão de Consistência (RC) do modelo. Na Equação 2, IR representa o Índice de Consistência Randômico (IR) proposto por Saaty (1987), que depende da ordem da matriz.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Caso RC exceda 10%, o modelo é considerado inconsistente. No contrário, o modelo apresenta coerência lógica.

Nesse trabalho, utilizou-se o software AHP-OS (GOEPEL, 2018) para efetuar os cálculos de prioridades da análise multicritério. A determinação da hierarquia entre fatores para o cálculo dos pesos está exposta na Tabela 2. Em ordem decrescente, a importância de cada critério é dada por: Radiação Solar Direta Normal (DNI) (42%), Declividade (24%), Distância às Linhas de Transmissão (16%), Distância às Rodovias (7%), Distância aos Recursos Hídricos (7%) e Distância às Áreas Urbanas (4%). A razão de consistência calculada foi de 3,3%, o que caracteriza o modelo como consistente.

Tabela 2 - Matriz de decisão AHP

	Radiação Solar	Declividade	Linhas de Transmissão	Rodovias	Área urbana	Recursos Hídricos
Radiação Solar	1	3	3	5	7	5
Declividade	1/3	1	3	3	5	3
Linhas de Transmissão	1/3	1/3	1	3	4	3
Rodovias	1/5	1/3	1/3	1	2	1
Área urbana	1/7	1/5	1/4	1/2	1	1/2
Recursos Hídricos	1/5	1/3	1/3	1	2	1
Pesos relativos	42%	24%	16%	7%	4%	7%
Autovalor principal	6,210		Razão de consistência	3,3%		

Com os pesos de cada fator determinados, utilizou-se a ferramenta de sobreposição ponderada do ArcGIS Pro para efetuar a álgebra de mapas. Seguindo a metodologia apresentada em 2019 por Doorga et al. (2019), as classes receberam valores de acordo com a EFS (Tabela 1) e os subcritérios receberam os pesos supracitados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise ponderada multicritério é um mapa síntese (Figura 5), que foi reclassificado tendo em mente a EFS: considerou-se os valores de 1 a 4 como aptidão baixa; os valores 5 e 6 como aptidão média; e os valores de 7 a 9 como aptidão alta. Os dados quantitativos de cada classe foram calculados e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantificação dos resultados do mapa síntese AHP

Aptidão	Área (km <sup>2</sup> )	% em relação	
		à área do município	à área não restrita
Baixa	4,454	0,83%	4,32%
Média	45,184	8,38%	43,78%
Alta	53,572	9,94%	51,91%
SOMA	103,210	19,15%	100,00%

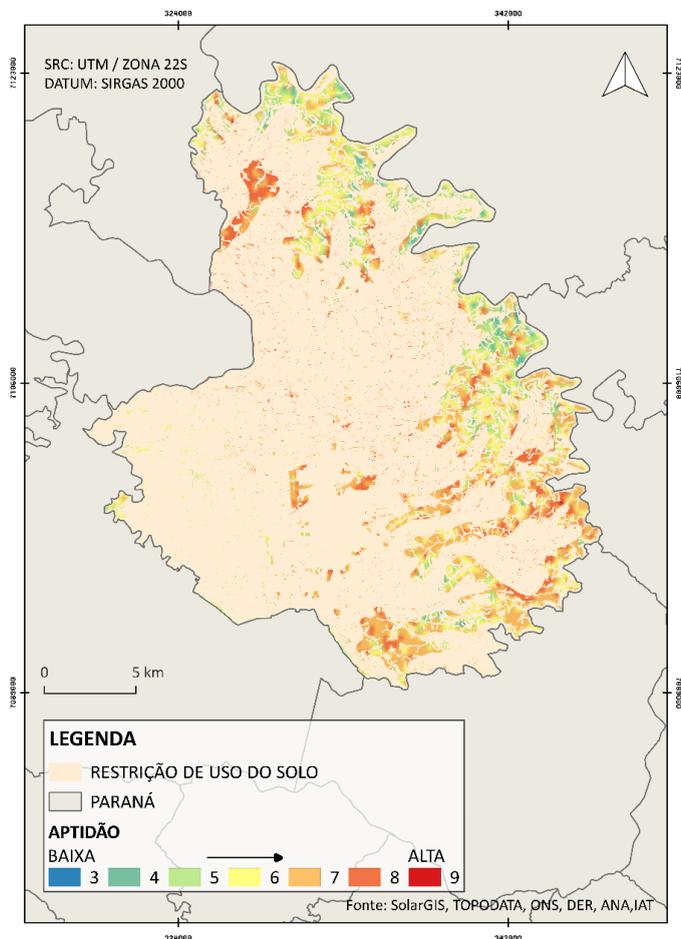


Figura 5 – Mapa de aptidão para a instalação de coletores de energia solar concentrada em Pato Branco – PR

Observando os dados apresentados, é visível que as regiões não restritas encontram-se próximas às regiões limítrofes do município, isto é, mais afastadas da área urbana, que fica no centro-sul. As áreas de aptidão baixa localizam-se fora da zona de DNI mais intensa, que atravessa o município no sentido sudeste-noroeste, e nas áreas mais declivosas que cercam o Rio Chopim. Já as áreas de aptidão média aparecem como uma zona de transição entre locais de baixa aptidão, onde vários critérios não são ideais, e áreas de alta aptidão, onde a maior parte dos critérios apresentam pesos favoráveis.

Como se pode observar, as áreas mais aptas encontram-se nas regiões sudeste e noroeste do município, tendo áreas contíguas de aptidão alta de 2 a 3 km<sup>2</sup> de extensão. No entanto, essas áreas apresentam formatos irregulares, o que pode ser um empecilho para a instalação de grandes quantidades de coletores de energia solar. Geralmente os conjuntos de espelhos são ordenados em formatos retangulares ou circulares, a fim de minimizar custos de instalação e maximizar o uso efetivo do espaço.

Em áreas da ordem de 2 a 3 quilômetros quadrados, a capacidade nominal de usinas já implantadas ao redor do mundo fica na casa dos 50 a 100 MW. Alguns exemplos são os projetos espanhóis Helios I (50 MW), Helioenergy 1 (50 MW), Aste1A (50 MW); a usina americana Martin Next Generation Solar Energy Center; e o complexo emiradense Shams 1 (NREL, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e).

Tomando a imagem de satélite apresentada na Figura 2, observa-se que as áreas tidas como mais aptas encontram-se em locais onde atualmente se pratica a agropecuária. Além disso, o principal fator de restrição em torno desses agrupamentos de maior aptidão termosolar — tanto na região sudeste, quanto noroeste — é a alta aptidão agrícola. Dessarte, busca-se uma forma de aproveitar ao máximo a geração de energia em coadjuvação com a atividade agropecuária.

Uma das propostas mais difundidas na literatura científica é de usinas de energia solar concentrada integradas a usinas de biomassa. Como parte da infraestrutura pode ser compartilhada entre esses dois tipos de usina, a hibridização entre a CSP e a bioenergia é ideal, o que promove a geração despachada sob demanda, estabilidade da rede, aumento da eficiência, flexibilização, operação nominal mesmo sob condições de baixa radiação (POWELL et al., 2017; SOARES et al., 2018). Além disso, as emissões de gases de efeito estufa diminuem (BANACLOCHE; HERRERA; LECHÓN, 2020; MOHAGHEGH et al., 2021; PRAMANIK; RAVIKRISHNA, 2017), há redução de custos (comparado a usinas de somente CSP) e diminuição da área necessária para construção — comparada a usinas de somente biomassa (BANACLOCHE; HERRERA; LECHÓN, 2020; PRAMANIK; RAVIKRISHNA, 2017).

Atualmente, há apenas uma usina híbrida CSP-biomassa em operação, a Termosolar Borges, na Espanha (COT et al., 2010), e outros protótipos estão em desenvolvimento (MOHAGHEGH et al., 2021).

No Paraná, a bioenergia já foi estudada. Sales et al. (2005) propõem o uso do capim-elefante e da leucena como fonte de biomassa na região. Já Sordi et al. (2015) afirmam que o estado tem potencial técnico e econômico para o uso de resíduos aviários como fonte de biomassa, apresentando uma proposta de instalação em Toledo, com

potencial energético de 50.700 kW, potencial econômico de 8.900 kW, e um custo de produção de eletricidade de R\$ 80,00/MWh. Além disso, há outros estudos que analisam a produção agrícola de biomassa (ANDREA et al., 2014), e o potencial de geração de bioenergia a partir de resíduos urbanos e rurais (FERREIRA et al., 2018). De acordo com Ferreira et al. (2018), o potencial energético do biogás oriundo de dejetos do agronegócio e da vida urbana é de 12.471,4 GWh, o suficiente para prover eletricidade para mais de 4 milhões de pessoas.

A hibridização CSP-bioenergia também é alvo de vários estudos nacionais. Tais estudos afirmam que a hibridização de usinas CSP com biomassa é competitiva, melhora o sistema elétrico nacional, desenvolve a indústria e gera oportunidades de geração de renda e emprego (PEÑAFIEL, 2016). Também destaca-se que tal potencial é grande devido à enorme quantidade de resíduos gerados tanto no setor agrícola, quanto no setor industrial e urbano (FERREIRA et al., 2018). Assim, uma usina híbrida incentiva tanto a sustentabilidade urbana quanto o manejo de resíduos mesmo em lugares onde a DNI é moderada (KAMI, 2019).

Dessa forma, coloca-se como proposta a combinação da radiação solar moderada no município de Pato Branco — quando comparada a áreas de clima árido e semiárido — com as práticas econômicas já vigentes na região para o estabelecimento de uma matriz energética sustentável. Tal esquema, que garante a geração quando a energia solar térmica é insuficiente (HUSSAIN; NORTON; DUFFY, 2017; MOHAGHEGH et al., 2021), é compatível com a escala de áreas tidas como aptas neste trabalho. Uma instalação de no mínimo 50 MWe é recomendada para usinas híbridas, já que o investimento inicial é alto (PRAMANIK; RAVIKRISHNA, 2017). Como já apresentado, há usinas em operação com capacidade nominal de 50 MW, ou mais, em áreas de 2 a 3 km<sup>2</sup>.

#### 4. CONCLUSÕES

Com o aparato das ferramentas dos SIGs utilizados, juntamente com a aplicação dos métodos de processamento de dados, foi possível reunir os PIs – após a imposição da restrição de uso do solo –, com diferentes tipos de informações, em um só resultado: o mapa síntese. Este viabilizou a detecção das áreas mais propícias para a instalação da usina à base de energia solar concentrada, sendo essas majoritariamente próximas aos limites do município, estendendo-se pela extremidade noroeste-sudeste.

A maior parte das áreas em zonas não restritivas apresentou variações de média a alta aptidão para o objetivo do projeto, concentrando resultados mais satisfatórios em uma mancha na região noroeste. Dessa forma, sugere-se a realização de estudos de viabilidade

de econômica e técnica sobre a geração heliotérmica e bioenergética no estado do Paraná, a fim de possibilitar a instalação de uma usina de energia solar concentrada hibridizada com biomassa, aproveitando os recursos disponíveis na região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico - SIGEL. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

ANDREA, M. C. S. et al. Energy Demand in Agricultural Biomass Production in Parana state, Brazil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, p. 42–51, 13 maio 2014.

AZEVÊDO, V.; CANDEIAS, A.; TIBA, C. Location Study of Solar Thermal Power Plant in the State of Pernambuco Using Geoprocessing Technologies and Multiple-Criteria Analysis. *Energies*, v. 10, n. 7, p. 1042, 20 jul. 2017.

AZEVÊDO, V. W. B. ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO DE USINA SOLAR TERMOELÉTRICA NO ESTADO DE PERNAMBUCO. Tese de Doutorado—Recife, PE: Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

BANACLOCHE, S.; HERRERA, I.; LECHÓN, Y. Towards energy transition in Tunisia: Sustainability assessment of a hybrid concentrated solar power and biomass plant. *Science of The Total Environment*, v. 744, p. 140729, 20 nov. 2020.

BANCO MUNDIAL. World Bank Global Environment Facility Program: Assessment of the World Bank/GEF Strategy for the Market Development of Concentrating Solar Thermal Power. Washington, DC, USA: The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, 2006. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/615441468197627671/pdf/The-World-Bank-Group-s-partnership-with-the-Global-Environment-Facility-GEF.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2021.

BANCO MUNDIAL. Concentrating Solar Power: Clean Power on Demand 24/7. Washington, DC, USA: World Bank, 2021.

BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. Principle of Geographic Information Systems. 1 jan. 1998.

CASA CIVIL - PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. 12.651. LEI No 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. . 25 maio 2012.

CATÁLOGO DE METADADOS DA ANA. Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2013. Disponível em: <<https://metadados.snrh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/7bb15389-1016-4d5b-9480-5f1acdadd0f5>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

COT, A. et al. TERMOSOLAR BORGES: A THERMOSOLAR HYBRID PLANT WITH BIOMASS. . In: PROCEEDINGS VENICE 2010, THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY FROM BIOMASS AND WASTE. Environmental Sanitary Engineering Centre, Venice, Italy: CISA, 2010.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO PARANÁ. Mapas Rodoviários. Disponível em: <<http://www.der.pr.gov.br/Pagina/Mapas-Rodoviarios>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

DLR. Solar thermal power plants: Heat, electricity and fuels from concentrated solar power. Colônia, Alemanha: German Aerospace Center (DLR) Institute of Solar Research, maio 2021. Disponível em: <[https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/Study\\_Solar\\_thermal\\_power\\_plants\\_DLR\\_2021-05.pdf](https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/Study_Solar_thermal_power_plants_DLR_2021-05.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2021.

EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2021.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS Pro. Redlands, CA: ESRI, 2021.

FEPESE. ESTUDO DE IMPACTO DE VIZINHANÇA (EIV) DO TERMINAL URBANO DE PATO BRANCO/PR. Pato Branco - PR: FUNDAÇÃO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOCIOECONÔMICOS - FEPESE, fev. 2020. Disponível em: <[http://patobranco.pr.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/00.-EIV\\_TU\\_Pato-Branco\\_Levantamento-e-diagn%C3%B3stico\\_Volume-I\\_vers%C3%A3o-digital.pdf](http://patobranco.pr.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/00.-EIV_TU_Pato-Branco_Levantamento-e-diagn%C3%B3stico_Volume-I_vers%C3%A3o-digital.pdf)>. Acesso em: 13 mar. 2021.

FERREIRA, L. R. A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 94, p. 440–455, 1 out. 2018.

FISCHER, M.; SCHOLTEN, H. J.; UNWIN, D. (EDS.). Spatial Analytical Perspectives on GIS. London: Routledge, 2019.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. APP - Pato Branco, PR. Disponível em: <[http://geo.fbds.org.br/PR/PATO\\_BRANCO/APP/](http://geo.fbds.org.br/PR/PATO_BRANCO/APP/)>. Acesso em: 22 jun. 2021.

GOEPEL, K. D. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, v. 10, n. 3, 6 dez. 2018.

HUSSAIN, C. M. I.; NORTON, B.; DUFFY, A. Technological assessment of different solar-biomass systems for hybrid power generation in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 1115–1129, 1 fev. 2017.

IBGE. Pato Branco - Panorama. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/pato-branco/panorama>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

ILBAHAR, E.; CEBI, S.; KAHRAMAN, C. A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making. *Energy Strategy Reviews*, v. 25, p. 18–33, 1 ago. 2019.

INSTITUTO DE ÁGUA E TERRA. Mapas e Dados Espaciais. Disponível em: <<http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapas-e-Dados-Espaciais>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. Key World Energy Statistics 2020. Paris, França: IEA, ago. 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020#>>.

IPCC. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [s.l.: s.n.]. v. 49

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. London, UK: Cambridge University Press, 2021.

IRENA. Levelized cost of energy by technology, World. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/levelized-cost-of-energy>>. Acesso em: 21 set. 2021.

KAMI, E. C. A. ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR TÉRMICO INTEGRADO À UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. Dissertação de Mestrado—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

LINDBERG, O. et al. PV park site selection for utility-scale solar guides combining GIS and power flow analysis: A case study on a Swedish municipality. *Applied Energy*, v. 282, p. 116086, 15 jan. 2021.

MANN, C. C. The wizard and the prophet: two remarkable scientists and their dueling visions to shape tomorrow's world. First edition ed. New York: Alfred A. Knopf, 2018.

MARQUESINE, M. F. Mapa de aptidão agrícola de Pato Branco. Pato Branco, Paraná, 2020. Resolução espacial: 85m. No prelo.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC). Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs.html>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

MOHAGHEGH, M. R. et al. Latest advances on hybrid solar–biomass power plants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, p. 1–24, 19 mar. 2021.

NREL. Shams 1. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/shams-1>>. Acesso em: 31 out. 2021a.

NREL. Martin Next Generation Solar Energy Center. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/martin-next-generation-solar-energy-center>>. Acesso em: 31 out. 2021b.

NREL. Aste 1A. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/aste-1a>>. Acesso em: 31 out. 2021c.

NREL. Helios I. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/helios-i>>. Acesso em: 31 out. 2021d.

NREL. Helioenergy 1. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/helioenergy-1>>. Acesso em: 31 out. 2021e.

PEÑAFIEL, R. A. S. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA FORMULAÇÃO DE POLÍTICA PARA O DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA HELIOTÉRMICA NO BRASIL. Doutorado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

PIMENTA, L. B. et al. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. *Interações (Campo Grande)*, v. 20, p. 407–420, 8 ago. 2019.

POWELL, K. M. et al. Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 215–237, 1 dez. 2017.

PRAMANIK, S.; RAVIKRISHNA, R. V. A review of concentrated solar power hybrid technologies. *Applied Thermal Engineering*, v. 127, p. 602–637, 25 dez. 2017.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS3.18.2 with GRASS 7.8.5. [s.l.] QGIS Association, 2021.

REN21. Renewables 2021: Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat: Renewables Now, 2021.

RODRIGUES, S.; COELHO, M. B.; CABRAL, P. Suitability Analysis of Solar Photovoltaic farms: A Portuguese Case Study. *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, v. 7, n. 1, p. 12, 2017.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process— what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, v. 9, n. 3, p. 161–176, 1 jan. 1987.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1 jun. 1977.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research, Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications*. v. 48, n. 1, p. 9–26, 5 set. 1990.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

SALES, F. A. et al. Biomass of elephant grass and leucaena for bio-energy production. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 36, n. 6, p. 3567, 9 dez. 2015.

SECRETARIA NACIONAL DE ASSISTÊNCIA SOCIAL - SNAS. SUAS 10. Diversidade no SUAS: realidade, respostas, perspectivas. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome, 2015. Disponível em: <[https://amures.org.br/uploads/1521/arquivos/1713549\\_Suas10Anos\\_2015.pdf](https://amures.org.br/uploads/1521/arquivos/1713549_Suas10Anos_2015.pdf)>. Acesso em: 6 nov. 2021.

SOARES, J. et al. Evaluation of the performance of hybrid CSP/bio-mass power plants. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 13, n. 4, p. 380–387, 1 dez. 2018.

SOLARGIS. Tech Specs - Solar data behind the maps. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/tech-specs>>. Acesso em: 23 jun. 2021.

SORDI, A.; SOUZA, S. N. M. DE; OLIVEIRA, F. H. DE. Biomassa gerada a partir da produção avícola na região Oeste do Estado do Paraná: uma fonte de energia. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 27, n. 2, p. 183–190, 2005.

VALERIANO, M. DE M. TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS GEOMORFOLÓGICOS LOCAIS INPE, , 2008. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

## AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO TIPO DE AEROGERADOR E DA ALTURA DE INSTALAÇÃO SOBRE OS PARÂMETROS ENERGÉTICOS DE UM PARQUE EÓLICO

Clinton Pereira da Silva<sup>1</sup>  
Gilberto Calderucci Gontijo Costa<sup>1</sup>  
Pedro Leite de Souza<sup>1</sup>  
Michael Jourdain Gbedjinou<sup>1</sup>  
Ivan Felipe Silva dos Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.698

### RESUMO

Diante da necessidade de se diversificar a matriz energética, a energia eólica tem sido bastante utilizada, especialmente no Nordeste do Brasil, região com alto potencial de ventos no país. Diversos são os fatores que influenciam um aproveitamento de energia eólica, dentre os quais estão o regime de ventos, a rugosidade do terreno, o tipo do aerogerador, a altura de instalação dele, dentre outros. Neste contexto, o presente estudo trata do estudo energético de um parque eólico na cidade de Maxaranguape-RN, em função dos fatores de influência. Para isso, foram estudados dois cenários. No primeiro caso, os cálculos dos parâmetros fator de capacidade, energia produzida e potência foram realizados mediante a variação da altura para um único modelo de aerogerador. Já no Cenário 2, a altura do gerador foi fixada, e os mesmos cálculos foram conduzidos para três modelos de aerogeradores. Os resultados demonstraram que o aumento da eletricidade gerada pelo parque eólico ocorre em uma proporção bem inferior ao aumento da altura delas. Além disso, a elevação da potência do aerogerador resultou em uma redução do fator de capacidade obtido. Os resultados obtidos permitiram a obtenção de uma série de conclusões sobre o impacto dos parâmetros estudados sobre o potencial eólico local.

Palavras-chave: Aerogerador; Altura de instalação; Energia eólica; Parque eólico.

### ABSTRACT

Due to the need to diversify the energy matrix, wind energy has been widely used, especially in Northeast Brazil, which has high wind potential. There are several factors that influence the use of wind energy as: wind regime, ground roughness, the type of wind turbine

and its installation height. In this context, the present study deals with the energy study of a wind farm in the city of Maxaranguape-RN, considering the influencing factors. For this, two scenarios were studied. In the first case, the calculations of the capacity factor, energy produced and power parameters were performed by varying the height for a single wind turbine model. In scenario 2 the generator height was fixed, and the same calculations were carried out for three wind turbine models. The results showed that the increase in electricity generated in the wind farm occurs at a much lower proportion than the increase in height. In addition, the increase in wind turbine power resulted in a reduction of the capacity factor. The results allowed us to get a series of conclusions about the impact of the studied parameters on the local wind energy potential.

Keywords: Wind turbine; Installation height; Wind energy; Wind farm.

## 1. INTRODUÇÃO

Há milhares de anos a energia dos ventos é utilizada pela humanidade, principalmente em atividades agrônomas, movimentação de embarcações, bombeamento de água, etc. Em tempos modernos, os novos desafios envolvem também suprir a demanda energética sem agredir o meio ambiente. Nesse contexto, a energia eólica se encaixa como uma opção de energia alternativa e renovável, sendo mais limpa que as fontes convencionais, no que tange as emissões de carbono, e abundante em grande parte do globo. Já que ela se origina da diferença no aquecimento da superfície terrestre pela radiação, lugares com maior incidência radioativa e fortes ventos tendem a ter um grande potencial para a instalação de parques eólicos (DALMAZ et al., 2008).

Diversos países passaram a investir na geração de energia eólica após a primeira grande crise do petróleo. Tal fonte era vista como uma fonte de energia viável e de grande potencial de aproveitamento, principalmente na Alemanha, Dinamarca, Espanha e Estados Unidos (USDOE, 2016). Tal potencial se confirmou e atualmente o crescimento da energia eólica no mundo é cada vez mais expressivo. Até 2016, a potência eólica instalada globalmente era igual a 52.7 GW. Em 2020, essa potência instalada superou os 90 GW, um crescimento de mais de 70% em quatro anos (GWEC, 2021).

No Brasil, os primeiros sensores especiais responsáveis por medir o potencial eólico foram instalados no Ceará e Fernando de Noronha, em 1990. De longe, a região Nordeste é a de melhor potencial para a aplicação dessa tecnologia de geração de energia, já que principalmente na costa litorânea observa-se fortes e constantes ventos durante todas as estações do ano (ALVES, 2009). Segundo Mendonça et al. (2019), o potencial eólico brasileiro se divide entre

75,0 GW na região Nordeste, 22,8 GW na região Sul, 12,8 GW nas regiões Sudeste e Norte e 3,1 GW na região Centro-Oeste, sendo, portanto, concentrado na região Nordeste.

Atualmente, a geração eólica no Brasil é superior a 57 TWh/ano, valor corresponde a cerca de 9% da eletricidade do país (EPE, 2021). O custo desses empreendimentos também tem sido reduzido ao longo dos anos, caindo de valores de cerca de 1500 a 2000 USD/kW para valores entre 500 e 1200 USD/kW entre 2009 e 2019 (CATA-RINA, 2022), o que favorece ainda mais o desenvolvimento dessas usinas no Brasil.

O componente responsável pela conversão da energia eólica em energia elétrica é a turbina eólica, ou aerogerador. A composição das turbinas eólicas pode variar dependendo da forma como o projeto foi realizado, porém três componentes principais sempre estão presentes: o rotor, o eixo e o gerador. Segundo Tolmasquim (2016), o rotor representa o conjunto das pás com o cubo, sendo que o cubo é o suporte das pás e seus sistemas de controle. Neste trabalho serão consideradas turbinas axiais (nas quais os eixos são paralelos à velocidade do vento) devido ao maior rendimento dessas (BOTAN et al., 2016).

Para os cálculos relacionados ao potencial energético de um parque eólico, diversos parâmetros devem ser considerados. A rugosidade do terreno, a altura do aerogerador, o tipo de aerogerador, o regime de ventos, dentre outros, são fatores que influenciam no aproveitamento eólico de uma região (como pode ser observado nos cálculos de RAIMUNDO; SANTOS, 2015). Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar o impacto de dois fatores de influência sobre as grandezas energéticas de uma usina eólica, a saber, a altura e o tipo de aerogerador, sendo também construídas discussões acerca da relação entre essas grandezas e o potencial eólico estimado.

## 2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse estudo foi selecionada uma cidade da região do Nordeste brasileiro com potencial para geração eólica. A escolha da região Nordeste se deve ao fato dessa ser a região com maior potencial eólico no país, como visto na introdução. Nesse sentido, considerou-se dois cenários distintos. Primeiramente, os cálculos foram realizados considerando cinco alturas de operação diferentes para um mesmo modelo de um aerogerador. No Cenário 2, não houve variação da altura e foram variados apenas os modelos dos aerogeradores. Para ambos os casos foram calculados a potência, a energia produzida e o fator de capacidade. Os dados de regime de vento da cidade foram utilizados para a avaliação do impacto do tipo de aerogerador e da altura de instalação sobre os parâmetros energéticos

de um parque eólico. Os tópicos 2.1 a 2.4 apresentam detalhadamente os passos necessários para os cálculos do presente trabalho.

## **2.1 Caracterização da área de estudo e seleção dos dados de vento**

A cidade analisada neste artigo foi a cidade de Maxaranguape-RN. A escolha dessa cidade se deve somente ao fato de esta ser uma cidade localizada no Nordeste (região que se pretendia estudar) e possuir elevadas velocidades médias de vento.

De acordo com o site da Prefeitura Municipal de Maxaranguape-RN, o município está localizado no litoral norte do estado do Rio Grande do Norte, apresenta uma população de 10.442 habitantes (de acordo com o censo realizado pelo IBGE no ano de 2010), ocupa uma área territorial de 131,3 km<sup>2</sup>, possui uma densidade demográfica de 79,51 hab/km<sup>2</sup> e fica a 54 km de distância da capital Natal.

Os dados dos ventos que atuam na região de Maxaranguape-RN foram coletados a partir da plataforma do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB, 2021). A velocidade média ( $V$ ) dos ventos durante o ano, a uma altura de 50 metros de altura, foi de 8,14 m/s. Os parâmetros da distribuição de Weibull obtidos,  $c$  (parâmetro de escala) e  $k$  (parâmetro de forma), são 9,18 e 2,4, respectivamente.

As curvas dos aerogeradores utilizadas nos cálculos foram retiradas do catálogo de aerogeradores do fabricante ENERCON (ENERCON, 2021), devido a elevada disponibilidade de dados em seus catálogos para diferentes tipos de aerogeradores e alturas de instalação.

## **2.2 Distribuição de Weibull**

A distribuição de probabilidade de Weibull tem sido amplamente utilizada para determinar a distribuição das velocidades de vento associadas à estimativa do potencial eólico (como por exemplo, nos trabalhos de RAIMUNDO; SANTOS, 2015 e GOMES et al., 2019). Desse modo, os parâmetros de tal distribuição para descrever a velocidade do vento estarão associadas as características do regime de vento previsto para a região. A equação 1 apresenta a função de densidade de probabilidade aplicada a velocidade do vento (GOMES et al., 2019):

$$F = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

$F$  = Frequência de ocorrência da velocidade de vento;

$V$  = Variável aleatória. No caso, a velocidade do vento, em m/s;

$k$  = Fator de forma;

$c$  = Fator de escala, em m/s.

Como este estudo avalia diferentes alturas de aerogerador, é necessário a realização da transposição da velocidade do vento e dos parâmetros  $c$  e  $k$  para diferentes alturas, o que foi realizado pelas equações 2 a 5 (CUSTÓDIO 2009, apud SANTOS, 2015). Para todos os casos estudados neste trabalho, o valor de rugosidade foi fixo, sendo o valor adotado igual 0,05 m (FADIGAS, 2017).

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (2)$$

$$c_2 = c_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n \quad (3)$$

$$n = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_1)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (4)$$

$$k_2 = k_1 \left( \frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)} \right) \quad (5)$$

Onde:

$z_0$  = Rugosidade do terreno = 0,05 m (FADIGAS, 2017),  $h$  = altura da torre do aerogerador, índice 1 = índice referente à altura de origem dos dados medidos e índice 2 = índice referente à altura de instalação a torre e transposição do vento.

### 2.3 Cálculos energéticos

Para o cálculo da energia, foi utilizada a equação (6), constituída pela soma dos valores de potência do aerogerador (retiradas da curva do aerogerador – ENERCON, 2021) multiplicados pela Frequên-

cia de Weibull, para cada valor de velocidade do vento da curva do aerogerador (RAIMUNDO; SANTOS, 2015).

$$E = \sum P_i \cdot F_i \cdot 8760 \quad (6)$$

$E$  = Energia, em kWh/ano;

$P$  = Potência do aerogerador para determinada velocidade do vento, em kW;

$F$  = Frequência de Weibull para determinada velocidade do vento.

Para que fosse possível realizar o cálculo fator de capacidade, foi utilizada a equação (7), que depende da energia calculada pela equação (6) e da potência máxima do aerogerador, selecionado no já mencionado catálogo do fabricante.

$$F_C = \frac{E}{(P_{Máx} \cdot 8760)} \quad (7)$$

$F_C$  = Fator de Capacidade;

$E$  = Energia, em kWh/ano;

$P_{Máx}$  = Potência máxima do aerogerador.

Por fim, foi utilizada a equação (8) para calcular a potência total instalada, que depende da potência máxima do aerogerador selecionado e do número de aerogeradores do parque eólico.

$$P_T = P_{Máx} \cdot n \quad (8)$$

$P_T$  = Potência total, em kW;

$P_{Máx}$  = Potência máxima do aerogerador;

$n$  = Número de aerogeradores.

As áreas dos parques eólicos também serão calculadas utilizando as distâncias sugeridas por Pinto (2013) para não interferência

de um aerogerador ao outro, sendo iguais a três vezes o diâmetro do rotor, lateralmente, e cinco a sete vezes o diâmetro do rotor, verticalmente.

## 2.4 Cenários Estudados

Para este estudo foram elaborados dois cenários principais. A ideia principal é comparar ambos os cenários para descobrir o impacto que as diferentes características de cada um deles tem no funcionamento, rendimento e elaboração do parque eólico.

Cenário 1: nesse cenário, foi escolhido um único modelo de aerogerador; esse modelo foi selecionado através do catálogo da empresa ENERCON (2021), que contém diversos tipos de aerogeradores com características e especificidades distintas, cada um adequado para um determinado local.

A ideia para esse cenário foi variar a altura e calcular todos os parâmetros citados anteriormente, no tópico 2.3. Para isso, foi necessário encontrar um modelo que disponibilizasse uma gama de diferentes alturas que pudesse suprir essa proposta. Visto isso, foi escolhido o modelo de aerogerador conhecido por ENERCON E-92, na versão de 2350 kW. Esse modelo dispunha de seis diferentes alturas, sendo que, delas, cinco foram escolhidas para se desenvolver o estudo, sendo elas 78, 85, 104, 108, 138 metros. A escolha dessas alturas foi feita de modo que se tivesse distâncias minimamente razoáveis entre as alturas utilizadas, a fim de que as diferenças entre os resultados obtidos pudessem ser mais visíveis.

O aerogerador escolhido tem um rotor com diâmetro de 92 metros e uma área varrida de 6648 m<sup>2</sup>. Para esse modelo, a velocidade de estabilização foi de 14 m/s, ou seja, a potência nominal de 2350 kW é alcançada justamente à essa velocidade, fazendo com que qualquer valor de velocidade de vento maior que 14 m/s tenha exatamente a mesma potência.

Optou-se por considerar nas análises um parque eólico com 10 aerogeradores. Como há cinco diferentes alturas analisadas, o cálculo referente à energia total do parque eólico deverá ser feito cinco vezes, para cada altura.

Cenário 2: De forma análoga ao Cenário 1, foram calculados o fator de capacidade, energia produzida e a potência. Nesse caso, foram selecionados três modelos da ENERCON. A ideia central nessa etapa é variar o modelo e manter a altura do cubo. Os aerogeradores selecionados foram: ENERCON E-115, com potência nominal de 3.000 kW, o ENERCON E-126 (EP4), 4.200 kW e o ENERCON E-126, 7.580 kW, de modo que se tivesse uma potência crescente. A altura do cubo é de 135 m para os três modelos escolhidos. Além das características

descritas, os modelos citados possuem, respectivamente, área de varredura equivalente a 10.515,5 m<sup>2</sup>, 12.668 m<sup>2</sup> e 12.668 m<sup>2</sup>.

Como no Cenário 1, optou-se por considerar em cada parque eólico 10 aerogeradores, sendo realizadas simulações de potencial energético utilizando três diferentes modelos de aerogeradores (valor um pouco inferior ao do primeiro cenário, no qual foram realizadas cinco simulações).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os mais relevantes resultados envolvendo ambos os cenários, juntamente com as comparações dos resultados obtidos entre eles.

#### 3.1 Resultados do Cenário 1

Os valores iniciais retirados do sistema do CRESESB (2021) para a cidade de Maxaranguape são: i) Velocidade média do Vento: 7,77 m/s; ii) Fator c: 8,44 e iii) Fator k: 2,83. Através desses fatores e das equações 2 a 5, foi possível calcular todos os valores transpostos. A seguir é apresentada a Tabela 1, contendo todos os valores utilizados nos cálculos da curva de Weibull e no cálculo de energia.

Tabela 1 – Valores base utilizados nos cálculos da Curva de Weibull e cálculos de energia

Parâmetros	Valores calculados				
H2(m)	78	85	104	108	138
H1(m)	50	50	50	50	50
V altura (m/s)	8,27	8,37	8,59	8,64	8,91
Fator n	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
k transposto	2,97	2,99	3,06	3,07	3,16
c transposto	9,57	9,74	10,16	10,24	10,78

Com todos esses valores já determinados, foi possível finalmente encontrar os valores da Frequência de Weibull e da Energia em kWh por ano. A Tabela 2 apresenta esses resultados.

Tabela 2 – Valores da frequência de Weibull e energia para cada velocidade e potência do catálogo da ENERCON

Curva aerogerador		Freq. Weibull (78 m)	Energia em (kWh/ano)	Freq. Weibull (85 m)	Energia em (kWh/ano)	Freq. Weibull (104 m)	Energia em (kWh/ano)	Freq. Weibull (108 m)	Energia em (kWh/ano)	Freq. Weibull (138 m)	Energia em (kWh/ano)
V (m/s)	P (kW)	F	E	F	E	F	E	F	E	F	E
1	0	0,003656	0	0,003286	0	0,002536	0	0,002413	0	0,001727	0
2	3,6	0,014156	446,42342	0,012978	409,287806	0,010509	331,415358	0,010091	318,217975	0,007678	242,136051
3	29,9	0,030708	8043,05348	0,02852	7470,10283	0,023817	6238,19602	0,023002	6024,87976	0,018192	4764,89691
4	98,2	0,051762	44527,129	0,048604	41810,5382	0,041645	35824,3839	0,040415	34766,3077	0,032982	28372,4408
5	208,3	0,07478	136451,622	0,070967	129494,761	0,062322	113719,488	0,060758	110865,314	0,051062	93172,2863
6	384,3	0,096373	324435,162	0,09248	311330,321	0,083311	280464,001	0,081602	274709,673	0,070659	237871,948
7	637	0,112842	629668,85	0,109595	611554,306	0,101485	566295,874	0,099904	557477,925	0,089312	498370,555
8	975,8	0,121046	1034702,69	0,119135	1018367,06	0,11371	971992,502	0,11256	962162,557	0,1042	890702,576
9	1403,6	0,119329	1467211,47	0,119185	1465439,78	0,117636	1446399,21	0,117161	1440560,14	0,112727	1386039,64
10	1817,8	0,108117	1721639,03	0,109756	1747752,89	0,112427	1790273,16	0,112734	1795173,11	0,113207	1802694,75
11	2088,7	0,089873	1644398,86	0,092884	1699493,42	0,099118	1813564,78	0,100136	1832190,34	0,105424	1928946,38
12	2237	0,068339	1339174,12	0,072025	1411418,73	0,080388	1575288,93	0,081884	1604606,09	0,090813	1779582,31
13	2300	0,047356	954133,85	0,050985	1027247,52	0,059757	1203978,34	0,061418	1237444,6	0,072107	1452810,49
14	2350	0,029777	612986,609	0,032804	675309,149	0,040539	834529,566	0,042073	866122,206	0,052553	1081846,03
15	2350	0,016909	348088,138	0,019093	393057,043	0,024978	514201,852	0,026198	539302,242	0,034989	720278,287
16	2350	0,008628	177615,397	0,010002	205907,988	0,013907	286287,716	0,014751	303661,011	0,021171	435816,037
17	2350	0,003935	81011,2689	0,004691	96572,1528	0,006959	143251,229	0,00747	153777,094	0,011577	238330,9
18	2350	0,001596	32849,652	0,001959	40328,228	0,003112	64058,4422	0,003383	69644,3164	0,005689	117117,577
19	2350	0,000572	11776,7996	0,000724	14910,7866	0,001236	25451,7435	0,001362	28043,9434	0,002497	51407,0946
20	2350	0,00018	3711,77484	0,000236	4853,25342	0,000434	8931,85092	0,000485	9980,59012	0,000973	20030,7678
21	2350	4,97E-05	1022,59995	6,72E-05	1382,52826	0,000134	2751,80199	0,000152	3120,24427	0,000334	6884,80078
22	2350	1,19E-05	244,841011	1,66E-05	342,656998	3,59E-05	739,726665	4,14E-05	851,614692	0,000101	2073,91352
23	2350	2,5E-06	50,6499737	3,6E-06	73,4513333	8,4E-06	172,422652	9,8E-06	201,645609	2,64E-05	543,913029
24	2350	4E-07	8,9998576	7E-07	13,5357643	1,7E-06	34,6294791	0,000002	41,1586881	0,000006	123,366027
25	2350	1E-07	1,3654751	1E-07	2,131472	3E-07	5,9546877	3E-07	7,1956295	1,2E-06	24,0345052

Pelos resultados da Tabela 2, nota-se que a Frequência de Weibull para alturas de 78 e 85 tem valores crescentes até uma velocidade igual a 8 m/s, passando a ser decrescentes a partir desse ponto. A energia se comporta de maneira parecida, com o detalhe de começar a decrescer somente na velocidade de 10 m/s. Sendo assim, é possível perceber qual a melhor velocidade para cada uma das alturas e qual o respectivo valor de energia passível de ser produzida anualmente por essa velocidade em cada um dos casos estudados, como exposto a seguir:

- 78 e 85 metros de altura: velocidade com maior produção de energia = 10m/s, com produções energéticas de 1.721.639 kWh/ano e 1.747.752,89 kWh/ano;

- 104, 108 e 138 metros de altura: velocidade com maior produção de energia = 11 m/s, com produções energéticas de 1.813.564 kWh/ano, 1.832.190,34 kWh/ano e 1.928.946 kWh/ano.

Nota-se, por esses resultados, a influência que a variação de altura teve nesse ponto de geração ideal, já que quando ela varia a energia gerada e a velocidade em que esse ponto se encontra também se alteram. Esse comportamento é ainda mais visível nos gráficos das Figuras 1 e 2, pois eles contêm justamente curvas que representam o comportamento da Frequência de Weibull e a geração de energia, em função da velocidade, respectivamente.

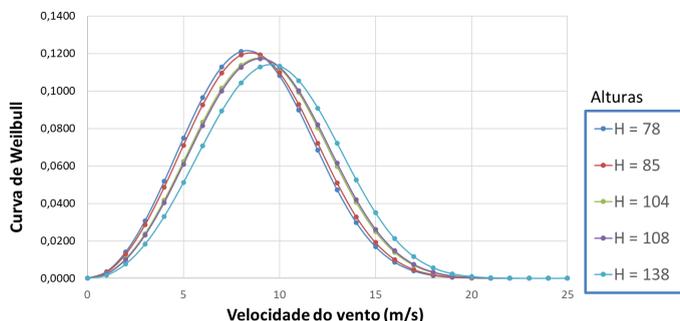


Figura 1 - Comportamento das curvas de Weibull para cada altura em função da velocidade do vento

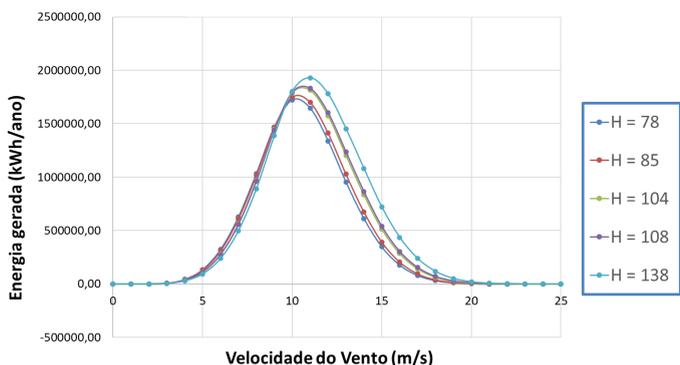


Figura 2 - Comportamento das curvas de energia em cada altura, em função da velocidade do vento

Nota-se pela Figura 1 que as curvas de menor altura apresentam picos de frequências maiores, mas são pior distribuídas ao longo das velocidades de vento. Já as curvas de Weibull para alturas maiores, atingem picos menores de frequência  $F$ , mas são melhor distribuídas ao longo das velocidades de vento, devido ao fato de atingirem velocidades mais altas. Assim sendo, pode-se dizer que a variação de altura está diretamente ligada à permanência da Curva de Weibull, influenciando seu comportamento de forma inversamente proporcional.

Já na Figura 2, o comportamento da geração de energia se difere da curva de frequência de Weibull (Figura 1) justamente pela maneira que é influenciada pela variação da altura, dado que as curvas de maiores alturas resultam em picos maiores de geração de energia. Assim, em termos energéticos, a definição de alturas de aerogeradores mais elevadas é mais vantajosa. Contudo, torres mais altas impactam também o custo dessas estruturas. Por essa razão, estudos econômicos que investiguem a viabilidade econômica dos parques eólicos em função da altura do aerogerador são necessários.

O arranjo escolhido para esse parque eólico é de duas linhas, ambas de frente para o vento. Cada uma das linhas terá cinco aerogeradores, totalizando os 10 propostos. A distância lateral entre cada um dos cinco aerogeradores será de 276 metros (três vezes o diâmetro do rotor), enquanto a distância frontal entre a primeira e a segunda linha será de 460 metros (cinco vezes o diâmetro do rotor) (conforme as distâncias sugeridas por PINTO, 2013).

Considerando que entre cada aerogerador, lateralmente, há quatro espaços, a distância total lateralmente é de 1104 metros. Sendo assim a área do parque referente ao Cenário 1 se dá pela simples multiplicação do comprimento lateral e do comprimento frontal, sendo igual a 507.840 m<sup>2</sup>. A potência instalada total é obtida pela multiplicação entre a soma da potência de cada aerogerador pelo número de aerogeradores, sendo igual a 23.500 kW. Tem-se, portanto, uma densidade de potência de 46,2 W/m<sup>2</sup>.

A Tabela 3 apresenta os resultados energéticos calculados para o parque estudado. Por esta, observa-se que um aumento da altura de 60 m (aumento de 77%) resulta em um aumento de 22 GWh/ano na geração total do parque eólico (aumento de cerca de 20%). Tem-se então que o aumento na altura da torre não implica aumento proporcional da energia produzida. O fator de capacidade também aumenta com o aumento da altura das turbinas eólicas, o que pode ser facilmente compreendido pela equação 7, dado que se tem um aumento da energia produzida sem a elevação da potência instalada. Assim, para o local e para o aerogerador escolhido, tem-se uma melhor utilização do recurso natural com o aumento da altura dos parques. Os elevados valores de fator de capacidade encontrados podem ser

explicados pela elevada média de velocidade do vento no local, igual a 7,7 m/s.

Tabela 3 - Resultados energéticos em função da altura do aerogerador

Tipo de aerogerador	Altura (m)	F <sub>c</sub>	Energia total dos 10 aerogeradores (GWh/ano)
E-92	78	0,5136	105,74
	85	0,5297	109,05
	104	0,5676	116,85
	108	0,5747	118,31
	138	0,6207	127,78

### 3.2 Resultados do Cenário 2

Como mencionado anteriormente, este cenário é desenvolvido com três modelos distintos de Aerogeradores, e todos operando em uma altura fixa de 135 metros. Dessa forma, foi necessário calcular a Frequência de Weibull, e o valor de Energia por ano para cada um dos modelos. Os mesmos dados iniciais obtidos junto ao CRESESB (2021), já mencionados anteriormente, foram utilizados para o cálculo da velocidade média, do fator de escala e do fator de forma transpostos para a altura estudada, de 135 m (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores base utilizados nos cálculos da Curva de Weibull e da energia

Parâmetros	Valor calculado
H2(m)	135
H1(m)	50
V altura (m/s)	8,77
Fator n	0,21
k transposto	3,15
c transposto	10,42

Após determinar esses valores, foi possível realizar o cálculo da Frequência de Weibull e da energia, em kWh, gerada em um ano. Para cada valor de velocidade existe um valor de potência relacionado, e todos esses valores podem ser encontrados no já citado catálogo de

aerogeradores utilizado (ENERCON, 2021). Como já mencionado, os tipos de aerogeradores usados foram: ENERCON E-115, (3.000 kW), ENERCON E-126 (EP4) (4.200 kW) e o ENERCON E-126 (7.580 kW). Na Tabela 5, estão dispostos todos os valores calculados de Frequência de Weibull e de energia para cada aerogerador em questão.

Ao se analisar os valores obtidos da Tabela 5, é possível notar que os valores encontrados de energia aumentam à medida que a potência nominal dos aerogeradores também aumenta. Já a Frequência de Weibull não se altera, isso porque a altura para os três tipos de aerogeradores é igual. A Frequência de Weibull varia da mesma forma para os três aerogeradores e pode-se observar que ela apresenta valores crescentes até 9 m/s, sendo que velocidades superiores a essa têm valores de energia decrescentes. A energia varia de modo similar para os três tipos de aerogeradores, contando com valores crescentes até a velocidade de 11 m/s, a partir dos quais começam a decrescer.

Tabela 5 – Valores da frequência de Weibull e energia para cada velocidade e potência do catálogo da ENERCON

Curva aerogerador E-115		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)	Curva aerogerador E-126 (EP4)		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)	Curva aerogerador E-126		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)
V (m/s)	P (kW)			V (m/s)	P (kW)			V (m/s)	P (kW)		
1	0	0,001953182	0	1	0	0,001953182	0	1	0	0,001953182	0
2	3	0,00863154	226,8368592	2	0	0,00863154	0	2	0	0,00863154	0
3	48,5	0,020353612	8647,435757	3	58	0,020353612	10341,26338	3	55	0,020353612	9806,370446
4	155	0,036702801	49835,06296	4	185	0,036702801	59480,55902	4	175	0,036702801	56265,39367
5	339	0,05642382	167558,4316	5	400	0,05642382	197709,0638	5	410	0,05642382	202651,7904
6	627,5	0,077348337	425176,0758	6	745	0,077348337	504790,7194	6	760	0,077348337	514954,291
7	1035,5	0,09655316	875831,7856	7	1200	0,09655316	1014966,821	7	1250	0,09655316	1057257,105
8	1549	0,110835172	1503949,054	8	1790	0,110835172	1737939,836	8	1900	0,110835172	1844740,608
9	2090	0,117459417	2150493,988	9	2450	0,117459417	2520914,005	9	2700	0,117459417	2778150,128
10	2580	0,1149749	2598524,71	10	3120	0,1149749	3142401,975	10	3750	0,1149749	3776925,45
11	2900	0,103774107	2636277,411	11	3660	0,103774107	3327163,906	11	4850	0,103774107	4408946,705
12	3000	0,086096763	2262622,932	12	4000	0,086096763	3016830,576	12	5750	0,086096763	4336693,954
13	3000	0,065388669	1718414,22	13	4150	0,065388669	2377139,671	13	6500	0,065388669	3723230,81
14	3000	0,045240444	1189918,858	14	4200	0,045240444	1664486,401	14	7000	0,045240444	2774144,001
15	3000	0,028360547	745315,1677	15	4200	0,028360547	1043441,235	15	7350	0,028360547	1826022,161
16	3000	0,016015418	420885,1725	16	4200	0,016015418	589239,2416	16	7500	0,016015418	1052212,931
17	3000	0,008097038	212790,1668	17	4200	0,008097038	297906,2335	17	7580	0,008097038	537649,8215
18	3000	0,003641581	95700,74415	18	4200	0,003641581	133981,0418	18	7580	0,003641581	241803,8802

Tabela 5 – Valores da frequência de Weibull e energia para cada velocidade e potência do catálogo da ENERCON (cont.)

Curva aerogerador E-115		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)	Curva aerogerador E-126 (EP4)		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)	Curva aerogerador E-126		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)
V (m/s)	P (kW)			V (m/s)	P (kW)			V (m/s)	P (kW)		
19	3000	0,001447254	38033,82277	19	4200	0,001447254	53247,35188	19	7580	0,001447254	96098,7922
20	3000	0,000504805	13266,28809	20	4200	0,000504805	18572,80332	20	7580	0,000504805	33519,4879
21	3000	0,000153459	4032,905977	21	4200	0,000153459	5646,068367	21	7580	0,000153459	10189,8091
22	3000	4,03696E-05	1060,914059	22	4200	4,03696E-05	1485,279682	22	7580	4,03696E-05	2680,576189
23	3000	9,1235E-06	239,7656778	23	4200	9,1235E-06	335,6719489	23	7580	9,1235E-06	605,8079459
24	3000	1,7584E-06	46,21071919	24	4200	1,7584E-06	64,69500687	24	7580	1,7584E-06	116,7590838
25	3000	2,86869E-07	7,538922303	25	4200	2,86869E-07	10,55449122	25	7580	2,86869E-07	19,04834369

As Figuras 3 e 4, a seguir, apresentam o comportamento detalhado da frequência de Weibull e da energia produzida pelo parque eólico em função da velocidade do vento. Por estas nota-se o elevado impacto das potências dos aerogeradores sobre a curva de produção de energia. Pela Figura 4, é possível verificar também que o modelo de aerogerador que mais gera energia é o E – 126. Diferentemente da análise anterior, na qual as alturas dos aerogeradores foram alteradas, não foi verificada variação da velocidade de maior produção energética entre os tipos de aerogeradores neste cenário.

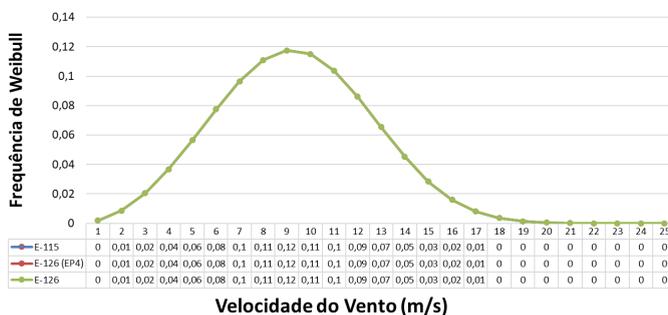


Figura 3 - Comportamento das curvas de Weibull para cada altura em função da velocidade do vento

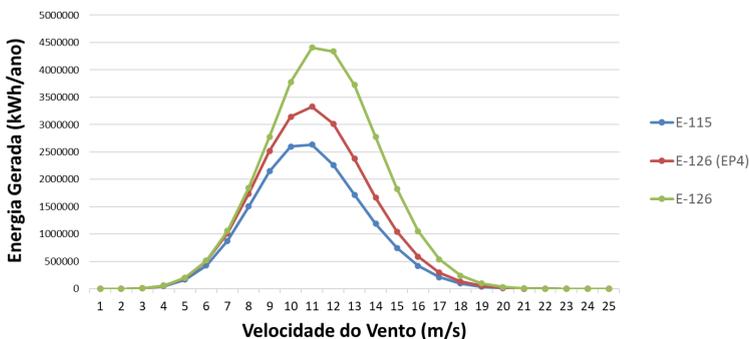


Figura 4 - Comportamento das curvas de energia em cada altura em função da velocidade do vento

Se considerarmos o aerogerador E-126, de maior produção energética, é possível determinar a área do parque eólico, já que cada uma das 10 unidades do modelo E – 126 tem o mesmo diâmetro do rotor, igual a 127 metros. O arranjo adotado para esse parque será exatamente igual ao do Cenário 1, com duas linhas, ambas de frente para o vento. Cada uma das linhas terá cinco aerogeradores, totalizando os 10 propostos. A distância lateral entre cada um dos cinco aerogeradores será de 381 metros enquanto a distância frontal entre a primeira e a segunda linha será de 635 metros. Considerando que entre cada aerogerador, lateralmente, há quatro espaços, a distância total lateral é de 1524 metros. A área do parque eólico para compor o Cenário 2 pode ser então calculada por essas dimensões, sendo igual a 967.740 m<sup>2</sup>, valor 90% superior ao do cenário anterior. A potência instalada também é bastante superior ao do cenário anterior, sendo igual a 75.800 kW, o que resulta em uma densidade de potência de 78,32 kW/m<sup>2</sup>, valor quase 70% superior ao do cenário anterior. Por esses resultados, observa-se que o uso do aerogerador E-126, apesar de implicar custos mais elevados devido ao maior porte do aerogerador, possui melhor desempenho em termos energéticos e utiliza melhor a potência disponível na região, apresentando uma densidade de potência extraída por m<sup>2</sup> bem superior ao primeiro cenário.

A Tabela 6 resume os resultados energéticos do parque eólico para cada um dos tipos de aerogeradores. Verifica-se nessa tabela uma diminuição do fator de capacidade em função da potência do aerogerador escolhido. Esse comportamento é esperado, dado que a energia produzida pelo parque não cresce de modo linear com o aumento da potência (veja equação 7). Esse resultado mostra também que não necessariamente a opção de maior fator de capacidade resul-

tará em maior produção de energia. A instalação de uma potência inferior pode ser menos afetada pelas variações anuais do vento (o que leva a um maior fator de capacidade), sendo, contudo, menor do que a real disponibilidade local, subutilizando o potencial eólico da região.

Tabela 6 - Resultados energéticos em função do tipo de aerogerador

Tipo de aerogerador	Fator de capacidade	Energia total em GWh/ano	Potência total em kW
E-115	0,6513	171,18	30.000
E-126(EP4)	0,5902	217,18	42.000
E-126	0,4410	292,85	75.800

#### 4. CONCLUSÃO

O presente artigo apresenta uma análise do potencial eólico de uma cidade do Nordeste Brasileiro em função de considerações da altura e dos tipos de aerogeradores de um parque eólico. Os resultados obtidos demonstraram a forte influência desses fatores sobre o potencial energético passível de ser aproveitado na região estudada.

A análise do impacto da variação da altura dos aerogeradores sobre o potencial energético revelou que a altura do aerogerador impacta no formato das curvas de distribuição de Weibull, sendo que quanto maior é a altura dessa estrutura, menor é a velocidade de vento mais provável na região. Outro resultado relevante identificado foi que o aumento na altura das torres não implicou aumento proporcional da energia produzida. Assim sendo, não se deve esperar um aumento linear da energia passível de ser produzida com o aumento das alturas das torres.

A elevação da potência do aerogerador resultou em uma redução do fator de capacidade obtido, o que leva a conclusão de que o projeto de maior fator de capacidade (que escolhe uma potência menos afetada pelas variações do regime de ventos locais) não é necessariamente o de maior produção de energia.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se: i) a inclusão de estudos econômicos nos resultados do presente estudo, com o fim de verificar qual das opções aqui estudadas é melhor em termos econômicos e, também, verificar as relações entre os parâmetros de viabilidade econômica com os parâmetros energéticos calculados, tais como densidade de potência, fator de capacidade e energia produzida; e ii) a repetição do mesmo procedimento aqui aplicado para regiões ou cidades com parques eólicos já instalados, considerando tipos de ae-

rogeradores comumente utilizados nessas regiões, para que se tenha resultados em uma situação mais próxima da real em um parque eólico já em funcionamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, Guarabira, v. 3, n. 1, p. 166-188, nov. 2009.

BOTAN, A. C. B. TIAGO FILHO, G. L. CAMACHO, R. G. R. DUARTE, P. M. SANTOS, I. F. S. Energia Hidrocinética: Aproveitamento em Correntes de Baixas Velocidades. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Gramado (RS), 2016.

BRASIL. Prefeitura Municipal de Maxaranguape. Desenvolvimento com responsabilidade. 2021. Disponível em: <https://site.maxaranguape.rn.gov.br/>. Acesso em: 07 dez. 2021.

CATARINA, A. S. Wind power generation in Brazil: An overview about investment and scale analysis in 758 projects using the Levelized Cost of Energy. Energy Policy, V. 164, 112830, 2022.

CRESESB. Potencial Eólico - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. 2021. Disponível em: [http://cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas\\_eolico](http://cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico). Acesso em: 07 dez. 2021.

CUSTÓDIO, R. S. Aspectos econômicos da energia eólica. In: CUSTÓDIO, R. S. Energia eólica para produção de energia elétrica. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DALMAZ, A. S. COLLE, S. PASSOS, J. C. Energia Eólica para Geração de Eletricidade e a Importância da Previsão. Revista ABCM - Engenharia, Florianópolis, v. 8, n. 1, p. 53-63, out. 2008.

ENERCON. Linha de produtos ENERCON. 2021. Disponível em: [http://www.wobben.com.br/fileadmin/user\\_upload/ec\\_product\\_br.pdf](http://www.wobben.com.br/fileadmin/user_upload/ec_product_br.pdf). Acesso em: 07 dez. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. BEN - Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese 2021: Ano Base, 2020. 2021.

FADIGAS, E. A. F. A. Energia Eólica. In: Moreira, J. R. S. Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. Rio de Janeiro, LTC - GEN – Grupo editorial nacional, p. 160-186, 2017.

GOMES, M. S. S. PAIVA, J. M. F. MORIS, V. A. S. NUNES, A. O. Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. Energy, V. 185, 327-336, 2019.

GWEC. Global Wind Energy Council. Global Wind Report, 2021.

MENDONÇA, I. M. Prospects for wind power generation in Brazil. Brazil Journal of Development. Curitiba, v. 5, n. 10, p. 18598-18611, out. 2019.

PINTO, M. O. Fundamentos de Energia Eólica. Editora LTC, Rio de Janeiro, 392 p., 2013.

RAIMUNDO, D. R. SANTOS, I. F. S. Estudo de um projeto para geração de energia eólica no Brasil: Viabilidade econômica e emissões evitadas. Revista Brasileira de Energias Renováveis. V. 4, 2015.

SANTOS, P. M. D. Procedimento para prospecção de potencial eólico com auxílio de sistemas de informação geográfica. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia), Universidade Federal de Itajubá (MG), 119 p., 2015.

TOLMASQUIM, M. T. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: 2016.

# OPINIÃO

## A CONTRIBUIÇÃO DE LUIZ PINGUELLI ROSA AO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO NO BRASIL

Emilio Lèbre La Rovere<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro*

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.724

### INTRODUÇÃO

A trajetória de Pinguelli se confunde com o início e consolidação do Planejamento Energético como uma área do conhecimento no Brasil. Naturalmente, sua atuação foi muito além desse campo, incluindo uma participação ativa na vida política do país. Sua reflexão acadêmica se deu também em áreas como a física nuclear, a teoria do conhecimento e as mudanças climáticas, dentre outras. Inclusive participou dos estudos do IPCC, o painel de cientistas que sintetizam periodicamente o estado do conhecimento sobre mudanças climáticas, contribuindo para a obtenção do Prêmio Nobel da Paz do IPCC em 2007, em conjunto com Al Gore. Deixou um grande legado em seus trabalhos acadêmicos e diversos livros publicados, culminando com sua autobiografia, em que narra sua experiência e a sua perspectiva sobre os acontecimentos marcantes da história brasileira que vivenciou (Rosa, 2022). Com efeito, além dessa contribuição científica, Pinguelli não foi um simples espectador dos acontecimentos, mas militou ativamente na mobilização da comunidade científica em defesa da universidade e da pesquisa públicas, na crítica ao programa nuclear brasileiro, na resistência às privatizações e à globalização neoliberal. Teve cinco gestões como diretor da COPPE, foi secretário-executivo do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas e presidiu a Eletrobras, dentre outras atividades que o caracterizaram como um intelectual sempre engajado com as causas nacionais, verdadeiramente “orgânico”, no sentido gramsciano.

Neste trabalho me limitarei a apresentar apenas algumas facetas específicas da contribuição de Pinguelli ao estudo do Planejamento Energético no país e à sua aplicação no debate das opções de política energética, a partir da minha perspectiva pessoal enquanto seu parceiro em inúmeras iniciativas ao longo de pouco mais de 40 anos, desde 1981.

## AS ORIGENS

Até os anos 70 não se falava em Planejamento Energético, mas sim em combustíveis e eletricidade, separadamente. Na França, nos anos 60 os trabalhos pioneiros de Yves Mainguy (Mainguy, 1966) e do IEJE – *Institut Économique de l'Énergie*, principalmente depois que Jean-Marie Martin assumiu sua direção em 1968, começaram a usar o conceito de “Economia da Energia” para abranger a análise econômica de todas as fontes e mercados de energia.

No Brasil, o professor de Economia da UFRJ Antônio Dias Leite, na época à frente do Ministério de Minas e Energia – MME, coordenou a publicação da Matriz Energética Brasileira em 1970, obra de cerca de 20 volumes trazendo um extenso levantamento de dados sobre os fluxos de todas as cadeias energéticas. Este trabalho foi um marco que ensejou posteriormente a publicação anual dos Balanços Energéticos Nacionais pelo MME, prática também seguida posteriormente pelos principais estados do país.

Os choques de aumento de preço do barril de petróleo no mercado internacional foram o fator decisivo para o surgimento e a consolidação do conceito de planejamento energético. Com a quadruplicação desse preço de 3 para 12 USD/bbl por ocasião da guerra no Oriente Médio em 1973 (1º choque) e sua elevação até o patamar de 40 USD/bbl em 1979-81 no período da guerra Irã-Iraque (2º choque), a competição entre fontes de energia se acirrou, com profundas alterações nos mercados diante das ameaças à segurança do abastecimento de petróleo.

No Brasil, em 1975 foi lançado o Proálcool, para incentivar o aumento da produção de etanol de cana de açúcar de forma a substituir a gasolina, inicialmente através da mistura de álcool anidro e, a partir do 2º choque, com a fabricação de veículos leves equipados de motores aptos a usar 100% de etanol hidratado. Também em 1975 o governo brasileiro assinou um Acordo Nuclear com a Alemanha, prevendo a construção de 8 reatores de 1250 MW cada, a serem fornecidos pela Alemanha, que deveria ainda transferir ao Brasil a tecnologia de enriquecimento do urânio a ser usado como “combustível” nessas usinas. O argumento inicial invocado pelo governo para justificar a assinatura do Acordo foi a necessidade de aumentar a segurança de suprimento energético ao país, diante do 1º choque do petróleo.

Pinguelli foi uma das principais lideranças da comunidade técnico-científica do país na crítica ao Acordo Nuclear. Em conjunto com outros físicos, como José Goldemberg, reunidos na Sociedade Brasileira de Física – SBF e na Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência – SBPC, denunciou a inadequação do Acordo em vários pontos: o custo excessivo da importação de oito reatores da Alemanha;

a falta de envolvimento e de apoio à comunidade científica já atuante nesse campo (por exemplo, o pioneiro “Grupo do Tório”); o fato de que a tecnologia de enriquecimento de urânio (processo Becker de jato centrífugo) a ser “transferida” ao Brasil ainda estar em desenvolvimento, dentre outros. O grande debate que se seguiu a esta mobilização crítica ao Acordo levou o Governo a mudar seu discurso, passando a tentar justificá-lo pela necessidade do país dominar a tecnologia nuclear. Na verdade, também neste aspecto as críticas ao Acordo se revelaram corretas, pois a transferência da tecnologia de enriquecimento não se viabilizou e foi através do programa liderado pela Marinha brasileira que o Brasil a desenvolveu. Mais tarde, Pinguelli também criticou este programa “paralelo”, por incluir instalações na serra do Cachimbo destinada a experimentos com o uso bélico de artefatos nucleares. Sua denúncia teve grande repercussão, e apesar da negativa dessa intenção pelo governo Sarney em 1986, durante a presidência de Collor alguns anos mais tarde houve o reconhecimento do problema e foram fechadas essas instalações.

Neste contexto, Pinguelli percebeu a importância de se promover uma visão integrada do planejamento energético, incorporando o papel das várias fontes em seus aspectos tecnológicos e econômicos para atender à demanda de energia em seus distintos usos.

Em 1979, em conjunto com Adilson de Oliveira, João Lizardo de Araújo e Juan Bautista Soto Hesles, criou a Área Interdisciplinar de Energia - AIE, no âmbito do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ, que mais tarde se tornou um outro programa, o PPE. Nos anos 80, a AIE cresceu incorporando novos professores (Otavio Mielnik, eu e Luiz Legey) e vários ex-alunos de seu curso de mestrado em Planejamento Energético (Adriano Rodrigues, Alessandra Magrini e Maurício Arouca). Essa equipe produziu diversos estudos que contribuíram para a consolidação da área de Planejamento Energético no país, destacando-se os estudos sobre Energia e Desenvolvimento da rede internacional de centros de pesquisa apoiada pela Comissão Europeia (CE, 1984; Rosa, 1984; La Rovere, Rosa e Rodrigues, 1985, dentre outros).

O mesmo movimento foi seguido pela USP, UNICAMP e EFEI (hoje UNIFEI), que também criaram grupos semelhantes de ensino de pós-graduação e pesquisa em Planejamento Energético. Pinguelli tomou a iniciativa de articular com os parceiros desses grupos a criação da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético – SBPE e sua Revista Brasileira de Energia – RBE. Também teve atuação importante junto ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ na criação de uma Área de Conhecimento em Planejamento Energético, servindo como primeiro membro escolhido para atuar no Comitê Assessor do CNPQ para a concessão de auxílios e bolsas em Planejamento Energético.

## MEIO AMBIENTE

Pinguelli foi um dos primeiros cientistas brasileiros a perceber a relevância para o Planejamento Energético da avaliação dos riscos e impactos ambientais da cadeia da produção até o uso final da energia. Já no âmbito de sua crítica ao Acordo Nuclear era patente a preocupação com a correta destinação dos resíduos radioativos e a segurança das usinas nucleares. Um exemplo disso foi sua preocupação com a espessura de concreto das paredes de edifícios de reatores, que ensejou a publicação de um artigo científico seminal em que ele calculava os efeitos da queda de um Jumbo sobre o prédio do reator da central de Angra dos Reis. Naturalmente o artigo foi ridicularizado por seus adversários, na época. No entanto, após os atentados às torres gêmeas e ao Pentágono nos Estados Unidos, no século XXI cálculos desse tipo passaram a ser parte obrigatória dos parâmetros de segurança exigidos no projeto e operação de centrais nucleares.

Nos anos 80, sua atenção se voltou à incorporação no Planejamento Energético do devido equacionamento dos impactos sociais e ambientais de usinas hidroelétricas com grandes reservatórios (Rosa e Mielnik, 1988). Os resultados desastrosos nesse campo da primeira safra de grandes usinas na Amazônia (Balbina, Samuel e Tucuruí) tinham levado a uma forte mobilização política que culminou na criação do Movimento de Atingidos por Barragens – MAB. Por outro lado, os grandes financiadores internacionais desses empreendimentos, como o Banco Mundial e o Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID, exigiram a criação de Departamentos de Meio Ambiente nas grandes empresas do setor elétrico brasileiro como contrapartida da concessão de seus empréstimos em condições privilegiadas de financiamento. Novamente Pinguelli exerceu um papel articulador, ao convidar os antropólogos sociais do Museu Nacional da UFRJ a integrarem uma equipe interdisciplinar para o estudo do tema. No âmbito de um projeto independente, financiado pela Fundação Ford, ele também envolveu fortemente no estudo os técnicos e dirigentes do recém-criado Departamento de Meio Ambiente da Eletrobras, propiciando o diálogo com as críticas dos movimentos e cientistas sociais (Rosa et al, 1995).

Percebendo a dimensão que a questão ambiental assumia em todo o mundo, concluiu que a COPPE precisava incluir explicitamente o Meio Ambiente em seus programas de ensino e pesquisa. Para isso, em um de seus períodos como diretor da COPPE, em fins de 1988 me convidou a ficar em tempo integral e dedicação exclusiva na COPPE com a missão inicial de liderar um processo para encontrar a melhor solução nesse sentido. Do debate com os colegas atuantes nesse campo nasceu em 1989 a Área Interdisciplinar de Engenharia Ambiental, reunindo professores de oito programas da COPPE que aderiram à

proposta. Além de criar uma área de concentração em Planejamento Ambiental, o PPE passou a oferecer disciplinas sobre a questão ambiental que podem complementar a formação nesse campo de mestrandos e doutorandos oriundos de outros programas da COPPE. O componente de pesquisa desse desenho institucional foi complementado pela criação do Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente em 1997, a partir de uma proposta contemplada em edital do Ministério da Ciência e Tecnologia para receber recursos financeiros de fontes internacionais.

O papel de Pinguelli também foi decisivo para uma importante participação da comunidade acadêmica brasileira na Rio-92. Na época, à frente do Fórum de Ciência e Cultura da UFRJ, organizou um conjunto de debates e publicações técnico-científicas sobre Meio Ambiente antes, durante e depois da Conferência das Nações Unidas, em particular o Rio Ciência que funcionou como o “*hub*” científico do grande evento.

## MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O profundo impacto que a mudança global do clima viria a ter sobre o Planejamento Energético também foi antecipado por Pinguelli. O avanço do conhecimento científico sobre as causas antropogênicas do fenômeno se acelerou a partir da criação do Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC em 1988, numa iniciativa conjunta da Organização Meteorológica Mundial – OMM e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA. Já em 1989 iniciamos juntos a estudar o tema na COPPE. Mais uma vez Pinguelli assumiu um papel aglutinador ao convidar colegas de diversas instituições a formar conosco, no Fórum de Ciência e Cultura da UFRJ, um grupo de cientistas dedicados ao tema: Luiz Gylvan Meira Filho, do INPE; Pedro Dias, da USP; José Domingos Gonzalez Miguez, da Petrobras, dentre outros. Produzimos com apoio do IBAMA um pioneiro inventário das emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas ao sistema energético em 1990. Notando que o governo federal ainda não estava organizado para tratar adequadamente do assunto, mesmo após a assinatura da Convenção do Clima da ONU (UNFCCC) na Rio-92, Pinguelli levou nosso grupo a uma audiência com José Israel Vargas, seu colega na SBF, à época Ministro de Ciência e Tecnologia, e ao presidente Itamar Franco, para alertá-los da importância do tema. O governo aprovou nossa solicitação e criou a Unidade de Mudança do Clima no MCT, assumida por José Miguez que a liderou por muitos anos. Além disso, a cada vez que uma mudança de governo federal colocava em perigo a continuidade do trabalho dessa Unidade, Pinguelli nos levava a Brasília para explicar a sua relevância ao novo ministro.

O grupo de cientistas formado por Pinguelli teve ainda papel relevante na elaboração, em conjunto com o MCT, da Proposta Brasileira para o Protocolo de Quioto. Esta proposta foi apresentada oficialmente pelo governo brasileiro na Conferência das Partes – COP da UNFCCC realizada em Quioto, em 1997, sendo a única proveniente de um país em desenvolvimento. Em síntese, ela propunha a imposição de limitações às emissões de GEE dos países, proporcionais à sua contribuição histórica para o aquecimento global. Em caso de não respeitarem seus tetos anuais, os países pagariam multas que serviriam de aporte a um Fundo Global de Desenvolvimento Limpo a ser criado para a solução do problema. O grupo científico de apoio ao MCT auxiliou no cálculo da parcela de responsabilidade de cada país, a partir das emissões de GEE do sistema energético acumuladas desde o início da Revolução Industrial. Além disso, nossas simulações forneceram o valor sugerido para as multas a serem pagas por tonelada de CO<sub>2</sub> emitida acima dos tetos. Naturalmente, os países industrializados barraram a aprovação dessa proposta em Quioto por não aceitarem arcar com o ônus correspondente à sua responsabilidade histórica na criação do problema. Porém, sua contribuição foi importante, alcançando grande repercussão e ensejando a criação de um grupo de trabalho específico para tratar do tema no secretariado da Convenção do Clima.

Como membro do IPCC, destaca-se sua atuação no Terceiro Relatório de Avaliação, atuando como um dos autores principais do capítulo 1 do Grupo III (IPCC, 2001). Ao lado de um grupo de cientistas brasileiros, incluindo alguns colegas da COPPE, deu sua contribuição para que o IPCC obtivesse, em conjunto com Al Gore, o Prêmio Nobel da Paz de 2007.

Pinguelli continuou a desempenhar um papel relevante na ponte entre o governo e a comunidade científica atuante no tema, como secretário executivo do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas - FBMC, de 2004 até 2016. Participou nas discussões entre o Presidente da República, os ministros das pastas pertinentes e alguns representantes do setor produtivo, da sociedade civil organizada e da comunidade científica que contribuíram para a definição da posição brasileira de apresentar compromissos voluntários de redução de suas emissões de GEE até 2020, na COP-15 de Copenhague em 2009. O protagonismo do FBMC foi ainda maior no processo de contribuição para a proposta de Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC a ser apresentada pelo Brasil para o Acordo de Paris na COP-21, em 2015. Izabella Teixeira, ministra de Meio Ambiente designada pela Presidente da República para coordenar o processo de elaboração da NDC, solicitou formalmente ao FBMC de coordenar a contribuição de seus representantes de diversos segmentos da sociedade. O FBMC convocou 5 grandes reuniões técnicas no período 2014-2015 para co-

Iher elementos para a realização do estudo IES-Brasil, Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030 (La Rovere et al, 2016). Este processo participativo permitiu fornecer um amplo respaldo ao Ministério do Meio Ambiente para as negociações políticas que culminaram com a definição das metas da 1ª NDC do Brasil. Dentre os países em desenvolvimento, essas metas foram as mais ambiciosas, pois estabeleceram uma forte redução das emissões absolutas do país como um todo: em relação a 2005, a redução fixada foi de no mínimo 37% em 2025 e 43% em 2030<sup>1</sup>.

## POLÍTICA ENERGÉTICA

Sempre engajado politicamente, Pinguelli não se limitava a contribuir para o Planejamento Energético enquanto área o conhecimento, mas pensava sempre em sua aplicação no auxílio à tomada de decisões de política energética. Participou de todas as campanhas da candidatura Lula à Presidência da República, coordenando a elaboração das propostas para o programa de governo no campo da Energia. Sempre me impressionou sua capacidade de facilitar a negociação entre atores sociais tão díspares como sindicatos de petroleiros e eletricitários, técnicos e dirigentes de empresas do setor energético, representantes da indústria e de associações empresariais, ambientalistas e outros membros da comunidade científica. Invariavelmente, a cada interlocutor chamava a atenção da legitimidade de outros pontos de vista diferentes, mostrando a necessidade de convergir para uma solução que contemplasse todas as visões que ele julgava adequadas, independentemente de onde viessem, numa postura sempre de rigor técnico e busca de justiça social.

Independentemente de sua militância política, sua preocupação central era sempre com o país. Assim, em 1999, em conjunto com Maurício Tolmasquim e outros especialistas, enviou ao Presidente da República um relatório alertando para os riscos de falta de oferta de energia elétrica para atendimento do mercado, dado o baixo ritmo de investimentos em novas usinas e o baixo nível dos reservatórios das hidroelétricas. Efetivamente, diante da inação do governo, o chamado “apagão” da energia elétrica no país acabou vindo a ocorrer em 2001.

Em 2003, foi nomeado presidente da Eletrobrás. Colocou as contas da empresa em dia. Buscou resgatar o papel de coordenação da Eletrobrás, pondo para funcionar o Conselho dos Presidentes de

---

<sup>1</sup> A viabilidade de atingimento dessas metas foi confirmada na versão atual da NDC, que passou para 50% a redução de emissões de GEE a ser alcançada em 2030, além de se comprometer com o objetivo de zerar as emissões líquidas de GEE do país até 2050, mesmo no período de um governo federal notoriamente negacionista.

Empresas do grupo Eletrobrás – CONCISE, visando centralizar a gestão de todas as empresas do grupo. Foi retirado do posto pelo governo, após 15 meses, por uma decisão meramente política, para contemplar um partido da coalizão no poder com um cargo importante.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A grande dedicação ao estudo e o compromisso inegociável com o rigor científico permitiram a Pinguelli fornecer uma contribuição acadêmica relevante em todos os seus campos de atuação, e principalmente no do Planejamento Energético. Este trabalho não teve a pretensão de fazer um levantamento completo de sua obra nem de efetuar uma análise científica de seus trabalhos, que merecem um tempo e um esforço bem mais substanciais. Em rápidas pinceladas, busquei descrever o que me parecem ser os traços mais marcantes de sua contribuição. Para mim, seu método de era o fundamental: a constituição de grupos, a partir de sua liderança, e a criação de condições para que os seus membros desenvolvessem suas capacidades através do diálogo, propiciando sempre um avanço coletivo. Caso raro no mundo acadêmico, além do exemplo pessoal o seu principal legado é a ilustração dos resultados que se pode alcançar com essa mobilização conjunta, muito mais relevantes do que a mera soma de contribuições individuais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CE - COMISSÃO EUROPEIA (Org.). Energy and Development, What Challenges? Which Methods? Lavoisier, 1984, editado pela CE em inglês, francês, espanhol e chinês.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Chapter 1, “Setting the Stage: Climate Change and Sustainable Development”, in Climate Change 2001 – Mitigation, The Contribution of Working Group III to the Third assessment Report (TAR). July 2001

LA ROVERE, E. L.; ROSA, L. P. E RODRIGUES, A. P. (Orgs.). Economia e Tecnologia da Energia, Ed. Marco Zero/FINEP–Financiadora de Estudos e Projetos, Rio de Janeiro, 1985, 520 p.

LA ROVERE, E. L. et al., 2016. Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Projeto IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

MAINGUY, Y. L'Économie de l'énergie, Ed. Dunod, 1966

ROSA, L. P. Memórias de Vargas a Lula: a resistência à ditadura e ao neoliberalismo, Ed. Contraponto, Rio de Janeiro, 2022, 619 p.

ROSA, L. P. (Org.). Energia e Crise. Petrópolis: Editora Vozes, 1984

ROSA, L. P.; LA ROVERE, E. L.; SIGAUD, L.; MAGRINI, A. (Orgs.). Estado, Energia Elétrica e Meio Ambiente: o caso das grandes barragens: COPPE/Editora UFRJ, 1995

ROSA, L. P.; MIELNIK, O. (Orgs.). Impacts of Great Energy Projects in Brazil. Comparative Study of Hydroelectric and Nuclear Power. Research report to the International Development Research Center - IDRC, 1988



## 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.
- As obras devem ser elencadas em ordem alfabética, não numeradas, seguindo o padrão ABNT.
- NÃO ordenar as obras de acordo com a citação no texto.

