

revista brasileira de  
**ENERGIA**



Sociedade Brasileira de  
Planejamento Energético

Volume 28, Nº 3, 3º Trimestre de 2022

**Diagramação**

Kelly Fernanda dos Reis

**Revisão**

Arnaldo Walter e Kelly Fernanda dos Reis

**Revista Brasileira de Energia  
Vol. 28 - nº 3**

Itajubá, 2022 - SBPE

Editor: Arnaldo Walter  
206 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

**Comitê Editorial**

Alexandre Salem Szklo

Annemarlen Gehrke Castagna

Edmilson Moutinho dos Santos

Helder Queiroz Pinto Junior

Joaquim Seabra

Kamyla Borges da Cunha

Luiz Augusto Horta Nogueira

Mônica Cavalcanti Sá de Abreu

Sergio Valdir Bajay

Virginia Parente

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

### **Diretoria da SBPE**

Presidente: Rubem César Rodrigues Souza

Vice-Presidente: Juliana Klas

Diretora de Eventos: Paula Meyer Soares

Diretor de Publicações: Arnaldo Cesar da Silva Walter

Diretor Administrativo: Edson da Costa Bortoni

### **Conselho Fiscal**

Eduardo Mirko Valenzuela Tundera

Ivo Leandro Dorileo

Jamil Haddad

### **Conselho Consultivo**

Afonso Henriques Moreira Santos

Célio Bermann

Edmilson Moutinho dos Santos

Ivan Marques de Toledo Camargo

Jamil Haddad

José Roberto Moreira

Luiz Pinguelli Rosa

Maurício Tiommo Tolmasquim

Oswaldo Lívio Soliano Pereira

Sergio Valdir Bajay

### **Secretaria Executiva da SBPE**

Kelly Fernanda dos Reis 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, e essa divulgação começou com a publicação do 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 – 265 dias –, sendo um pouco menor – 239 dias – para os artigos aceitos para publicação. O número de dias é contado da data de submissão até a data da decisão editorial final – aceitação ou rejeição –, e na avaliação não estão sendo considerados os artigos publicados em número especial (no volume 27, números 2 e 3, publicados em 2021) e os artigos de autores convidados.

Já para as submissões que ocorreram a partir de outubro de 2020 e, portanto, excluindo dos resultados as pendências que existiam até então, o tempo médio de tomada de decisão é de 148 dias, sendo de 156 dias para os artigos aceitos. Para os seis artigos publicados neste número, o tempo médio entre a submissão e a decisão editorial final foi de 206 dias.

O compromisso assumido é alcançar e manter o tempo de tomada de decisão abaixo de 150 dias e, com os resultados deste número, tivemos um aumento do indicador temporal em relação ao que foi apresentado anteriormente. Evidente, 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 que ocorreram desde março de 2018.

Em menos de cinco anos houve quase 150 mil *downloads* dos artigos publicados; o levantamento aqui apresentado foi feito em meados de dezembro de 2022. Entre todos os artigos já publicados, os cinco mais acessados são apresentados na Tabela 1.

Já nas Tabelas 2, 3 e 4 são apresentados os artigos mais acessados entre aqueles publicados em 2020, 2021 e 2022 (até dezembro 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	8253
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	7189
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	6824
<i>Investment analysis for wind energy projects</i>	Wagner Sousa de Oliveira e Antônio Jorge Fernandes	2013	v. 19 n.02	5167
Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos	Alessandra Magrini	2011	v. 08 n. 01	3352

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	530
Fundamentos do planejamento energético centralizado e do descentralizado	Arthur Mendonça Quinhones Siqueira e Célio Bermann	2020	v. 26 n. 01	513
A regulação da geração distribuída no Brasil	Rodrigo Mota Rodi e Célio Bermann	2020	v. 26 n. 02	476
(In)Justiça energética: definição conceitual, parâmetros e aplicabilidade no caso do Brasil	Vinicius Eduardo Ribas, André Felipe Simões	2020	v. 26 n. 04	475
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	397

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	533
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	457
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	396
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	387
Emissões de gases de efeito estufa no setor de energia, no Brasil	Arnaldo Walter	2021	v. 27 n. 03	350

Tabela 4 - Artigos mais acessados dentre os publicados em 2022

Título	Autores	Ano	Volume e número	Número de downloads
<i>Energy recovery technologies from municipal solid waste: enhancing solid waste Brazilian policy</i>	Tânia Galavote, Aladim Fernando Cerqueira, Rahony Bregensk Alves, José Carlos Martins Ramalho, Luciana Harue Yamane, Renato Ribeiro Siman	2022	v. 28 n. 01	213
Cálculo dos benefícios energéticos da geração distribuída solar fotovoltaica	Guilherme Susteras, Alexandra Januário Susteras	2022	v. 28 n. 01	204
Análise do consumo e geração de eletricidade dos estados nordestinos entre 2006 e 2020	Gustavo Ferreira, Bruno Melo, César Lédio, Eduardo Cabral, Esdras Miranda, Francisco Israel, Francisco Renato, Jobel Preisler, José Janiere, Levi Nogueira, Luís L'Aiglou, Mauri Saraiva, Paulo Carvalho, Ricardo Castelo	2022	v. 28 n. 01	155
Análise de riscos na implantação de projetos fotovoltaicos residenciais conectados à rede elétrica	Higor Tadeu Azevedo Miranda, Leandro Cesar Mol Barbosa, Maurício Sá Santos Diniz, Sílvia Maria Santana Mapa	2022	v. 28 n. 02	132
Potencial de geração de energia fotovoltaica no estado de Mato Grosso	Ana Cristina Kubo Almada, Jonathan Willian Zangeski Novais, Amanda Alves Rocha, Naara Soares dos Santos Brito, Dahiane dos Santos Oliveira Zangeski, Izaura de Oliveira Roberto	2022	v. 28 n. 01	120

**Arnaldo Walter**

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

## EDITORIAL

Este é o terceiro número publicado em 2022 pela Revista Brasileira de Energia (RBE). Desde o primeiro fascículo deste ano (Vol. 28, nº 1) estão sendo apresentadas estatísticas dos tempos de processamento das submissões e dos registros de acesso às publicações. Estão sendo apresentadas as médias gerais do tempo de processamento, mas o objetivo em curto prazo é apresentar o tempo de processamento para cada artigo publicado. Quanto aos registros de acesso, estão sendo indicados os artigos mais acessados desde que o monitoramento começou a ser feito, ou seja, desde 2018, bem como os mais acessados entre os artigos publicados nas edições de 2020, 2021 e 2022.

No presente número estão sendo publicados seis artigos que passaram pelo processo regular de análise por pares, e dois artigos que marcam o início das publicações em uma nova seção: “Energia na América Latina”. Os artigos da série “Energia na América Latina” são contribuições de autores convidados pelo Comitê Editorial da RBE, e o objetivo é que regularmente sejam publicados textos científicos com esse escopo; solicitamos aos autores que focassem em aspectos considerados relevantes, em cada país, da chamada transição energética.

Assim, Marina Recalde e coautores, que têm vínculo com a Fundación Bariloche e o CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas e Técnicas –, discorrem sobre planos para viabilizar maior eficiência energética no setor residencial, na Argentina, e a importância dessas ações para acelerar a transição energética naquele país. Já Cesar Celis e coautores, que têm vínculo com a Pontificia Universidad Católica del Peru, Universidad de Piura e PPE/COPPE/UFRJ (Brasil), analisam o papel e a potencial evolução das fontes renováveis de energia, com foco na produção de hidrogênio verde no Peru.

Por sua vez, os artigos que passaram pelo processo regular de avaliação estão sendo aqui publicados na sequência cronológica das submissões.

Adriano S. Bastos e Carlos B. Martinez avaliam o potencial da energia ondomotriz no litoral do estado de São Paulo.

O artigo de Jackson N. Feitosa e Fabiana K. O. M. V. Guerra apresenta a análise da necessidade de sistemas contra descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos, e especificamente tratam o caso de uma instalação existente no Rio Grande do Norte.

Sistemas de iluminação pública e sua gestão é o tema da contribuição de Rafael Deléo e Oliveira e Filipe T. Avino.

O mesmo tema – iluminação pública e sua gestão – corresponde à contribuição de Renato L. Novais e coautores.

Já Marlon Salazar e Luís F. C. Ribeiro apresentam resultados da análise do consumo de energia elétrica residencial em estados do Brasil, usando técnica de decomposição da série de dados.

Finalmente, Lucas S. Borges e coautores apresentam resultados de um modelo baseado em algoritmo genético que foi desenvolvido e empregado na avaliação do ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência.

Desejo boa leitura! Obrigado pela atenção.

**Arnaldo Walter**

Editor Responsável - Revista Brasileira de Energia

## SUMÁRIO

### **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA ENERGIA ONDOMOTRIZ COSTEIRA NO LITORAL DO ESTADO DE SÃO PAULO.....12**

Adriano Silva Bastos, Carlos Barreira Martinez

### **ANÁLISE DA INSERÇÃO DE SISTEMA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....38**

Jackson Nogueira Feitosa, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra

### **CONTRIBUIÇÕES DA MODERNIZAÇÃO DO PARQUE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA PARA O ENFRENTAMENTO DE CRISE ENERGÉTICA.....58**

Rafael Deléo e Oliveira, Filipe Tagliaferro Avino

### **OPORTUNIDADES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE GESTÃO DE PARQUES DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DOS MUNICÍPIOS.....83**

Renato Lima Novais, Jadson dos Santos de Santana, Pedro Medina Ismerin, Ricardo Vieira

### **DECOMPOSIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL NOS ESTADOS BRASILEIROS.....110**

Marlon Salazar, Luís Felipe Ceranto Ribeiro

### **CÁLCULO DO PONTO DE MÁXIMO CARREGAMENTO DE SISTEMA ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO.....132**

Lucas Simões Borges, Renan Souza Moura, Caio César Branco Nunes, Cristian Adolfo Alvez, Antonio Carlos Zambroni de Souza

## ENERGIA NA AMÉRICA LATINA

### **APORTES DE LOS PLANES DE EFICIENCIA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y METODOLOGÍA PARA SUDESARROLLO: EL CASO DEL SECTOR RESIDENCIAL DE ARGENTINA.....148**

Marina Recalde, Hilda Dubrovsky, Francisco Lallana, Gustavo Nadal, Nicolás Di Sbroiavacca

### **CLEAN ENERGY TRANSITION IN PERU: A GREEN HYDROGEN PERSPECTIVE ..174**

Cesar Celis, Ronald Mas, Daniel Marcelo, Marlon Max H. Bellido

## AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA ENERGIA ONDOMOTRIZ COSTEIRA NO LITORAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

Adriano Silva Bastos<sup>1</sup>  
Carlos Barreira Martinez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal de Itajubá*

DOI: 10.47168/rbe.v28i3.676

### RESUMO

O planejamento energético objetiva sobretudo assegurar a oferta e o acesso à energia. Porém, atualmente, essa energia deve ser de fonte limpa e renovável, estando de acordo com as premissas de preservação ambiental e transição energética, visando uma matriz descarbonizada que contribua efetivamente com a minimização dos efeitos da mudança climática. Observando a geomorfologia brasileira é notório o grande potencial de energia oceânica disponível. Dispondo de 7.491km de costa, foi auferido ao litoral brasileiro um potencial total estimado da ordem de 998.640 GWh.ano<sup>-1</sup>, distribuído entre energia ondomotriz e maremotriz. Este trabalho objetivou prospectar, identificar e quantificar energeticamente, localidades propícias à instalação de parques geradores ondomotrizs com dispositivos conversores do tipo coluna de água oscilante. A pesquisa partiu de um levantamento georreferenciado da costa paulista, que resultou em 94 localidades com afinidade à implantação desses parques, conferindo ao litoral uma potencialidade bruta de 25.259 GWh.ano<sup>-1</sup> (2,88 GW), similar ao consumo total de eletricidade no Estado de Santa Catarina em 2020. A energia ondomotriz é sinérgica com os conceitos de sustentabilidade preconizados pelos tratados e metas ambientais visando a mitigação das mudanças climáticas, podendo ser considerada um fator de aceleração para a transição energética, sendo propícia a ser considerada nas análises futuras pelo planejador do sistema.

Palavras-chave: Energia oceânica; Energia ondomotriz; Coluna de água oscilante.

### ABSTRACT

The energy planning aims to ensure the supply and access to energy. However, nowadays, this energy must be clean and renewable,

complying with the principles of environmental preservation and energy transition, targeting a decarbonized matrix that effectively contributes to minimize the effects of climate change. Observing the Brazilian geomorphology, it is notorious the great ocean energy potential available. With more than 7,491 km of coastline, the Brazilian coast has an estimated total potential of 998,640 GWh.year<sup>-1</sup> distributed between wave and tidal energy. This paper aimed to identify and energetically quantify sites suitable for the installation of wave power generating plants with oscillating water column converters. The research started from a georeferenced survey of the São Paulo coast, which resulted in 94 sites with affinities to the implementation of these farms, resulting a gross potential of 25,259 GWh.year<sup>-1</sup> (2.88 GW), like the total electricity consumption of the State of Santa Catarina in 2020. The wave energy is synergetic with the sustainability concepts preconized by the environmental treaties and goals and can be an accelerating factor for the energy transition, being able to be included in future analyses by the system planner.

Keywords: Ocean energy; Wave energy; Oscillating water column.

## 1. INTRODUÇÃO

Garantir a oferta e o acesso à energia elétrica, é premissa do planejador do setor elétrico nacional. Entretanto, é necessário considerar qual fonte a está ofertando. É preciso garantir que essa esteja de acordo com conceitos de sustentabilidade amplamente discutidos e implementados pelo conjunto de nações desenvolvidas do mundo. A “Transição Energética” é aspecto fundamental desses conceitos. Segundo Smil (2010), as transições passadas e futuras da base energética da humanidade são processos inerentes a evolução natural, sendo realizadas por meio de mudanças na tecnologia, na economia e na sociedade. O modelo de “Transição” atualmente discutido no mundo preconiza mudanças na economia, por meio da tecnologia juntamente com o compromisso da sociedade, visando transformar a base energética atual em uma base de menor consumo de carbono. Portanto, é papel do indivíduo, do setor produtivo e do Governo, na figura do Planejador, assegurar o uso consciente e sustentável dos recursos naturais. Permitindo o desenvolvimento econômico sem prejuízo ao meio ambiente.

No Brasil, o Planejamento Energético é balizado nas diretrizes do Plano Nacional de Energia – PNE (BRASIL, 2020). O documento visa explanar as estratégias e metas do Planejamento para um horizonte de 30 anos. O documento mais recente, PNE 2050, partiu da premissa de um cone de incertezas, haja visto o cenário atual da pandemia do SARS-COV 2 (COVID19). Nele, foram estabelecidos dois cenários

extremos, um cenário de crescimento econômico estagnado, bem pessimista, com a manutenção da demanda de energia elétrica atual, e outro bem otimista, com crescimento econômico, demandando uma oferta de eletricidade 330% maior que a atual. Caso o cenário otimista se concretize, o Planejamento terá grandes desafios para o atendimento da demanda. A oferta de eletricidade terá que ser elevada dos 621.219 GWh.ano<sup>-1</sup> registrados no ano de 2020, para 2.111.160 GWh.ano<sup>-1</sup>, em 2050 (BRASIL, 2020; EPE, 2021).

O PNE 2050 (BRASIL, 2020) considera a expansão da matriz sob a ótica da Transição Energética, sendo essa pautada como uma de suas questões transversais e avaliada no planejamento na forma de dois cenários. O primeiro, expandindo de uma forma 100% renovável, em que não há incremento de fonte fóssil. O segundo, admitindo o incremento fóssil, desde que haja sequestro de carbono, tornando a expansão 0% emissora. Caso o cenário de estagnação econômica venha a se concretizar, a expansão da matriz se dará de forma natural, sem requerer do planejador uma estratégia mais agressiva. Por outro lado, se o cenário de alto crescimento econômico vier a se concretizar, a expansão da matriz deve ocorrer de forma acelerada, impondo ao planejador desafios para assegurar a oferta. Como solução aos desafios de atendimento da alta demanda, o Plano propõe incentivar projetos fotovoltaicos e eólicos, que são fontes limpas e renováveis, totalmente sinérgicos com os conceitos de sustentabilidade e Transição Energética. Entretanto, também considera a implantação de projetos térmicos a base de carbono e de novos projetos de grandes usinas hidrelétricas, incluindo, se necessário, usinas com restrições ambientais de Unidades de Conservação ou Terras Indígenas, o que não condiz com os conceitos de sustentabilidade e Transição Energética apresentados anteriormente (SMIL, 2010). Outras soluções apresentadas no Plano incluem o armazenamento químico (baterias) e físico (reversibilidade das hidrelétricas), a repotenciação de usinas existentes e a inserção de unidades geradoras auxiliares para um melhor aproveitamento da energia hidráulica existente.

Em vista do exposto, o Planejamento Energético necessita considerar com mais afinco a inserção de outras fontes alternativas, como opção à geração fóssil ou às usinas hidrelétricas que têm restrições ambientais. Mesmo que essas alternativas sejam disruptivas, como é o caso da energia oceânica, da energia geotermal, dos concentradores solares e hidrogênio. Considerando ainda desenvolver outras novas tecnologias por meio da geração distribuída, ampliando os aspectos regulatórios e incluindo incentivos e subsídios fiscais para o seu desenvolvimento.

Observando as características geomorfológicas do Brasil, é de extrema relevância considerar a inserção da energia oceânica na matriz energética e no planejamento futuro. No território brasileiro há

uma faixa litorânea de 7.491 km, que inclui diversas geometrias e morfologias de orla, algumas extremamente propícias a implantação de parques geradores oceânicos. Segundo Tolmasquim (2016), o oceano é considerado um enorme reservatório de energia térmica e mecânica. Porém, com as atuais tecnologias é possível explorar com eficiência somente a energia mecânica. Considerada uma fonte limpa, com alta densidade energética e de escala mundial, a energia oceânica vem a cada dia ganhando mais espaço nos debates e pesquisas em diversos países. Contudo, ainda se trata de uma tecnologia em fase de desenvolvimento, o que impacta significativamente seu custo de implementação e geração de eletricidade, mas futuramente pode ter uma grande representatividade na matriz energética mundial (FALCÃO, 2010; KHALIGH & ONAR, 2010; IRENA, 2020).

A energia oceânica pode ser dividida em cinco distintas formas de conversão: a energia do gradiente de salinidade; a energia do gradiente de temperatura; a energia cinética das correntes de marés; a energia potencial da amplitude das marés; e a energia potencial e cinética das ondas (ZABIHIAN & FUNG, 2011; TOLMASQUIM, 2016). Cada tipo de energia possui um dispositivo conversor adequado, e cada uma possui uma região de exploração diferente, podendo ser na linha costeira (*onshore*) como afastada dela (*nearshore* e *offshore*). Assim como as demais fontes renováveis, a fonte oceânica possui sazonalidade definida e pode ser inserida na matriz com vistas a uma complementariedade entre as demais fontes. Por se tratar de uma energia ainda não desenvolvida no Brasil, é relevante considerar sua exploração na linha costeira, devido a facilidade de acesso para a implantação e manutenção e, sobretudo, conexão com a rede elétrica. Dentre as energias oceânicas a energia ondomotriz é objeto de estudos desde a década de 1970, principalmente utilizando o dispositivo conversor de coluna de água oscilante – CAO (*oscillating water column* – OWC) (FALCÃO & HENRIQUES, 2016).

Os dispositivos conversores ondomotrizs do tipo coluna de água oscilante possuem um arranjo simples, composto por uma câmara de compressão com abertura para captar as ondas do mar e um conduto de saída de ar onde está alocado o conjunto turbogerador. Estes são inspirados nas cavidades ressonantes naturais que se formam em encostas rochosas e expõem a água do mar na forma de um Geisel (*blowholes*), os quais são exemplificados pela Figura 1.

Este trabalho se propôs a identificar quantitativamente a potencialidade da energia oceânica ondomotriz no litoral paulista. Foi realizada uma prospecção, por meio da ferramenta de informações geográficas QGIS®, de locais propícios a implantação de parques geradores ondomotrizs e a contabilização energética desses locais. O trabalho se estrutura com a contextualização do cenário brasileiro e das

cinco diferentes energias contidas no oceano, seguido pela apresentação do potencial energético global e local. Apresenta, ainda, a forma energética contida em uma onda e seus equacionamentos de obtenção da energia, o processo de desenvolvimento da pesquisa e os resultados obtidos.

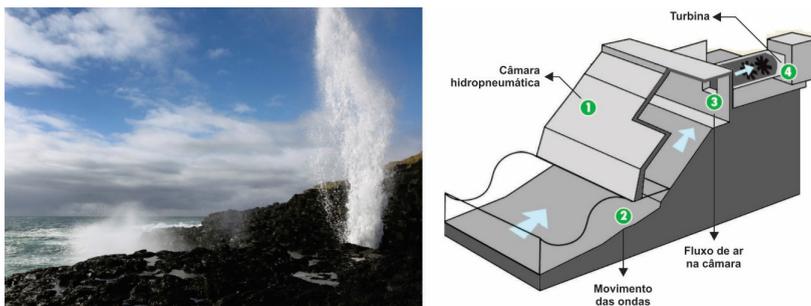


Figura 1 - Blowhole e um dispositivo característico de coluna de água oscilante. Fonte: researchgate.net

## 2. ENERGIA OCEÂNICA

### 2.1 Formas de conversão

Como visto, a energia oceânica pode ser dividida em cinco distintas formas de conversão. Elas são descritas a seguir.

#### 2.1.1 Energia do gradiente de salinidade

Dentre as cinco formas de aproveitamento das energias contidas no oceano, a do gradiente de salinidade é a mais recente, estando ainda em fase de pesquisas. O aproveitamento energético é obtido por meio do diferencial de concentração salina entre a água do mar e a água doce, ou somente aproveitando o diferencial da água do mar. Até o momento existem dois processos viáveis de obtenção de energia elétrica por meio do gradiente de salinidade, sendo o primeiro a Eletro-Diálise Reversa (RED), que extrai energia de forma direta do processo químico, na forma da diferença entre o potencial químico das soluções de diferentes concentrações, utilizando membranas para a diálise elétrica. O segundo modo é a Pressão Osmótica Retardada (PRO), que utiliza o diferencial de pressão resultante da osmose. No processo, a água doce filtrada migra através da membrana para o lado da água salgada pressurizada, promovendo um aumento na pressão, que é utilizado para movimentar uma turbina e gerar energia (OES, 2021; POST et al., 2007).

### 2.1.2 Energia do gradiente de temperaturas

O aproveitamento energético é baseado na diferença de temperaturas da água nos oceanos. A irradiação solar aquece a camada superficial oceânica, porém, nas camadas inferiores, essa energia se dissipa, gerando um diferencial de temperaturas. O processo de conversão em energia elétrica utiliza um ciclo Rankine com emprego de um fluido térmico em circuito fechado. O aquecimento do fluido ocorre com emprego da água quente da superfície, que é bombeada para o evaporador, enquanto o vapor do fluido é condensado pela água fria do mar profundo, também bombeada. Para se realizar esse processo é exigido um mínimo de 20°C de diferença de temperatura, que só é encontrado abaixo de 800 m de profundidade (TOLMASQUIM, 2016; ZHANG et al., 2018).

### 2.1.3 Energia das correntes de marés

O aproveitamento da energia das correntes de marés se dá pela transformação da energia hidrocínética do movimento ascendente e descendente da maré astronômica (descrita no próximo item) em energia elétrica, por meio de um conjunto turbina gerador. Esse aproveitamento apresenta estreita semelhança com a energia eólica, mas possui a capacidade de produzir quatro vezes mais energia por ano do que a energia eólica, se comparadas a sua potência nominal. O fato é devido a densidade da água e a continuidade sistêmica do ciclo de marés. A maior densidade da água também permite a conversão de energia em velocidades bem mais baixas que a do ar, chegando a atingir velocidades de 2 m/s. Seu posicionamento para um melhor aproveitamento energético está entre 20m e 30m de profundidade, afastados a 1 km da costa (ZABIHIAN & FUNG, 2011; HUSSAIN et al., 2017).

### 2.1.4 Energia da amplitude das marés

Dentre as cinco formas de energias oceânicas, a energia da amplitude de maré é a mais consolidada, e possui aplicação comercial desde a década de 1960 (TOLMASQUIM, 2016). Seu potencial energético é devido ao movimento ascendente e descendente das marés, resultado da interação das forças rotacionais e gravitacionais formadas entre o Sol, a Lua e a Terra (maré astronômica). Nos períodos de lua cheia e lua nova, quando há o alinhamento entre o Sol, a Terra e a Lua, as forças gravitacionais exercidas por esses corpos celestes são somadas, ocasionando uma maré com maior amplitude. Nas luas crescente e minguante, por não haver o alinhamento, resulta em uma maré de menor amplitude. Além desses fatos, a posição geográfica também

também influencia. A região Equatorial possui menor distância em relação à Lua, portanto, sofre uma ação maior da força gravitacional. O princípio de funcionamento é semelhante ao consolidado pelas usinas hidrelétricas. Com o movimento ascendente do fluxo de maré, a água é reservada por meio de um barramento. Quando a maré abaixa e o fluxo se torna descendente, a água acumulada é então turbinada, gerando eletricidade (KHALIGH & ONAR, 2010; TOLMASQUIM, 2016; HUSSAIN et al., 2017).

### 2.1.5 Energia das ondas

Dentre as cinco formas de aproveitamento da energia oceânica, a energia das ondas é a que possui maior densidade energética, chegando a ser 30 vezes mais densa que a solar (TOLMASQUIM, 2016). O processo constitutivo de uma onda concentra a energia eólica e solar em forma de energia cinética e potencial, e transporta energia de um lugar a outro. O efeito do aquecimento da atmosfera, por meio da irradiação solar, gera um diferencial de pressão entre as camadas de massas de ar, ocasionando um deslocamento vertical dessas massas. Ao se deslocarem, essas camadas formam um duto de empuxo e sucção, que originam os ventos. Por sua vez, esses ventos entram em contato com a superfície oceânica, imprimindo uma tensão de cisalhamento, dando origem a uma deformação superficial. Quanto mais forte e contínuo for o vento, maior será a amplitude da deformação. Uma vez iniciado esse processo, as ondas podem viajar milhares de quilômetros com perdas insignificantes de energia. Em uma onda há a energia cinética, proveniente do deslocamento horizontal da massa de água, e a energia potencial, proveniente do movimento circular orbital das partículas de água contida na massa deslocada (KHALIGH & ONAR, 2010; ZABIHIAN & FUNG, 2011; TOLMASQUIM, 2016).

## 2.2 Potencial oceânico

Segundo os dados da *International Renewable Energy Agency* – IRENA (IRENA, 2020), o potencial teórico estimado para o aproveitamento das energias oceânicas é da ordem de 76.350 TWh.ano<sup>-1</sup>. Esse potencial é subdividido em 1.200 TWh.ano<sup>-1</sup> de energia maremotriz de amplitude, 29.500 TWh.ano<sup>-1</sup> de energia ondomotriz, 44.000 TWh.ano<sup>-1</sup> de energia do gradiente de temperatura e 1.650 TWh.ano<sup>-1</sup> do gradiente de salinidade, conforme a Figura 2a (IRENA, 2020).

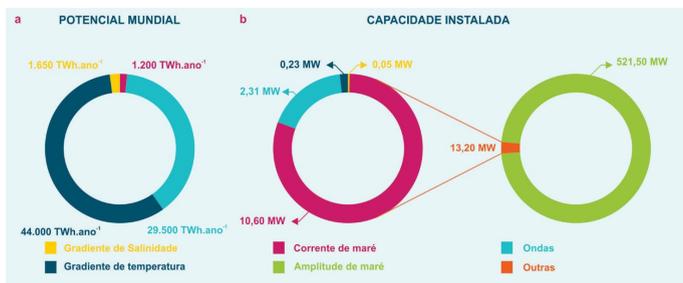


Figura 2 - Potencial teórico de energias oceânicas.  
Baseado em IRENA (2020)

Atualmente, existe uma capacidade instalada e operativa de 534,69 MW em todo o mundo. Essa capacidade se subdivide nas cinco formas de aproveitamento de energia, sendo, maremotriz de amplitude (barramento), responsável por 521,50 MW do total instalado, cinética de corrente, com 10,60 MW, ondomotriz por 2,31 MW, gradiente de temperatura com 0,23 MW e gradiente de salinidade com 0,05 MW. As proporções são apresentadas graficamente na Figura 2b (IRENA, 2020). Entretanto, em cenário de curto prazo serão agregados mais 1.907 MW de energia de corrente de maré e 149,7 MW de energia ondomotriz, o que fará com que a capacidade instalada seja de 2.591,36 MW. Estima-se que até 2030, a energia oceânica atinja 10 GW de potência instalada (IRENA, 2020).

O potencial teórico oceânico calculado para o Brasil é da ordem de 114 GW, distribuídos em cinco regiões e duas formas de conversão de energia, conforme apresentado na Figura 3, em uma adaptação de (TOLMASQUIM, 2016).



Figura 3 - Potencial teórico brasileiro para aproveitamento oceânico.  
Adaptado de Tolmasquim (2016)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo visa a prospecção e quantificação de localidades propícias à implantação de parques geradores ondomotrizes no Estado de São Paulo. Como dispositivo conversor, foi selecionado o tipo coluna de água oscilante (CAO) costeiro (*onshore*). Esses dispositivos consistem em uma câmara hidropneumática preenchida com ar e que, por meio de uma abertura voltada para o oceano, permite que a ação de elevação e rebaixamento de uma onda exerça uma força de pressurização e despressurização dessa câmara, forçando o ar deslocado na saída a acionar uma turbina (FALCÃO, 2010; LEKUBE et al., 2018). A instalação do dispositivo requer que a área seja de encosta rochosa, para sua construção ou fixação. Essas áreas, em sua maioria, possuem uma declividade mais acentuada, o que também é requerido, pois além de permitir a instalação da porção submersa do dispositivo, também contribui com uma menor dissipação da energia pelo atrito com o fundo. Para tanto, foi realizado o levantamento georreferenciado do litoral paulista com a determinação do potencial energético de geração.

#### 3.1 Levantamento georreferenciado

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado o *software* QGIS 3.16 Hannover® como ferramenta de georreferenciamento, a fim de determinar os possíveis locais de implantação dos parques geradores ondomotrizes. Inicialmente, foi realizado um levantamento de dados geográficos disponíveis nas autarquias, agências e ministérios. Esses dados coletados serviram de suporte para orientar a pesquisa e formaram as seguintes camadas vetoriais: i) divisão territorial das unidades estaduais da Federação (IBGE, 2021); ii) perfil detalhado da costa brasileira (CPRM, 2021); iii) batimetria oceânica com curvas de nível de 20 em 20 metros (CPRM, 2021); iv) geolocalização dos recifes de corais e ilhas (INDE, 2021); e v) unidades de conservação ambiental (IBGE, 2021).

O levantamento teve início no extremo sul do Estado de São Paulo, na coordenada (25°18'47.01" S, 48°5'54.66" W) e se estendeu até o ponto mais norte do litoral, na coordenada (23°22'2.494" S, 44°43'25.58" W). O processo se deu por uma varredura de 1 km em 1 km em toda a extensão litorânea, identificando as localidades que atendessem as condições de serem afloramentos rochosos e possuírem uma declividade mais acentuada (acima de 0,01 m/m). Esses requisitos são para que a estrutura possa ser instalada e para que haja uma menor dissipação energética por conta do atrito com o fundo, e também seja uma área fora da zona de rebentação (Figura 4). Camadas

vetoriais suplementares foram utilizadas para a coleta dos dados. Quando da identificação positiva de um ponto, foi realizada a coleta das coordenadas geográficas, seguida da contabilização da extensão do local e cálculo da declividade a partir do centroide do vetor de extensão. A pesquisa resultou em um mapa georreferenciado (*shapefile*) e um arquivo de dados (*dataset*) com as localidades propícias.



Figura 4 – Representação dos pontos prospectados considerando o afloramento rochoso e a declividade

### 3.2 Determinação do potencial energético

Partindo de estudos apresentados na literatura, foi realizado um levantamento da climatologia de ondas pertinente ao litoral do Estado de São Paulo a fim de determinar a Altura Significativa ( $H_s$ ) e o período de pico ( $T_e$ ) característicos a área de estudo. A Altura Significativa é definida como sendo o parâmetro do espectro de ondas que representa a média das alturas do terço (1/3) superior da amostra, sendo um dado estatístico diferente da altura de onda individual ( $H$ ). Já o período de pico, se refere ao tempo necessário para uma onda se deslocar em um determinado comprimento, de crista a crista (DEAN & DALRYMPLE, 1991: 188). Em Pianca, Mazzini & Siegle (2010), os autores procederam com uma reanálise do clima de ondas brasileiro utilizando 11 anos de dados pretéritos (1997 a 2007) do modelo de ondas *WaveWatch III* (TOLMAN, 2014). Os autores subdividiram o litoral em seis setores ao longo da quebra da plataforma continental brasileira, estando o Estado de São Paulo incluído na região Sudeste (W2). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1 na forma de média aritmética dos valores sazonais. Os autores concluíram que há uma diminuição nos níveis de energia do sul para o norte, ao longo de toda a costa brasileira. Mostraram que nos setores W1 a W4 W4 (do extremo

sul do Rio Grande do Sul até o norte de Alagoas) as ondas são mais energéticas no período de inverno, e nos setores W5 e W6 (do Norte de Alagoas ao Amapá) as ondas são mais energéticas no período de verão. Espindola (2017), também realizou uma reanálise do clima de ondas, tendo como entrada do modelo 35 anos de dados pretéritos do projeto ERA-Interim (1979 a 2014). O autor utilizou 49 pontos ao longo de toda a costa brasileira (SP, 36 a 41) e determinou as alturas significativas e períodos de pico, apresentando os resultados em dados relativos à média da amostra (Tabela 1) e do percentil de 95% (ESPINDOLA & ARAÚJO, 2017). Carvalho (2010) também realizou um estudo sobre a climatologia do litoral brasileiro, com uma série de 12 anos de dados pretéritos do modelo *WaveWatch III* (1997 a 2009). O estudo foi separado em 10 áreas de semelhanças referentes aos seus sistemas de ondas, estando o Estado de São Paulo situado na área 4 (A4). O autor caracterizou o clima de ondas determinando as alturas significativas e os períodos de pico, como também a média mensal e anual da energia das ondas (Tabela 1). A parte superior à esquerda da Figura 5 apresenta os pontos de levantamento da climatologia de ondas e suas correlações, enquanto a maior parte da Figura 5 apresenta o detalhamento dos pontos específicos ao Estado de São Paulo.

Tabela 1 - Altura significativa (HS) e Período de Pico (T) médios para o litoral de São Paulo

Correlação entre os pontos			HS médio [m] e T médio [s]			HS [m]	
ESPINDOLA	CARVALHO	PIANCA	ESPINDOLA	CARVALHO	PIANCA	Média	
P36	P20	A4	W2	1,68 m 9,2 s	1,59 m 10,0 s	1,95 m 8,0 s	1,75 m 9,0 s
P37	P19						
P38	P18						
P39	P17						
P40	P16						
P41	P15						

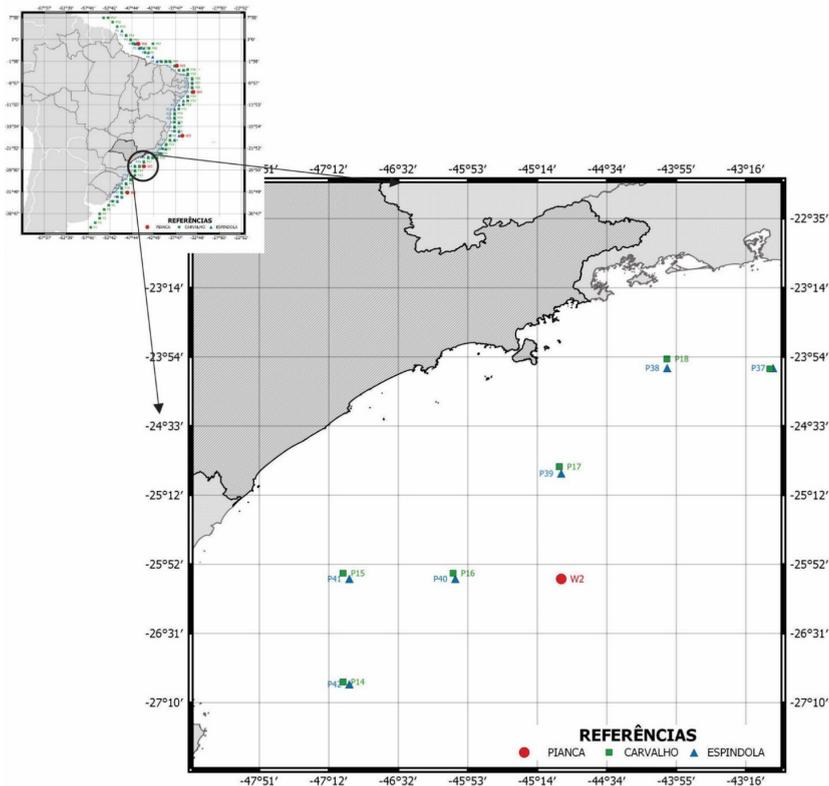


Figura 5 - Levantamento da climatologia de ondas para o estado de São Paulo

Uma onda possui energia potencial ( $EP$ ) e energia cinética ( $EC$ ), sendo ambas determinadas pela altura da onda ( $H$ ), densidade da água do mar ( $\rho$ ) e aceleração da gravidade ( $g$ ), expressas pelas Equações 1 e 2, a seguir. Sendo um sistema conservativo, a energia total, ou seja, a Densidade Energética disponível (equação 3) é obtida pela soma das energias potencial e cinética, sendo expressa em  $[N/m^2]$  (DEAN & DALRYMPLE, 1991; KHALIGH & ONAR, 2010).

$$EP = \frac{1}{16} \rho g H^2 \tag{1}$$

$$EC = \frac{1}{16} \rho g H^2 \tag{2}$$

$$E = EP + EC = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (3)$$

Para a determinação do Fluxo Energético ( $Ef$ ), que representa a quantidade de energia disponível por metro de frente de onda [W/m], é necessário multiplicar a Densidade Energética pela velocidade de grupo  $Cg$  [m/s], que por sua vez é um fator da celeridade da onda, dada por  $C=\omega/k$ , onde  $Cg=nC$ . Segundo Dean & Dalrymple (1991: 98), o fluxo é dado pela equação 4.

$$Ef = EnC = \left( \frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \cdot \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \cdot \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

Sendo:  $Ef$  o fluxo energético,  $E$  a densidade energética,  $n$  fator de celeridade da onda,  $C$  a celeridade da onda,  $\rho$  a densidade da água do mar,  $g$  a aceleração da gravidade,  $H$  a amplitude da onda,  $k$  o número de onda, que é dado por ( $k=2\pi/L$ ),  $\omega$  a frequência angular ( $\omega=2\pi/T$ ),  $h$  a profundidade local,  $L$  o comprimento da onda e  $T$  o período da onda.

A equação 4 representa o fluxo de energia para ondas individuais e pode ser reescrita em sua forma resumida. Segundo Dean & Dalrymple (1991: 98), o fator  $n$  assume o valor 1/2 para águas profundas e valor 1 para águas rasas. Isso quer dizer que em águas profundas a energia é transmitida à metade da celeridade das ondas, enquanto em águas rasas o fluxo de energia acompanha a mesma velocidade das ondas. Porém, o estado de mar real é descrito como sendo a soma de um grande número de ondas regulares que possuem diferentes frequências, amplitudes e direções, sendo melhor descrita pela variação espectral da função de densidade ou espectro de onda 2D,  $S(f,\theta)$  (CORNETT, 2008 apud FLEMING, 2012). Para análise do fluxo de energia em um espectro, considera-se a energia total (cinemática e potencial) por unidade de área como a integral da densidade energética em função do espectro de ondas  $\theta$  (HOLTHUIJSEN, 2007 apud CARVALHO, 2010). Dada como:

$$Ef = \int_0^{\infty} \rho g E(\omega) \cdot \frac{1}{2} \frac{\omega}{k(\omega)} \left( 1 + \frac{2k(\omega)h}{\sinh(2k(\omega)h)} \right) d\omega \quad (5)$$

$$Ef = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (6)$$

Sendo  $Ef$  estabelecido para águas profundas no ponto de análise espectral,  $k$  o número de onda dado por ( $k=2\pi/VL$ ),  $\omega$  a frequência angular ( $\omega=2\pi/VT$ ),  $h$  a profundidade local,  $L$  o comprimento da onda ( $L=(gT^2)/2\pi$ ) e  $T$  o período da onda. O desenvolvimento matemático é demonstrado em Folley (2017).

No entanto, o sistema energético contido no espectro de ondas, ou em uma onda solitária, é conservativo, ou seja, seu fluxo energético ( $Ef$ ) é conservado ao longo do raio de propagação da onda. Mas ao se propagar em sentido a costa há uma mudança na velocidade e altura da onda devido a empolgação e refração, compensando o sistema e mantendo-o conservado. Contudo, há uma dissipação energética por meio do atrito com o fundo do mar. Segundo Ostritz (2012), há uma perda energética entre 5 e 10% durante a aproximação das ondas à costa. Como este trabalho considera o ponto de localização de instalação dos dispositivos conversores em promontórios, ou pontos de acentuada declividade e em afloramentos rochosos, será considerado uma perda de 5% por atrito do ponto de análise espectral do fluxo energético até a costa.

Para determinar a quantidade de energia, para este trabalho foi considerada a altura significativa média ( $H_s$ ) para o Estado de São Paulo como 1,75m e um período de pico de 9 segundos (Tabela 1). O valor de fluxo energético obtido por meio da equação 6 é 12,84 kW/m, já incluído 5% de perda por atrito.

O clima de ondas, o dimensionamento geométrico da câmara de captura e o rendimento da turbina são os fatores que determinam rendimento global de um dispositivo coluna de água oscilante. Para equipar o dispositivo CAO, turbinas de fluxo reversível, auto retificadoras, são a opção mais aceita até o momento (FALCÃO, 2010), podendo ser citada a turbina Wells e suas variantes, apresentadas na Figura 5 (SHEHATA, 2016), a turbina de ação com pás guias e a turbina bi-radial (LOPES, 2017). A turbina Wells é uma máquina de fluxo axial, geradora, que utiliza pás de aerofólio simétrico, dispostas radialmente a 90°. A força tangencial produzida pelo escoamento nas pás do rotor depende apenas do ângulo de incidência do escoamento relativo, independentemente do sentido do escoamento (FALCÃO & HENRIQUES, 2016).

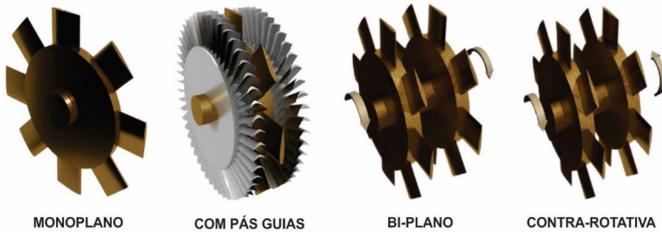


Figura 7 - Turbina Wells e suas variantes

Falcão, Henriques & Gato (2018) analisaram comparativamente modelos de turbinas auto-retificadoras para determinar sua eficiência, e estimaram eficiência entre 53,8% e 63,7% ( $\bar{\eta}=59,04\%$ ) para turbinas Wells monoplano sem aletas guia (em função dependente da solidez do rotor e número de pás); de 62,5% a 70,1% ( $\bar{\eta}=66,3\%$ ) para Wells monoplano com aletas; bi-plano  $\bar{\eta}=53,35\%$  e contra-rotativa  $\bar{\eta}=60,9\%$ . Os autores também concluíram que a turbina Wells monoplano sem pás direcionadoras é a mais barata do conjunto apresentado e que o uso das aletas só se justifica após uma análise de custo e retorno de investimento, pois seu ganho de eficiência em relação ao modelo sem aletas é de apenas 10%.

Falcão (2010) salienta o conceito de Largura Máxima de Captação, que determina uma maior eficiência entre a relação de oscilação de elevação da onda e absorção, sendo apresentado pela equação 7, onde:  $P_{m\acute{a}x}$  é a potência máxima,  $Ef$  o fluxo energético,  $\lambda$  o comprimento da onda,  $g$  a aceleração da gravidade e  $T$  o período da onda.

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{Ef} = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{gT^2}{4\pi^2} = \frac{g(9)^2}{4\pi^2} = 20,12m \quad (7)$$

Dizadji & Sajadian (2011) afirmam que a eficiência geral de um CAO depende das eficiências individuais da coluna de ar oscilante e da própria turbina. No seu estudo sobre a geometria da câmara, os autores concluem um rendimento global de 32% para a melhor geometria, com a abertura da câmara em angulação de 30° em relação ao plano vertical. Ibarra-Berastegi et al. (2018) analisaram o desempenho da Usina Ondomotriz de Mutriku entre os anos de 2014 e 2016, e estimaram um rendimento global de conversão de 41%.

Em Babarit (2015), o autor realizou um estudo comparativo sobre rendimento de conversores ondomotrizes e sua largura de captura,

apresentando os rendimentos globais de diversos CAO's. No estudo de Babarit (2015, p. 612), o autor aponta rendimentos globais variando de 7% a 20% para CAO's de primeira geração, e de 22% a 72% para CAO's de terceira geração, do que se estima uma média geral de aproximadamente 44% para o rendimento global.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A prospecção de sítios para a instalação de parques geradores ondomotriz costeiros resultou em 94 localidades apropriadas que apresentaram correspondência positiva quanto às especificidades de instalação de dispositivos CAO costeiro, sendo afloramentos rochosos, com declividade acentuada e fora de área de arrebentação. A varredura se iniciou ao sul do Estado de São Paulo, na coordenada (25°18'47.01" S, 48°5'54.66" W), se estendendo até o norte do Estado na coordenada (23°22'2.494" S, 44°43'25.58" W). A Figura 6, apresenta os sites identificados e o agrupamento pelas Regiões Sul, Central e Norte do Estado, com a apresentação dos valores agrupados pela Tabela 2.

Tabela 2 - seção regional das localidades identificadas para a costa do estado de São Paulo

REGIÃO	COORDENADAS		LOCALIDADES
Região Sul	25°9'59.63"S;	24°11'27.77"S;	18
Região Central	24°1'55.28"S;	23°45'52.80"S;	17
Região Norte	23°45'53.44"S;	23°22'17.17"S;	59

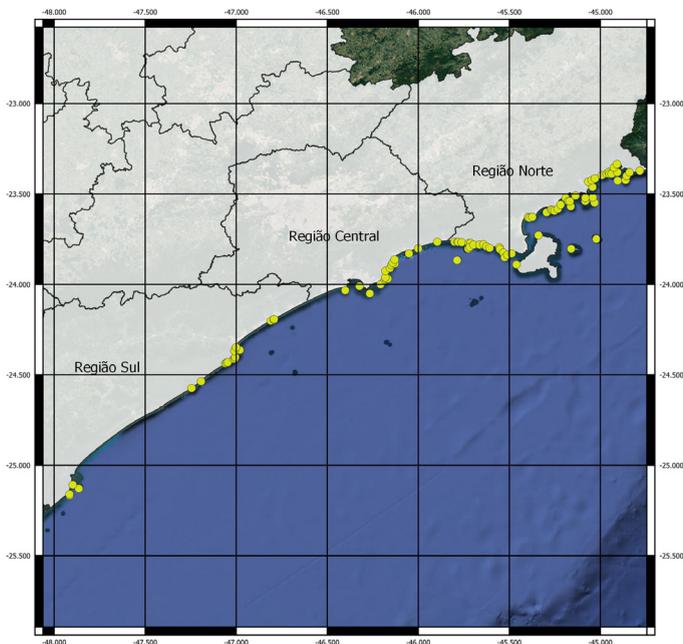


Figura 7 – Localidades identificadas para instalação de parques geradores ondomotrízes

Ao se considerar a extensão total do litoral do Estado de São Paulo, 622 km, pode-se verificar a potencialidade bruta total da costa, que é de 7,99 GW, ou seja, 69.961 GW/h.ano<sup>-1</sup>. Esse valor se refere ao resultado da equação de determinação do Fluxo Energético (equação 6), cujo valor auferido foi de 12,84 kW/m. O Estado de São Paulo é uma área bastante propícia para a alocação de parques geradores oceânicos, pois todo o litoral central e norte possui áreas afins para a instalação. Esse fato se deve a formação geológica da Serra do Mar, que apresenta numerosos afloramentos de rochas Pré-cambrianas.

Com a equação 7 foi determinada a Largura Máxima de Captura, que impõe o limite máximo de abertura sem a perda de eficiência, cujo valor é de 20,12 m para a área de estudo. Este trabalho propõe a utilização de dispositivos modulares com abertura da câmara de 6 m, permitindo os parques geradores serem escalonados no tempo. A adoção dos 6 m de abertura implica uma potência máxima de 77 kW por unidade instalada, que corresponde a 0,67 GW/h.ano<sup>-1</sup> de energia bruta por unidade. A Tabela 3 apresenta o resultado energético final obtido, considerando a abertura da câmara de 6 m, espaçamento técnico entre módulos de 3 m (1,5 m esquerda e 1,5 m direita) e um rendimento global de 44%, conforme apresentado por Babarit (2015). Da tabela

observa-se que o resultado energético é de 11.113 GWh ao ano, proveniente de mais de trinta e sete mil módulos de geração, passíveis até de implementação por meio da Geração Distribuída (RN 482 ANEEL). No Apêndice A é apresentada a Tabela 4, com os resultados na sua forma estendida, com a identificação das 94 localidades propícias à implantação e suas respectivas contabilizações energéticas. Na Figura 8 é apresentada a estimativa da distribuição mensal da energia bruta e líquida. Observa-se ainda que os períodos mais energéticos são os meses de inverno, quando há baixa precipitação, o que indica complementariedade à fonte hídrica.

Tabela 3 - Potencial energético disponível por região para o estado de São Paulo

REGIÃO GEOGRÁFICA	UNIDADES GERADORAS	POTÊNCIA [MW]	ENERGIA BRUTA [GW/h.ano <sup>-1</sup> ]	RENDIMENTO [%]	ENERGIA [GW/h.ano <sup>-1</sup> ]
Região Sul	2.767	213	1.867,37	44	821,64
Região Central	5.396	415	3.641,60	44	1.602,30
Região Norte	29.265	2.253	19.750,08	44	8.690,04
<b>TOTAL</b>					11.113,98

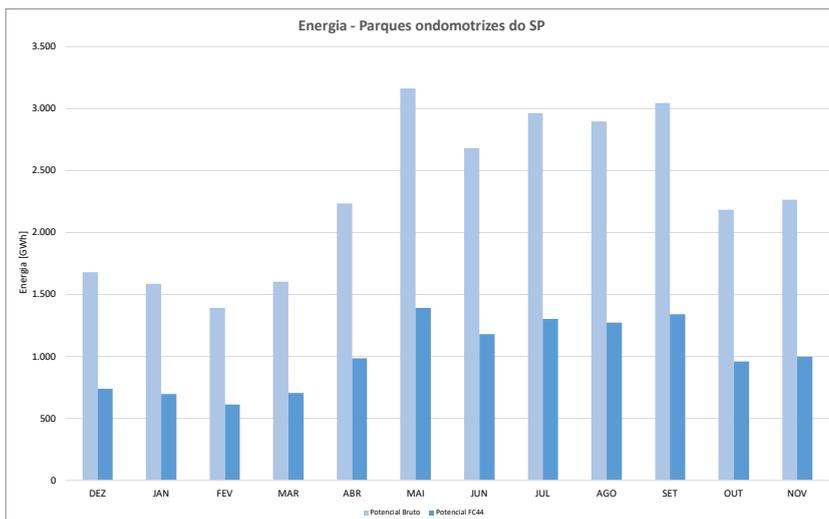


Figura 8 - Energia acumulada bruta e líquida (FC44) anual considerando o total do estado de São Paulo

## 5. CONCLUSÕES

A matriz de geração elétrica brasileira se apresenta majoritariamente hidráulica desde o início da eletrificação nacional. Apenas duas décadas atrás essa matriz era composta basicamente pela hidroeletricidade e uma parcela de geração térmica (incluindo a term nuclear). Na atualidade, a fonte hidráulica ainda é responsável por mais de 60% de toda a oferta nacional. Contudo, nos últimos vinte anos intensificou-se o processo de diversificação da matriz, que hoje conta com diversos empreendimentos eólicos, solares, a biomassa e gás natural. Nesse processo de diversificação, a geração eólica ganhou representatividade e hoje já é responsável por 11% de toda a oferta, contando com uma projeção de curto prazo que elevará sua participação para mais de 14%. O processo de consolidação da fonte eólica contou com a criação de um arcabouço legal que gerou incentivos (PROINFA) e possibilitou sua maturação, fixação e o *status* de fonte comercial com rentabilidade financeira. Outra fonte que ganhou destaque principalmente nos últimos seis anos foi a energia solar, que hoje tem 2% de participação, mas com projeção para mais de 8% no curto prazo, tendendo a crescer ainda mais no longo prazo. Sua consolidação também é devida a incentivos fiscais que possibilitaram a redução do custo, assim como a criação da figura do micro gerador na Geração Distribuída, viabilizando o crédito de energia junto a concessionária local. Assim fica explícito que o processo de consolidação de uma nova fonte é diretamente dependente da criação de um estatuto regulatório próprio, bem como de incentivos financeiros e investimentos (fiscais, industriais ou pessoais, como no caso do micro gerador). Novas tecnologias emergentes, mesmo que disruptivas, como é o caso das energias oceânicas, devem fazer parte da pauta do Planejamento, bem como deve haver a criação de um arcabouço regulatório próprio com incentivos voltados a sua maturação e consolidação. Na Europa, a energia oceânica já é objeto de estudos há quase 50 anos e possui uma agência de fomento própria, além de verba destinada exclusivamente para o seu desenvolvimento.

No Brasil, o Planejador Nacional considera em seu último estudo, o PNE 2050, a inserção de fontes de geração hidráulica com restrições ambientais e a inserção de fontes fósseis, caso o cenário de alta demanda se concretize. Esse fato segue no sentido contrário do que preconizam os principais conceitos ambientais e de Transição Energética, que foram considerados abertamente no PNE 2050. A menção da energia oceânica é apresentada no Plano apenas de forma qualitativa, quando da demonstração da abundância de recursos energéticos disponíveis. Contudo, ainda não é contabilizada como fonte a ser inserida na matriz energética. Como apresentado anteriormente, a

potencialidade das energias oceânicas no Brasil é da ordem de 998.640 GWh.ano<sup>-1</sup>, o que corresponde a 1,6 vezes a produção total de energia elétrica em 2020 (621.219 GWh). Portanto, trata-se de um recurso energético considerável, merecendo uma maior atenção por parte do Planejador Nacional.

Este artigo é a apresentação parcial de um inventário ondomotriz de todo o litoral brasileiro, em que é quantificada e apresentada uma parcela extremamente relevante desse potencial, e que pode ser considerado nas próximas análises do planejamento. Almeja-se que este estudo possa servir como um incentivo para que essa fonte passe a ser contabilizada nas próximas análises do planejamento, em detrimento do incremento de fontes fósseis ou de empreendimentos com restrições ambientais. A delimitação deste estudo é para o aproveitamento da energia ondomotriz por meio de dispositivos conversores do tipo coluna de água oscilante na costa paulista, o que resultou em uma potencialidade bruta de 25.259 GWh.ano<sup>-1</sup>, ou 11.113 GWh.ano<sup>-1</sup> considerando o rendimento global de 44%. O valor é superior ao consumo de eletricidade no Estado de Santa Catarina em 2020 (9.800 GWh), ou seja, bastante relevante para o Planejamento, principalmente quando considerados os desafios de atendimento da demanda caso o cenário de crescimento venha a se concretizar.

Tecnologias emergentes e disruptivas devem fazer parte recorrentemente do Planejamento. Percebe-se nos dias atuais um movimento crescente para a inclusão da conversão de energia por meio do hidrogênio, e tal movimento poderia se estender a energia ondomotriz, haja visto o imenso potencial da costa brasileira. Como se trata de uma fonte em desenvolvimento, diversas vertentes se apresentam factíveis para sua inserção na matriz, como por exemplo, o desenvolvimento por meio da Geração Distribuída, permitindo a grandes consumidores investirem em pequenos módulos de geração com a possibilidade de escalar a geração quando da necessidade. Outra vertente seria o deslocamento da geração hidroelétrica, que pode ser entendido como uma forma de armazenamento físico de energia, uma vez que a energia oceânica pode complementar a energia hidráulica no período de inverno. Além, claro, do aproveitamento comercial direto.

Muitas são as formas de se inserir a energia oceânica dentro do Planejamento atual, mas é preciso ter em mente que é necessário iniciar seus estudos e construir um arcabouço regulatório próprio, prevendo incentivos para maturação e fixação da mesma na matriz de geração.

## 6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BABARIT, A. A database of capture width ratio of wave energy converters. *Renewable Energy*, v. 80, p. 610–628, ago. 2015.

BRASIL, M. DE M. E. Plano Nacional de Energia 2050 - PNE 2050. Brasília - DF: [s.n.].

CARVALHO, J. T. Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2010.

CORNETT, A. M. A Global Wave Energy Resource Assessment. The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Anais...Vancouver: 2008.

CPRM, S. G. DO B. GeoSGB. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 5 maio. 2021.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. 1. ed. New Jersey: World Scientific Publishing Co., 1991.

DIZADJI, N.; SAJADIAN, S. E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. *Energy*, v. 36, n. 5, p. 2360–2366, maio 2011.

EPE, E. DE P. E. Balanço Energético Nacional 2021 ano base 2020. Brasília - DF: [s.n.].

ESPINDOLA, R. L. Mapeamento de sites com potencial para geração de energia ondomotriz por meio de análise de decisão multicritério. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

ESPINDOLA, R. L.; ARAÚJO, A. M. Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data. *PLOS ONE*, v. 12, n. 8, p. e0183501, 17 ago. 2017.

FALCÃO, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 3, p. 899–918, abr. 2010.

FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, v. 85, p. 1391–1424, jan. 2016.

FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C.; GATO, L. M. C. Self-rectifying air turbines for wave energy conversion: A comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 1231–1241, ago. 2018.

FLEMING, F. P. Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

FOLLEY, M. The Wave Energy Resource. In: [s.l.: s.n.]. p. 43–79.

HOLTHUIJSEN, H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. [s.l.] Cambridge University Press, 2007.

HUSSAIN, A.; ARIF, S. M.; ASLAM, M. Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 71, p. 12–28, maio 2017.

IBARRA-BERASTEGI, G. et al. Electricity production, capacity factor, and plant efficiency index at the Mutriku wave farm (2014–2016). *Ocean Engineering*, v. 147, p. 20–29, jan. 2018.

IBGE, I. B. DE G. E. Portal de mapas do IBGE. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>>. Acesso em: 5 maio. 2021.

INDE, I. N. DE D. E. Portal INDE. Disponível em: <<https://www.inde.gov.br/>>. Acesso em: 5 maio. 2021.

IRENA, I. R. E. A. *Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies*. Abu Dhabi: [s.n.].

KHALIGH, A.; ONAR, O. C. Ocean Wave Energy Harvesting. In: *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. p. 223–303.

LEKUBE, J. et al. Output power improvement in oscillating water column-based wave power plants. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, v. 15, n. 2, p. 145, 5 mar. 2018.

LOPES, B. S. C. Construção e ensaio de um modelo de turbina de ar auto-retificadora de rotor duplo para sistemas de aproveitamento da energia das ondas. [s.l.] Universidade Técnica de Lisboa, 2017.

OES, O. E. S. OES | Ocean Energy Systems. Disponível em: <<https://www.ocean-energy-systems.org/>>. Acesso em: 17 abr. 2021.

OSTRITZ, F. F. Estimativa do Potencial Energético Gerado por Ondas na Costa do Brasil com ênfase no estado do Ceará. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica)—COPPE. UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, n. 1, p. 53–70, mar. 2010.

POST, J. W. et al. Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, v. 288, n. 1–2, p. 218–230, fev. 2007.

SHEHATA, A. S. Investigation and Improvement of Wells Turbine Performance: Fluid Analysis & 2nd Law of Thermodynamics Study. [s.l.] University of Strathclyde, 2016.

SMIL, V. Energy transitions: history, requirements, prospects. 1. ed. Santa Barbara: ABC-CLIO, 2010. v. 1

TOLMAN, H. L. The WAVEWATCH III Development Group: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. Environmental Modeling Center, National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, 2014.

TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: EPE, Empresa de Pesquisa Energética, 2016. v. 1

ZABIHIAN, F.; FUNG, A. S. Review of marine renewable energies: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 5, p. 2461–2474, jun. 2011.

ZHANG, W. et al. Review of the applied mechanical problems in ocean thermal energy conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 93, p. 231–244, out. 2018.

## APÊNDICE

Tabela 4 - Resultados energéticos por localidade identificada

REGIÃO GEOGRÁFICA	SITE ID	UNIDADES GERADORAS	POTÊNCIA [MW]	ENERGIA BRUTA [GW/h.ano <sup>-1</sup> ]	RENDIMENTO [%]	ENERGIA [GW/h.ano <sup>-1</sup> ]
REGIÃO SUL	86	130	10,01	87,73	44	38,60
	87	100	7,70	67,49	44	29,69
	88	317	24,41	213,93	44	94,13
	89	81	6,24	54,66	44	24,05
	90	368	28,34	248,35	44	109,28
	91	136	10,47	91,78	44	40,38
	92	26	2,00	17,55	44	7,72
	93	63	4,85	42,52	44	18,71
	94	385	29,65	259,83	44	114,32
	95	115	8,86	77,61	44	34,15
	96	149	11,47	100,56	44	44,24
	97	166	12,78	112,03	44	49,29
	98	33	2,54	22,27	44	9,80
	99	299	23,02	201,79	44	88,79
	100	183	14,09	123,50	44	54,34
	101	141	10,86	95,16	44	41,87
	102	32	2,46	21,60	44	9,50
103	43	3,31	29,02	44	12,77	
REGIÃO CENTRAL	104	474	36,50	319,89	44	140,75
	105	1436	110,57	969,11	44	426,41
	106	202	15,55	136,32	44	59,98
	107	717	55,21	483,88	44	212,91
	108	92	7,08	62,09	44	27,32
	109	17	1,31	11,47	44	5,05
	110	44	3,39	29,69	44	13,07
	111	565	43,51	381,30	44	167,77
	112	257	19,79	173,44	44	76,31
	113	152	11,70	102,58	44	45,14
	114	230	17,71	155,22	44	68,30
	115	36	2,77	24,30	44	10,69
	116	233	17,94	157,24	44	69,19
	117	184	14,17	124,18	44	54,64
	118	342	26,33	230,81	44	101,55
119	168	12,94	113,38	44	49,89	
120	247	19,02	166,69	44	73,34	

Tabela 4 - Resultados energéticos por localidade identificada (cont.)

REGIÃO GEOGRÁFICA	SITE ID	UNIDADES GERADORAS	POTÊNCIA [MW]	ENERGIA BRUTA [GW/h.ano <sup>-1</sup> ]	RENDIMENTO [%]	ENERGIA [GW/h.ano <sup>-1</sup> ]
REGIÃO NORTE	121	281	21,64	189,64	44	83,44
	122	32	2,46	21,60	44	9,50
	123	70	5,39	47,24	44	20,79
	124	102	7,85	68,84	44	30,29
	125	254	19,56	171,42	44	75,42
	126	76	5,85	51,29	44	22,57
	127	134	10,32	90,43	44	39,79
	128	232	17,86	156,57	44	68,89
	129	193	14,86	130,25	44	57,31
	130	206	15,86	139,02	44	61,17
	131	209	16,09	141,05	44	62,06
	132	108	8,32	72,89	44	32,07
	133	380	29,26	256,45	44	112,84
	134	289	22,25	195,04	44	85,82
	135	113	8,70	76,26	44	33,55
	136	207	15,94	139,70	44	61,47
	137	498	38,35	336,09	44	147,88
	138	150	11,55	101,23	44	44,54
	139	485	37,35	327,31	44	144,02
	140	313	24,10	211,23	44	92,94
	141	6589	507,35	4446,72	44	1956,56
	142	4113	316,70	2775,74	44	1221,33
	143	1385	106,65	934,70	44	411,27
	144	856	65,91	577,69	44	254,18
	145	65	5,01	43,87	44	19,30
	146	63	4,85	42,52	44	18,71
	147	250	19,25	168,72	44	74,24
	148	302	23,25	203,81	44	89,68
	149	55	4,24	37,12	44	16,33
	150	205	15,79	138,35	44	60,87
	151	243	18,71	163,99	44	72,16
152	754	58,06	508,85	44	223,90	
153	111	8,55	74,91	44	32,96	
154	494	38,04	333,39	44	146,69	
155	307	23,64	207,19	44	91,16	

Tabela 4 - Resultados energéticos por localidade identificada (cont.)

REGIÃO GEOGRÁFICA	SITE ID	UNIDADES GERADORAS	POTÊNCIA [MW]	ENERGIA BRUTA [GW/h.ano <sup>-1</sup> ]	RENDIMENTO [%]	ENERGIA [GW/h.ano <sup>-1</sup> ]
REGIÃO NORTE	156	118	9,09	79,63	44	35,04
	157	332	25,56	224,06	44	98,59
	158	808	62,22	545,30	44	239,93
	159	1351	104,03	911,75	44	401,17
	160	133	10,24	89,76	44	39,49
	161	474	36,50	319,89	44	140,75
	162	45	3,47	30,37	44	13,36
	163	1002	77,15	676,22	44	297,54
	164	179	13,78	120,80	44	53,15
	165	190	14,63	128,23	44	56,42
	166	451	34,73	304,37	44	133,92
	167	356	27,41	240,25	44	105,71
	168	114	8,78	76,94	44	33,85
	169	355	27,34	239,58	44	105,41
	170	154	11,86	103,93	44	45,73
	171	53	4,08	35,77	44	15,74
	172	177	13,63	119,45	44	52,56
	173	280	21,56	188,96	44	83,14
	174	20	1,54	13,50	44	5,94
175	79	6,08	53,31	44	23,46	
176	372	28,64	251,05	44	110,46	
177	254	19,56	171,42	44	75,42	
178	774	59,60	522,35	44	229,83	
179	1070	82,39	722,11	44	317,73	
<b>TOTAL</b>						11.113,98

## ANÁLISE DA INSERÇÃO DE SISTEMA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Jackson Nogueira Feitosa<sup>1</sup>  
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal Rural do Semi-Árido*

DOI: 0.47168/rbe.v28i3.687

### RESUMO

O Brasil é considerado recordista em incidência de descargas atmosféricas e, anualmente, cerca de 78 milhões de raios incidem sobre o território nacional, fato justificado pelo seu clima e extensão territorial. O país também possui um grande potencial em geração de energia solar com expressivo crescimento nos últimos anos. Em seu funcionamento, os sistemas fotovoltaicos estão expostos a diversas intempéries como, por exemplo, à incidência de descargas atmosféricas, tendo em vista que algumas de suas instalações ocupam grandes áreas sendo alocadas na parte superior de edifícios ou sobre o solo. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo realizar o estudo da inserção de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas em instalações fotovoltaicas sobre as diretrizes da NBR 5419:2015. Esses sistemas de geração possuem um alto valor agregado e qualquer dano pode ocasionar perdas econômicas e danos físicos aos seres humanos. Assim, a presente pesquisa realizou um estudo utilizando dados da minigeração fotovoltaica de 150,8 kWp localizada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, campus Mossoró, RN. Os resultados se mostraram satisfatórios e foi possível determinar em qual porte de usina solar fotovoltaica um SPDA (Sistema Contra Descargas Atmosféricas) se faz necessário para sua proteção.

Palavras-chave: Energia solar; Sistemas fotovoltaicos; Geração fotovoltaica; SPDA.

### ABSTRACT

Brazil is considered the recordist in the incidence of atmospheric discharges, and annually about 78 million lightning strikes affect the national territory, a fact justified by its climate and territorial extension. The country also has a great potential in solar energy generation with significant growth in recent years. In its operation, photovoltaic systems are exposed to different weather conditions, such as the incidence of

atmospheric discharges, considering that some of their installations occupy large areas and are located on the top of buildings or on the ground. This way, this work aimed to carry out the study of the insertion of an atmospheric discharge protection system in photovoltaic installations under the guidelines of NBR 5419:2015. These generation systems have a high added value and any damage can cause economic losses and physical damage to human beings. Therefore, the present research carried out a study using data from the photovoltaic mini generation of 150.8 kWp located at Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró campus, RN. The results were satisfactory and it was possible to determine in which size of a photovoltaic solar plant a SPDA (Atmospheric Discharge Protection System) is necessary for its protection.

Keywords: Solar energy; Photovoltaic systems; Photovoltaic generation; SPDA.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar obteve grandes avanços nos últimos anos devido à crescente busca por fontes alternativas renováveis de energia elétrica. Essa busca ocorre primordialmente devido à necessidade de diversificação e complementariedade da matriz elétrica e energética utilizando-se de fontes renováveis de energia, como também devido às questões ambientais, visando diminuir a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. A nível nacional essa evolução é notada pelo fato de o Brasil já acumular a potência instalada de aproximadamente 9,0 GW em sistemas fotovoltaicos, e deste total, 5,4 GW estão alocados em geração distribuída, que corresponde aproximadamente a 470 mil sistemas instalados (ABSOLAR, 2021).

Para a boa captação desse potencial fotovoltaico, os painéis solares devem ser instalados sobre telhados de edifícios, residências ou em estruturas fixadas em solo. Devido à grande exposição à radiação solar, esses equipamentos se tornam susceptíveis a várias intempéries como: chuva, vento e descargas atmosféricas. A incidência de um raio sobre a estrutura pode danificar equipamentos, causar interrupção na geração de energia, ferimentos a seres vivos e prejuízos econômicos (LISBOA, 2018).

Segundo relatório desenvolvido em 2020 pelo Grupo de Eletricidade Atmosféricas (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil se destaca mundialmente no número de descargas atmosféricas, incidindo sobre seu território 77,8 milhões de raios anualmente devido à sua extensão territorial, localização e seu clima tropical (ELER, 2020). A análise criteriosa para o uso de sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é essencial vi-

sando buscar diminuir os riscos de prejuízos financeiros e de vida humana.

Com isso, o presente artigo realizou a análise da inserção de Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas em sistemas fotovoltaicos atendendo às orientações dispostas na NBR 5419:2015 – Parte II. Dessa forma, foi realizado um estudo na minigeração distribuída de 150,8 kWp da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, localizada em Mossoró, Rio Grande do Norte.

A cidade possui uma densidade de descargas atmosféricas de aproximadamente 3,025 raios por km<sup>2</sup>/ano, ocupando a posição 3262º (terceiro milésimo ducentésimo sexagésimo segundo) no *ranking* nacional (INPE, 2021). Conforme Anexo F da Parte II da NBR 5419:2015 esta posição é justificada pela sua localização ser na região Nordeste do país, e concentrações maiores de descargas tenderem a ocorrer nas demais regiões.

Foram coletados todos os dados para a realização do gerenciamento de risco. Posteriormente, os riscos descritos na normativa foram calculados para a determinação da necessidade de um SPDA para a proteção do sistema estudado.

Este artigo está baseado em Feitosa (2021), que fez a pesquisa original no âmbito de um Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado em 2021 na curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção foram apresentadas as características que constituem as unidades de micro e minigeração distribuída de fonte fotovoltaica e sua atuação no panorama brasileiro. Além disso, foi tratado sobre as características de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas e os parâmetros para avaliar sua necessidade, além de sua aplicação em sistemas fotovoltaicos.

### 2.1 Micro e minigeração distribuída fotovoltaica

A conversão da energia solar em elétrica é obtida através de módulos fotovoltaicos e inversores, sendo o primeiro responsável por captar a energia solar e transformá-la em corrente elétrica contínua, e o segundo responsável por convertê-la em corrente alternada. Sistemas solares podem ser conectados à rede elétrica da concessionária local, *on-grid*, ou desconectados, *off-grid*.

Conforme descrito em ANEEL (2016), as categorias: mini e microgeração PV consistem na produção de energia elétrica a partir de

Conforme descrito em ANEEL (2016), as categorias: mini e microgeração PV<sup>1</sup> consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais que utilizam fontes renováveis para geração de energia elétrica conectadas à rede elétrica da concessionária, sendo a microgeração constituída por instalações com menos de 75 kW de potência instalada e a minigeração por sistemas acima desse valor até 5 MW.

Em ABSOLAR (2021), é mostrada a disposição por segmentos da geração distribuída fotovoltaica no Brasil. Identifica-se que setor residencial lidera com o maior número de sistemas instalados e potência instalada, sendo o último com valores próximos do setor comercial e serviços. Isso ocorre porque o consumo de energia do setor comercial é maior, portanto, há a necessidade de uma potência instalada de geração superior.

## **2.2 Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA)**

A NBR 5419:2015 - Proteção contra Descargas Atmosféricas, define SPDA como um sistema utilizado para reduzir os danos físicos originados por uma descarga atmosférica que incide sobre uma estrutura. É constituído por três subsistemas:

- Subsistema de captação: parte de um SPDA externo que se utiliza de elementos metálicos como hastes, condutores em malha ou cabos em catenária que são posicionados e projetados para a interceptação de descargas atmosféricas.
- Subsistema de descida: tem a finalidade de conduzir a descarga do subsistema de captação para o subsistema de aterramento.
- Subsistema de aterramento: é responsável por conduzir e dispersar a descarga atmosférica no solo.

Na Figura 1 (BARBOSA, 2014) é possível identificá-los. O captor representa o subsistema de captação, o condutor de descida, o subsistema de descida e o de aterramento representado pelos eletrodos.

---

<sup>1</sup> Abreviação de Fotovoltaico em inglês.

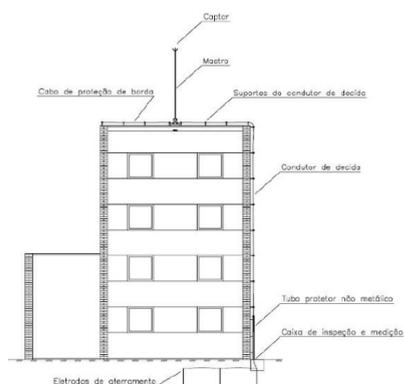


Figura 1 – Subsistemas de um SPDA

A normativa também define que a ocorrência de um raio sobre uma edificação, ou equipamento, pode gerar danos físicos aos seres humanos e falhas em sistemas internos, podendo acarretar em perdas de vida humana, perdas de patrimônio cultural, perdas de serviços, bem como perdas financeiras. Inclusive, a normativa aponta as características da estrutura que devem ser analisadas para identificar se a mesma necessita de um SPDA e como projetá-lo (NBR 5419, 2015).

### 2.2.1 Gerenciamento de risco

De acordo com a NBR 5419-2:2015, para definir se determinada estrutura necessita ou não de SPDA se faz necessária a realização de uma análise de risco. Para este estudo, as fontes de danos devem ser analisadas, sendo elas: descargas atmosféricas na estrutura ( $S_1$ ); perto da estrutura ( $S_2$ ); na linha ( $S_3$ ); perto da linha ( $S_4$ ).

As descargas provenientes dessas quatro fontes podem causar três tipos de danos, que são: ferimentos a seres vivos ( $D_1$ ); danos físicos ( $D_2$ ); e falha de sistemas eletrônicos ( $D_3$ ). Tais danos podem gerar sozinhos, ou combinados, diferentes tipos de perdas, sendo elas classificadas em quatro categorias: perdas de vida humana ( $L_1$ ); de serviço público ( $L_2$ ); de patrimônio cultural ( $L_3$ ); e de valores econômicos ( $L_4$ ). A Figura 2 (NBR 5419, 2015) caracteriza os tipos de perdas associadas aos tipos de danos e fontes de descargas atmosféricas.

Descarga atmosférica		Estrutura	
Ponto de impacto	Fonte de danos	Tipo de danos	Tipo de perdas
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 <sup>a</sup> L1, L2, L3, L4 L1 <sup>b</sup> , L2, L4
	S2	D3	L1 <sup>b</sup> , L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 <sup>a</sup> L1, L2, L3, L4 L1 <sup>b</sup> , L2, L4
	S4	D3	L1 <sup>b</sup> , L2, L4

<sup>a</sup> Somente para propriedades onde animais possam ser perdidos.  
<sup>b</sup> Somente para estruturas com risco de explosão ou para hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos podem imediatamente colocar em perigo a vida humana.

Figura 2 – Tipos de perdas e danos associados as fontes de danos

Para cada perda há um risco associado,  $R_1$  a  $R_4$ , respectivamente, que deve ser avaliado de acordo com os cálculos de suas componentes de riscos  $R_A, R_B, R_C, R_M, R_U, R_V, R_W$  e  $R_Z$ . Elas são divididas em descargas atmosféricas na estrutura, perto da estrutura, em uma linha conectada a estrutura e perto da linha. As componentes relacionadas às descargas na estrutura são:

- $R_A$ : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora nas zonas até 3 m ao redor dos condutores de descidas.
- $R_B$ : componente relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente.
- $R_C$ : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP.

A componente de risco para descargas próximas à estrutura é:

- $R_M$ : componente relativo a falhas de sistemas internos causadas por LEMP.

Para descargas na linha conectada:

- $R_U$ : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura.
- $R_V$ : componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas, geralmente no ponto de entrada da linha na estru-

tura) devido à corrente da descarga atmosférica transmitida ou ao longo das linhas.

- $R_w$ : componente relativo a falhas de sistemas internos causadas por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta.

Para descargas próximas a linha conectada:

- $R_z$ : componente relativo a falhas de sistemas internos causadas por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta.

Por meio da equação (1) é possível obter as componentes de riscos.

$$R_x = N_x \times P_x \times L_x \tag{1}$$

Em que,  $N_x$  é o número de eventos perigosos por ano,  $P_x$  a probabilidade de dano a estrutura e  $L_x$  é a perda consequente. A Tabela 1 (NBR 5419, 2015) ilustra o cálculo das componentes de riscos de acordo com os tipos e fontes de danos.

Tabela 1 – Cálculo das componentes de riscos de acordo com o tipo e fonte de dano

Danos	Fonte de danos			
	S1 Descarga atmosférica na estrutura	S2 Descarga atmosférica perto da estrutura	S3 Descarga atmosférica na linha conectada	S4 Descarga atmosférica perto da linha conectada
D1 Ferimentos a seres vivos a choque elétrico	$R_A = N_D \times P_A \times L_A$		$R_U = (N_L + N_{D,U}) \times P_U \times L_U$	
D2 Danos físicos	$R_B = N_D \times P_B \times L_B$		$R_V = (N_L + N_{D,V}) \times P_V \times L_V$	
D3 Falha desistemas eletrônicos	$R_C = N_D \times P_C \times L_C$	$R_M = N_m \times P_M \times L_M$	$R_W = (N_L + N_{D,W}) \times P_W \times L_W$	$R_Z = N_I \times P_Z \times L_Z$

Com as componentes de riscos calculadas, é possível obter os riscos  $R_1$  a  $R_4$  a partir da equação (2), equação (3), equação (4) e equação (5).

$$R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1} \quad (2)$$

$$R_2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z2} \quad (3)$$

$$R_3 = R_{B3} + R_{V3} \quad (4)$$

$$R_4 = R_{A4} + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4} + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4} \quad (5)$$

Após computados os valores de cada tipo de risco, deve-se compará-los com o valor de risco tolerável descrito pela NBR 5419:2015. Assim, se o valor de risco encontrado for menor que o risco tolerável determinado para cada tipo de perda, a instalação não necessitará de um SPDA, caso contrário é necessário sua instalação. A Tabela 2 (NBR 5419, 2015) mostra os valores de risco tolerável.

Tabela 2 – Valores de risco tolerável (RT)

Tipo de Perda		RT(y <sub>-1</sub> )
L <sub>1</sub>	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	10 <sup>-5</sup>
L <sub>2</sub>	Perda de serviço público	10 <sup>-3</sup>
L <sub>3</sub>	Perda de patrimônio cultural	10 <sup>-4</sup>

Para a análise da perda de valores econômicos, L<sub>4</sub>, um estudo apresentado no Anexo D da NBR 5419:2015 – Parte II, deve ser realizado. Porém, se não for possível obter os dados para essa avaliação, a norma define que o valor de risco tolerável igual a 10<sup>-3</sup> pode ser considerado.

É permitido o estudo da estrutura como uma única zona definida Z<sub>S</sub>, porém usar essa definição pode levar a adoção de soluções de proteção mais onerosas, já que elas devem ser adotadas para toda a zona. Neste caso é legítimo dividi-la em múltiplas zonas Z<sub>S</sub>. Dessa forma, o projetista tem maior possibilidade de analisar as componentes de riscos associadas às características de cada parte da estrutura e escolher as medidas de proteção mais adequadas para cada zona. O risco total para essa situação é a soma dos riscos de todas as zonas que compõem a estrutura.

### 2.3 SPDA em sistemas fotovoltaicos

A geração de energia elétrica que se utiliza do sistema de energia solar com módulos fotovoltaicos instalados sobre telhados ou em solo tornou esses equipamentos expostos às descargas atmosféricas diretas e indiretas devido à sua interface voltada para captação da radiação solar. O potencial de produção de energia elétrica é diretamente dependente da área de captação dos módulos fotovoltaicos. Dessa forma, quanto maior o porte do sistema, maior será o número de módulos e o risco de exposição a descargas atmosféricas (NASCIMENTO et al., 2016).

Segundo Gomes (2018), o uso de proteção contra descargas atmosféricas é recomendado nas instalações fotovoltaicas, com a finalidade de evitar grandes danos aos equipamentos integrantes da geração. Portanto, os riscos e a eventual inevitabilidade de proteção contra raios devem ser analisados em projeto e assim, dimensionar e utilizar corretamente os dispositivos de proteção para a diminuição de falhas elétricas e evitar uma interrupção de geração.

Assim, em instalações fotovoltaicas o SPDA deve proteger toda área abrangida pelos módulos fotovoltaicos e a edificação que serve de abrigo para os equipamentos de condicionamento de potência. Vale salientar que o sistema tem de estar interligado a um conjunto de aterramento adequado, bem como o inversor, os dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) e o quadro de aterramento do quadro geral da instalação (PINHO, 2014).

A Figura 3 (CLAMPER, 2017) demonstra uma ilustração de como o sistema fotovoltaico deve ser protegido, e a Figura 4 (SANTOS, 2020) uma situação real.

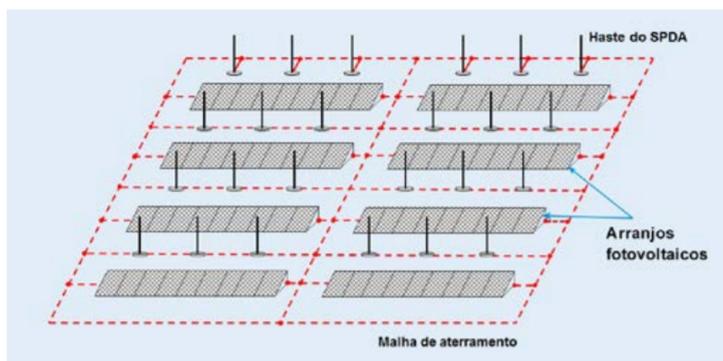


Figura 3 – Layout de um SPDA em um sistema fotovoltaico



Figura 4 – Instalações reais de um SPDA em um sistema fotovoltaico<sup>1</sup>

### 3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada como instrumento de pesquisa a usina fotovoltaica de 150,8 kWp de potência instalada, localizada na UFERSA, Campus Mossoró, RN. É composta por 580 módulos fotovoltaicos Canadian Solar de 260 kWp, modelo CS6P260P-SD, interligados a 10 inversores Ginlong SOLIS de 15 kW, trifásicos. A energia gerada é injetada na rede de distribuição da Universidade através de um transformador de 150 kVA, 13800/380 V.

Os painéis fotovoltaicos estão alocados em uma estrutura metálica, com o ponto mais alto à 1,7 m do solo, distribuídos em 5 arranjos com 116 módulos cada, e possuem aterramento. O solo é protegido por uma camada de brita para evitar o surgimento de tensões de passo. Além da área de captação, a minigeração também é composta por uma pequena edificação que é o abrigo para os inversores, quadro elétrico, *stringboxes* e demais equipamentos. Na estrutura não existe proteção de SPDA e está inserida em um ambiente urbano, porém está localizada de forma isolada dos demais prédios da Universidade. O *layout* da usina é mostrado na Figura 5 (UFERSA, 2017).

<sup>1</sup> As hastes de captação devem ser posicionadas de forma que não gerem sombreamento no sistema, não ocasionando assim impactos na geração de energia.



Figura 5 – *Layout* da minigeração fotovoltaica da UFRSA – Campus Mossoró

Os módulos fotovoltaicos mostrados na Figura 5 são conectados aos inversores através de cabos de 4,00 mm<sup>2</sup>, com tensão máxima suportável de 1 kV em eletroduto subterrâneo. Durante a inspeção visual, como também no estudo do projeto executivo, não foi identificado qualquer tipo de blindagem nos cabos de energia contínua e alternada. Vale salientar que na região de captação não há aviso contra choques elétricos e linha de sinal conectada. A edificação onde os inversores são alocados é constituída por uma estrutura de alvenaria com piso de concreto, conforme mostra a Figura 6.



Figura 6 – Abrigo dos inversores da minigeração fotovoltaica da UFRSA – Campus Mossoró

Na estrutura mostrada na Figura 6 adentram os cabos provenientes dos painéis, interligados a dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) Classe II de corrente contínua alocados em suas respectivas stringbox. Os circuitos terminais dos inversores são conectados nos barramentos fase, neutro e terra do quadro geral. O circuito de saída para o transformador elevador é conectado a um DPS de corrente alternada Classe II. O quadro elétrico é provido de aviso de riscos de choques elétricos. Para melhor visualização foi elaborado um diagrama unifilar simplificado de um circuito da usina com suas proteções, ilustrado na Figura 7.

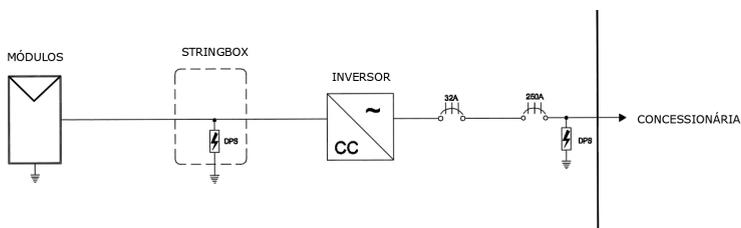


Figura 7 – Diagrama simplificado de um circuito da minigeração fotovoltaica da UFERSA – Campus Mossoró

Na edificação dos inversores também é introduzida uma linha de sinal, de forma aérea, para a comunicação dos dados de produção do inversor para um servidor. Esta linha é composta por cabos de fibra ótica. Para o cálculo do gerenciamento de risco foi desenvolvida uma planilha eletrônica automatizada, de acordo com os parâmetros descritos na NBR 5419-2:2015. A planilha utiliza características da estrutura e das linhas de energia e sinal conectadas como parâmetros de entradas para a análise da inserção de um SPDA ao sistema.

No presente trabalho foram analisadas duas situações distintas: toda a estrutura principal como uma zona única, e posteriormente com duas zonas, sendo elas divididas em zona de captação, onde os módulos estão alocados, e a zona de transformação, onde os inversores estão alocados.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção foram apresentadas as componentes de riscos obtidas em cada situação analisada, bem como o risco total mensurado. O valor calculado é comparado com o risco tolerável descrito pela

NBR 5419:2015 para cada tipo de perda, conforme a Tabela 2 do tópico 2.2.1 deste trabalho. Vale salientar que as componentes relacionadas às perdas do tipo  $L_2$  e  $L_3$  não foram mensuradas, pois não se trata de uma instalação que possui algum tipo serviço público ou patrimônio cultural.

O estudo para o risco relacionado às perdas de vidas humanas considerou o número médio de 20 pessoas com duração de permanência de 8 horas por ano na estrutura. A usina é objeto de estudo de vários discentes e docentes da instituição, além de receber visitas de turmas de alunos da graduação e *workshops* realizados durante o ano.

Para a avaliação do risco  $R_4$ , relacionado às perdas de valor econômico, foi considerado o valor representativo de risco tolerável igual a  $10^{-3}$ . Tal fato ocorre porque não é de conhecimento os valores da estrutura, do conteúdo das zonas e dos sistemas internos. Por consequente, não é possível realizar uma avaliação de risco de acordo com o Anexo D da NBR 5419-2 devido à indisponibilidade desses dados.

#### 4.1 Análise da usina fotovoltaica como zona única

Para esta análise foi considerada a cerca metálica (aproximadamente 44 m de comprimento e 65 m de largura) que resguarda a usina como os limites da zona. A altura considerada foi a maior, os 3 m do abrigo dos inversores, tratando a estrutura como o bloco retangular. A Figura 8 (adaptada de UFERSA, 2017) mostra a vista aérea da zona.



Figura 8 – Delimitação da zona

Utilizando as características gerais mostradas na seção 3 e com

a delimitação do volume a ser protegido, é possível calcular cada componente de risco. A Tabela 3 expõe as componentes de riscos para perdas do tipo  $L_1$  e  $L_4$ .

Tabela 3 – Risco relacionado à perda  $L_1$  e  $L_4$

Zona Única		
Componentes de Riscos	Risco $R_1$	Risco $R_4$
$R_A$	$1,40246 \times 10^{-13}$	0
$R_B$	$7,01229 \times 10^{-11}$	$7,67845 \times 10^{-7}$
$R_C$	0	$3,07138 \times 10^{-8}$
$R_M$	0	0
$R_U$	$5,52533 \times 10^{-16}$	0
$R_V$	$2,76266 \times 10^{-13}$	$3,02512 \times 10^{-9}$
$R_W$	0	$6,05023 \times 10^{-9}$
$R_Z$	0	$6,05023 \times 10^{-7}$
TOTAL	$7,05399 \times 10^{-11}$	$1,41266 \times 10^{-6}$

Nota: A descrição das componentes de risco, listadas na primeira coluna desta tabela, pode ser consultada na seção 2.2.1 deste trabalho.

As componentes de riscos  $R_C$ ,  $R_M$ ,  $R_W$  e  $R_Z$  mostradas na Tabela 3, relacionadas ao risco  $R_1$ , estão com valores iguais a zero por não ocorrer risco de explosão no local. Também, as parcelas  $R_A$  e  $R_U$ , que compõem o risco  $R_4$ , resultaram no valor zero devido à não presença de animais na estrutura.

Pode-se visualizar que as componentes relacionadas a perda de vida humana são bem baixas, fato explicado pela baixa circulação de pessoas na estrutura. Os fatores de redução como tipo de superfície, o baixo índice de explosão, incêndio e pânico, e a presença de extintores no local reduzem os valores das componentes de risco  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_U$  e  $R_V$  do risco  $R_1$ . Comparando os valores encontrados de  $R_1$  e  $R_4$  aos valores de risco toleráveis demonstrados na Tabela 2, é possível afirmar que a estrutura não necessita de um SPDA para esta forma de análise.

#### 4.2 Análise da usina fotovoltaica como multizonas

Nesta etapa a estrutura foi dividida em duas zonas  $Z_S$ : a zona de captação ( $Z_1$ ), formada pelos módulos fotovoltaicos, e a zona de transformação ( $Z_2$ ) contemplada pelo abrigo dos inversores. A Figura 9

(adaptada de UFERSA, 2017) mostra essa divisão espacial.



Figura 9 – Delimitações das zonas  $Z_1$  e  $Z_2$

De acordo com o projeto executivo da minigeração distribuída, disponibilizado pela UFERSA, a zona  $Z_1$  possui um comprimento de aproximadamente 20 m e largura de 59 m, e a zona  $Z_2$  com comprimento de 2 m e largura de 8,5 m. A Tabela 4 dispõe dos valores das componentes de riscos relacionados às perdas do tipo  $L_1$  e  $L_4$  para a zona de captação, e a Tabela 5 para a zona de transformação.

Tabela 4 – Risco relacionado às perdas  $L_1$  e  $L_4$  para a zona  $Z_1$

Zona $Z_1$ - Captação		
Componentes de Riscos	Risco $R_1$	Risco $R_4$
$R_A$	$2,85592 \times 10^{-14}$	0
$R_B$	$1,42796 \times 10^{-11}$	$3,12723 \times 10^{-7}$
$R_C$	0	$1,25089 \times 10^{-8}$
$R_M$	0	0
$R_U$	$5,52533 \times 10^{-16}$	0
$R_V$	$2,76266 \times 10^{-13}$	$6,05023 \times 10^{-9}$
$R_W$	0	$1,21005 \times 10^{-8}$
$R_Z$	0	$1,21005 \times 10^{-6}$
TOTAL	$1,45850 \times 10^{-11}$	$1,55343 \times 10^{-6}$

Tabela 5 – Risco relacionado as perdas  $L_1$  e  $L_4$  para a zona  $Z_2$ 

Zona $Z_1$ - Captação		
Componentes de Riscos	Risco $R_1$	Risco $R_4$
$R_A$	$6,36060 \times 10^{-12}$	0
$R_B$	$3,18030 \times 10^{-12}$	$6,96486 \times 10^{-8}$
$R_C$	0	$2,78594 \times 10^{-9}$
$R_M$	0	0
$R_U$	$2,76266 \times 10^{-13}$	0
$R_V$	$1,38133 \times 10^{-13}$	$3,02512 \times 10^{-9}$
$R_W$	0	$6,05023 \times 10^{-9}$
$R_Z$	0	$6,05023 \times 10^{-7}$
TOTAL	$9,95530 \times 10^{-12}$	$6,86533 \times 10^{-7}$

A Tabela 6 caracteriza os valores totais de riscos  $R_1$  e  $R_4$  somando os riscos correspondentes em cada zona.

Tabela 6 – Risco relacionado às perdas  $L_1$  e  $L_4$ 

Riscos Totais	
Risco $R_1$	Risco $R_4$
$2,45403 \times 10^{-11}$	$2,23996 \times 10^{-6}$

Os resultados obtidos demonstram similaridade com a análise feita considerando a estrutura como zona única, como mostrado na subseção 4.1 desta seção. Nota-se que o valor total de risco  $R_1$  para esta verificação teve pouca variação, pois o número de pessoas e permanência na estrutura se mantiveram os mesmos. Além disso, foram distribuídos os números iguais de pessoas para cada uma.

É perceptível que os valores das componentes de riscos  $R_A$  e  $R_U$ , relacionadas às perdas de vida humana tiveram valores superiores na zona  $Z_2$ , pois foram considerados os diferentes tipos de solo nas zonas analisadas. Por exemplo, a brita possui um valor de redução menor que o concreto. As componentes  $R_B$  e  $R_V$  são mais elevadas porque a zona  $Z_1$  possui uma área de exposição maior. Percebe-se ainda que o valor global de  $R_4$  se elevou, fato que ocorreu devido à diferença da forma como a linha adentra a estrutura em cada zona, considerando a linha enterrada na zona  $Z_1$  e aérea na zona  $Z_2$ , elevando o valor da componente  $R_Z$  na zona  $Z_1$ .

Assim como na subseção 4.1 do presente artigo, o uso do SPDA se demonstrou dispensável devido aos valores de risco totais  $R_1$  e  $R_4$  descritos na Tabela 6 serem inferiores aos descritos na Tabela 2, e ao risco tolerável considerado de  $10^{-3}$  para perdas do tipo  $L_4$ . Porém, ao se extrapolar a área da usina para averiguar a partir de qual potência instalada é necessária a instalação de SPDA, identifica-se o valor de uma área 73 vezes maior que a original em cada zona, mantendo as mesmas características físicas de estrutura e linha da minigeração estudada. A Tabela 7 demonstra os valores obtidos para a zona  $Z_1$ , e Tabela 8 para zona  $Z_2$ .

Tabela 7 – Risco relacionado às perdas  $L_1$  e  $L_4$  para a zona  $Z_1$ ,

Zona $Z_1$ - Captação		
Componentes de Riscos	Risco $R_1$	Risco $R_4$
$R_A$	$8,76748 \times 10^{-11}$	0
$R_B$	$4,38374 \times 10^{-8}$	$9,6004 \times 10^{-4}$
$R_C$	0	$3,84016 \times 10^{-5}$
$R_M$	0	0
$R_U$	$5,52533 \times 10^{-16}$	0
$R_V$	$2,76266 \times 10^{-13}$	$6,05023 \times 10^{-9}$
$R_W$	0	$1,21005 \times 10^{-8}$
$R_Z$	0	$1,21005 \times 10^{-6}$
TOTAL	$4,39254 \times 10^{-8}$	$9,99669 \times 10^{-4}$

Tabela 8 – Risco relacionado às perdas  $L_1$  e  $L_4$  para a zona  $Z_2$ ,

Zona $Z_1$ - Captação		
Componentes de Riscos	Risco $R_1$	Risco $R_4$
$R_A$	$1,44549 \times 10^{-9}$	0
$R_B$	$7,22743 \times 10^{-10}$	$1,58281 \times 10^{-5}$
$R_C$	0	$6,33123 \times 10^{-7}$
$R_M$	0	0
$R_U$	$2,76266 \times 10^{-13}$	0
$R_V$	$1,38133 \times 10^{-13}$	$3,02512 \times 10^{-9}$
$R_W$	0	$6,05023 \times 10^{-9}$
$R_Z$	0	$6,05023 \times 10^{-7}$
TOTAL	$2,16864 \times 10^{-9}$	$1,70753 \times 10^{-5}$

Os valores totais dos riscos  $R_1$  e  $R_4$  descritos na Tabela 9 aumentaram em comparação aos resultados da Tabela 6. Isso ocorre devido ao aumento das componentes  $R_A$  e  $R_B$  correspondentes ao risco  $R_1$ , em relação aos valores das Tabelas 4 e 5, pela maior área de exposição. Inclusive, a elevação do risco  $R_4$  na zona  $Z_1$  decorre da elevação da componente  $R_B$ , decorrente do mesmo motivo. Com isso, obtêm-se uma potência instalada de aproximadamente 11,0 MWp, com 42.340 módulos fotovoltaicos instalados.

Tabela 9 – Risco relacionado às perdas  $L_1$  e  $L_4$

Riscos Totais	
Risco $R_1$	Risco $R_4$
4,60940 x10 <sup>-8</sup>	1,016745 x10 <sup>-3</sup>

Destaca-se ainda que para este estudo só foram avaliadas as características físicas da unidade de minigeração solar FV para a análise de perdas econômicas, pelo déficit dos valores econômicos da instalação. Em usinas de grande porte, com alto valor agregado, é sugerida a avaliação de acordo com o Anexo D contido na Parte II da NBR5419:2015, para uma análise mais minuciosa e criteriosa dos riscos relacionados as perdas do tipo  $L_4$ .

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da confecção da planilha de gerenciamento de risco foi possível realizar os cálculos das componentes e dos riscos associados. A mensuração das componentes de riscos é realizada com precisão considerando todas as casas decimais associadas, resultando em um valor bastante preciso. Além disso, a planilha evita possíveis erros que poderiam ocorrer no cálculo manual, além de ser uma maneira mais prática de realização da análise de risco.

De acordo com o objetivo inicial do presente trabalho, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Na estrutura analisada percebeu-se que não há necessidade da instalação do SPDA, pois os riscos de perda de vida humana são baixos em função de uma baixa circulação de pessoas no local analisado. Em relação a perda de valor econômico, obteve-se um montante abaixo do risco tolerável adotado, resultando na não inserção de um SPDA. Porém, uma análise desse tipo de perda pode suceder em um valor diferente se feita detalhadamente, utilizando os valores dos sistemas internos, estrutura e conteúdo de cada zona.

Com a extrapolação do tamanho da usina considerada a inserção de um SPDA se mostrou necessária para que as perdas de valores econômicas sejam reduzidas. Assim, conclui-se que usinas de pequeno porte, com as mesmas características apresentadas, não necessitam de um SPDA por apresentarem riscos baixos tendo como base a densidade de raios na cidade de Mossoró/RN. Vale salientar que cada instalação tem suas características e peculiaridades, portanto o estudo da inserção do sistema de proteção deve ser realizado independente do porte de micro ou minigeração solar FV.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. Site da Associação Brasileira de Energia solar fotovoltaica, 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em 12 de maio de 2021.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, p. 353, 2015.

BARBOSA. T. D. Proteção Contra Descargas Atmosféricas De Edificações Utilizando A Ferragem Estrutural. 2014. 56 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CLAMPER. Site da Clamper, 2017. Disponível em: [https://clamper.com.br/wpcontent/uploads/2017/06/MKT\\_012015\\_Guia\\_Sistemas-Fotovoltaicos\\_DIGITAL.pdf](https://clamper.com.br/wpcontent/uploads/2017/06/MKT_012015_Guia_Sistemas-Fotovoltaicos_DIGITAL.pdf). Acesso em 12 de maio de 2021.

ELER, G. Brasil, O País dos Raios. Superinteressante, p. 56-61, maio, 2020.

FEITOSA. J. N. F. Proteção Contra Raios e Surtos em Sistemas Fotovoltaicos. 2021. 8 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2021.

GOMES. A. J. S. Análise da Inserção de SPDA em Sistemas Fotovoltaicos. 2021. 73 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018.

INPE. Grupo de Eletricidade Atmosférica, 2021. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>. Acesso em 12 de maio de 2021.

LISBOA, B. R. Estudo De Proteção Contra Descargas Atmosféricas Diretas em uma Unidade De Minigeração Fotovoltaica Distribuída. 2018. 78 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

NASCIMENTO. D. A. do et al, Instalações de Sistemas de Geração Solar Fotovoltaica: Um estudo sobre sistemas de aterramento, proteção contra surto e descargas atmosféricas. In: Brazilian Technology Symposium, 2016. Campinas, 2016.

PINHO. J. T.; GALDINO. M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

SANTOS, S. R. Proteção Contra Descargas Atmosféricas em Usinas Fotovoltaicas. Canal Solar, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/protacao-contra-descargas-atmosfericas-em-usinas-fotovoltaicas/>. Acesso em 12 de maio de 2021.

UFERSA. Assessoria de Comunicação da UFERSA, 2017. Disponível em: <https://assecom.ufersa.edu.br/2018/02/06/ufersa-recebe-autorizacao-para-instalar-usinas-solares-nos-campi-de-angicos-caraubas-e-pau-dos-ferros/>. Acesso em 12 de maio de 2021.

UFERSA. Usina Solar da UFERSA, 2017. Disponível em: <https://usina-solar.ufersa.edu.br/>. Acesso em 12 de maio de 2021.

## CONTRIBUIÇÕES DA MODERNIZAÇÃO DO PARQUE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA PARA O ENFRENTAMENTO DE CRISE ENERGÉTICA

Rafael Deléo e Oliveira<sup>1</sup>  
Filipe Tagliaferro Avino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo

DOI: 10.47168/rbe.v28i3.700

### RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar e determinar a quantidade de pontos de Iluminação Pública (IP) instalados em todos os municípios brasileiros com 100 mil ou mais habitantes. A quantidade de pontos de iluminação pública é estimada com o auxílio de uma equação determinada a partir de um múltiplo de pontos de IP por km<sup>2</sup> (quilômetro quadrado) de área urbana, utilizando dados conhecidos. E, a partir desses dados, avalia-se o potencial de redução do consumo de energia elétrica após a modernização das luminárias convencionais, como medida de redução permanente do consumo de energia deste serviço público e suas contribuições para o enfrentamento das crises energéticas nos momentos de escassez hídrica no médio e longo prazo. As análises indicam que 8.706.506 pontos de iluminação pública (48,43% do parque de iluminação pública brasileiro) estão instalados nos 326 municípios brasileiros mais populosos (aproximadamente 6% do total de municípios). E que, desse total, 8.392.198 pontos (46,68% do parque de iluminação pública brasileiro) estão equipados com lâmpadas de descarga a alta pressão, sendo responsáveis pelo consumo anual de 6.625.567 MWh de energia elétrica, ou 41,80% do consumo total com iluminação pública. Além disso, é indicado que a modernização dos pontos de iluminação pública equipados com lâmpadas de descarga a alta pressão pode representar redução de 22,38% no consumo de energia elétrica de todo o parque de iluminação pública brasileiro ou 1,11% de redução do consumo entre os consumidores cativos.

Palavras-chave: Iluminação pública; Eficiência energética; Lâmpada de descarga a alta pressão; Luminária convencional; Luminárias LED.

## ABSTRACT

The present study aims to characterize and determine the number of Street Lighting (SL) points installed in all Brazilian municipalities with 100 thousand inhabitants, or more. The number of street lighting points is estimated with the aid of an equation determined from a multiple of street lighting points per km<sup>2</sup> (square kilometer) of urban area, using known data. And, based on these data, the potential for reducing electricity consumption is evaluated through the modernization of conventional lighting as a measure of permanent reduction in energy consumption of this public service, and its contributions to facing energy crises in times of water scarcity in the medium and long term. The analyzes indicate that 8,706,506 street lighting points (48.43% of the Brazilian street lighting park) are installed in the 326 most populous Brazilian municipalities (approximately 6% of the total number of municipalities). Besides that, from this total, 8,392,198 points (46.68% of the Brazilian street lighting park) are equipped with high pressure discharge lamps, being responsible for the annual consumption of 6,625,567 MWh of electric energy, or 41.80 % of total consumption due to street lighting. In addition, it is indicated that the modernization of public lighting points equipped with high pressure discharge lamps can represent a 22.38% reduction in electricity consumption of the entire Brazilian street lighting park, or a 1.11% reduction of consumption among captive consumers.

Keywords: Street lighting; Energy efficiency; High pressure discharge lamp; Conventional light fixture; LED luminaires.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório Balanço Energético Nacional 2021, da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, a participação das fontes de geração de energia elétrica na capacidade instalada no Brasil se distribui da seguinte forma: hidráulica: 62,50%; não renováveis: 15,90%; eólica: 9,80%; biomassa: 8,80%; solar: 1,90%; nuclear: 1,10% (EPE, 2021a). Observa-se que 83,0% da matriz elétrica do Brasil é composta por fontes renováveis (hidráulica, eólica, biomassa e solar), com predomínio da fonte hidráulica.

Em termos ambientais, a predominância da fonte hidráulica na matriz elétrica do Brasil é fundamental para mitigar o uso e impacto de fontes de geração de eletricidade que utilizam como combustível os derivados do petróleo, gás natural e carvão mineral. Entretanto, a atividade de geração de eletricidade predominantemente hidráulica expõe o país ao risco de falta de energia elétrica em um cenário de estiagem prolongada. Essa situação é acentuada nos casos de reservatórios de usos múltiplos, cuja atividade principal é a geração de

energia elétrica. Nesses casos, o uso múltiplo pode dificultar ou impossibilitar o desenvolvimento e manutenção de outras atividades, tais como consumo humano e dessedentação animal, irrigação, navegação, pesca e lazer (GALVÃO e BERMANN, 2015).

Deve-se observar que a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, no Capítulo I – Dos fundamentos, Art. 1º, inciso III, estabelece que: em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais (BRASIL, 1997).

Então, diante de cenários de crise energética relacionados a escassez hídrica, como ocorridos nos anos de 2001 e 2021, são necessárias medidas para mitigar ou conter os efeitos da falta de água nos reservatórios das usinas hidroelétricas.

Assim sendo, o governo brasileiro costuma adotar medidas como o acionamento de termoeletricas, campanhas de conscientização da população visando a diminuição voluntária do consumo e incentivos para que empresas reduzam o consumo, sobretudo no horário de maior demanda, também conhecido como horário de ponta. No entanto, observa-se que as medidas adotadas pelo governo federal têm tido efeito paliativo e, após a superação dos períodos de escassez hídrica, os velhos hábitos são retomados até que ocorra nova crise energética. Ou seja, o planejamento energético deve ser reforçado com ações contínuas e consistentes, e fortalecido com a intensificação de programas de eficiência energética nos diversos setores e níveis da sociedade.

Deve-se observar que o conceito de eficiência energética é entendido como a forma de realizar uma atividade ou trabalho, reduzindo a quantidade de energia empregada, mantendo a qualidade do serviço ou produto (ABESCO, 2021; EPE, 2021b; BERNARDES et al. 2020).

No sentido de buscar um consumo mais eficiente da energia elétrica, observam-se esforços por parte do poder público, sobretudo de estados, via projetos de eficiência energética em prédios públicos, e de municípios, em projetos de modernização dos parques de Iluminação Pública (IP). Neste caso, alia-se a modernização com a melhoria da qualidade dos indicadores de iluminação pública por meio da substituição de lâmpadas de descarga a alta pressão (lâmpada mista, vapor de sódio, vapor de mercúrio e multivapor metálico) por fonte de luz com tecnologia mais moderna, no caso representada pelas luminárias com tecnologia LED – *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz, para o português).

Analisando os dados do ano de 2008, o parque de iluminação pública brasileiro possuía 14.769.309 pontos de iluminação, com predominância de lâmpadas de descarga a alta pressão – 97,72% do total (ABRASI, 2021). Este parque de iluminação pública foi responsável pelo consumo de 11.429 GWh (GigaWatt-hora) de energia elétrica

naquele ano (EPE, 2011).

Já no ano de 2019, o número de pontos luminosos do parque de IP brasileiro saltou para 17.978.986 pontos de iluminação, sendo que 97,28% dos pontos eram equipados com lâmpadas de descarga a alta pressão (OLIVEIRA, 2020a). Este parque de IP foi responsável pelo consumo de 15.850 GWh de energia elétrica no ano (EPE, 2021c).

E, analisando trabalhos científicos sobre iluminação pública, observa-se a abordagem da utilização das luminárias LED como ferramenta de eficiência energética. O estudo de caso da modernização de um trecho de 8,0 km (quilômetros) da Avenida Recife, localizada na cidade de Recife-PE, avaliou os impactos da substituição das luminárias convencionais equipadas com lâmpadas de vapor de sódio por luminárias LED. Os resultados das análises indicaram que a modernização do trecho em questão resultaria em 38,47% de redução no consumo de energia elétrica (FILHO et al., 2021). Outro estudo de caso foi realizado num trecho da Avenida Presidente Vargas, que é uma das principais avenidas do centro da cidade do Rio de Janeiro-RJ. No local existia um total de 604 pontos de IP equipados com lâmpada multivapor metálico. As simulações luminotécnicas e análises realizadas indicaram que a substituição das luminárias convencionais por luminárias LED representaria redução de 53,33% no consumo de energia elétrica. E que a dimerização das luminárias LED contribuiria para a redução de 59,68% no consumo de energia elétrica (SOUZA et al., 2021). Também, foi desenvolvido estudo para avaliar a modernização de todo o parque de iluminação pública da cidade do Rio de Janeiro-RJ. As análises indicaram que a modernização de todos os pontos de IP com instalação de luminárias LED proporcionaria redução de 31% no consumo de energia, podendo alcançar o valor de 47% com a utilização do sistema de dimerização das luminárias (FRAGOSO et al., 2020). Já os estudos para *retrofit* da iluminação pública da Avenida Barão de Rio Branco, principal via urbana da cidade de Juiz de Fora-MG, indicou que a substituição dos 1.260 pontos equipados com lâmpadas de vapor de sódio por luminárias LED possibilitaria a redução de 36,32% no consumo de energia elétrica, desconsiderando as perdas nos reatores utilizados nas luminárias convencionais (NEPOMUCENO et al., 2019). E, um estudo de eficiência energética avaliou a substituição do parque de IP da cidade de Boa Vista-RR, composto por luminárias convencionais equipadas com lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor de sódio e multivapor metálico, por luminárias LED. Os resultados das análises indicaram que a modernização do parque de IP da cidade possibilitaria a redução de 38% no consumo de energia elétrica (ALMEIDA et al., 2019). Por fim, o estudo realizado em um loteamento no município de Sarandi-PR, com um total de 93 pontos de IP, indicou que a substitui-

ção das lâmpadas vapor de sódio com potência de 250W por luminárias LED com potência de 120W, representaria redução de 52% no consumo de energia elétrica (STUTZ et al., 2018).

Assim, tendo em vista o alto consumo de energia elétrica do parque de IP brasileiro, o crescimento de aproximadamente 39% do consumo entre os anos de 2008 e 2019, bem como a característica da tecnologia empregada, quase que na totalidade composta por luminárias de tecnologia antiga que podem ser substituídas por luminárias mais eficientes, observa-se a oportunidade de modernização do parque de iluminação pública das cidades brasileiras como mecanismo para redução do consumo de energia elétrica e, também, como mecanismo de melhoria da qualidade de vida da população.

Então, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar e determinar a quantidade de pontos de iluminação pública instalados em todos os municípios brasileiros com 100 mil ou mais habitantes. E, a partir desses dados, avaliar o potencial de redução de consumo de energia elétrica através da modernização das luminárias convencionais como medida de redução permanente do consumo de energia deste serviço público e suas contribuições para o enfrentamento das crises energéticas nos momentos de escassez hídrica no médio e longo prazo.

## 2. MATERIAL E MÉTODO

A metodologia aplicada no estudo baseia-se na pesquisa bibliográfica e documental de informações técnicas em bases de dados científicos, publicações oficiais de órgãos do setor elétrico brasileiro e publicações oficiais de órgãos da administração pública em nível municipal, para caracterização do parque de iluminação pública das cidades brasileiras.

A Figura 1 traz um fluxograma que apresenta as nove etapas do método proposto e adotado para determinação e caracterização do parque de IP brasileiro.

A Etapa 1 consistiu na determinação do universo de estudo. As análises das informações apresentadas no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE indicam que aproximadamente 57% da população brasileira reside em 326 municípios (cidades com 100 mil ou mais habitantes), do total de 5.570 cidades (IBGE, 2021a; IBGE, 2021b). Assim, observa-se que a modernização da rede de IP de aproximadamente 6% das cidades brasileiras poderia impactar a qualidade de vida de aproximadamente 57% da população brasileira. Portanto, os municípios com população inferior a 100 mil habitantes não fizeram parte do estudo.

A Etapa 2 está relacionada ao mapeamento de informações técnicas e publicações oficiais de órgãos da administração pública em nível municipal, para determinação de cidades com processos de licitação de Parceria Público-Privada de Iluminação Pública (PPP de IP). Inicialmente foram mapeados 73 processos de licitação de PPP de IP, sendo que 42 processos são de municípios com população igual ou superior a 100 mil habitantes, e 31 processos de municípios com população inferior a 100 mil habitantes.

Na Etapa 3 foram selecionados os municípios candidatos a comporem o universo da pesquisa. Dentro do conjunto de contratos de PPP dos 42 municípios com população igual ou superior a 100 mil habitantes, 16 cidades foram desconsideradas da amostra pois os contratos de concessão dessas cidades estavam suspensos, paralisados, cancelados ou anulados, o que poderia indicar alguma inconsistência nas informações publicadas no edital e demais documentos técnicos.

Definido o universo da pesquisa, o próximo passo foi a execução das Etapas 4 e 5. Na Etapa 4 os editais e documentos técnicos das licitações foram analisados para extração das informações de interesse utilizadas para caracterização do parque de IP. As informações de interesse são número total de pontos de IP, número de pontos de IP por tipo e potência de lâmpada, representatividade percentual por tipo e potência de lâmpada, carga de IP instalada e meta de efficientização.

Concomitantemente, foi desenvolvida a Etapa 5. Esta etapa consistiu em determinar as áreas urbanas dos municípios selecionados na Etapa 3. A determinação das áreas urbanas foi realizada através da análise de dados estatísticos e mapas obtidos no site do IBGE com auxílio da aplicação do *software Google Earth Pro*.

Na Etapa 6, a quantidade de pontos de IP obtida nos editais de PPP (levantamento na Etapa 4) e as áreas urbanas estimadas (levantamento na Etapa 5) foram utilizadas para construir um múltiplo de pontos de IP por km<sup>2</sup> (quilômetro quadrado) de área urbana e obter uma equação econométrica em que fosse possível estimar a quantidade total de pontos de IP existentes nos municípios com população igual ou superior a 100 mil habitantes (326 municípios).

Na Etapa 7 foram determinadas todas as áreas urbanas dos 326 municípios brasileiros com população igual ou superior a 100 mil habitantes. Estas áreas foram obtidas através da análise de dados estatísticos e mapas obtidos no site do IBGE com auxílio da aplicação do *software Google Earth Pro*.

Na Etapa 8, utilizando as informações das áreas urbanas dos 326 municípios brasileiros mais populosos (levantamento na Etapa 7) e empregando a equação econométrica desenvolvida (determinação na Etapa 6), pôde-se caracterizar e estimar o número total de pontos de IP nos 326 municípios com população igual ou superior a 100 mil

habitantes.

E, na Etapa 9, dispondo da quantidade total de pontos de IP estimada na Etapa 8, e as características dos parques de iluminação pública das cidades da amostra (tipos de luminárias, potência, etc.), pôde-se determinar a carga instalada no parque de IP dos 326 municípios brasileiros mais populosos. A partir desse valor e das médias das metas de eficiência observado nos projetos de PPP de IP, pôde-se estimar a redução potencial de carga.

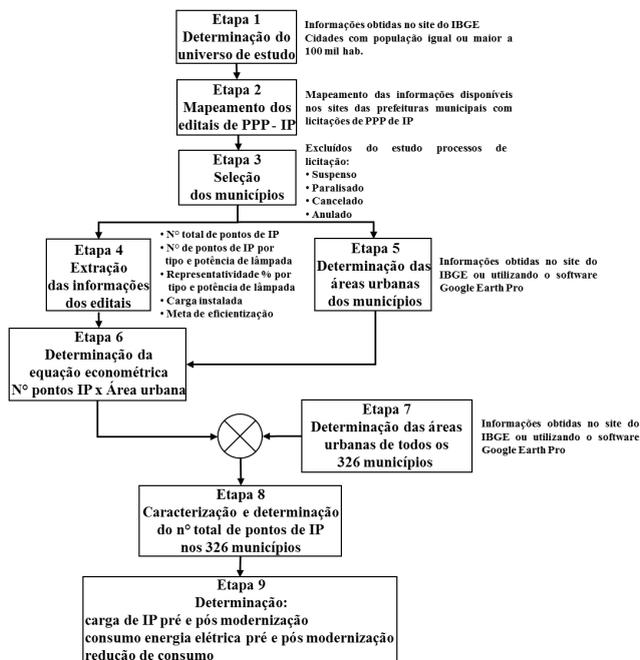


Figura 1 – Fluxograma com etapas dos processo para caracterização do parque de IP

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os 26 municípios selecionados como base para o estudo. O número de habitantes foi obtido por meio de pesquisa no site do IBGE<sup>1</sup> e a área urbana foi determinada a a a área urbana foi determinada a partir de estudos do IBGE<sup>2</sup>, com auxílio

1 <https://cidades.ibge.gov.br/>

2 <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15789-areas-urbanizadas.html?=&t=sobre>

do software *Google Earth Pro*<sup>1</sup>. Já a quantidade de pontos de iluminação pública, carga instalada e a meta de efficientização foram retiradas dos documentos técnicos de licitações.

Tabela 1 - Número de habitantes, área urbana, número de pontos de IP, carga LED + Outros, carga convencional e meta de efficientização por município

Município	Nº de habitantes	Área urbana IBGE Google Earth (km <sup>2</sup> )	Nº pontos IP	Carga LED + Outros (kW)	Carga convencional (kW - quiloWatt)	Meta efficientização
Angra dos Reis	210.171	45,90	21.310	5,79	3.116,92	42,50%
Aracaju	672.614	119,90	58.763	225,00	12.685,66	61,20%
Araguaína	186.245	46,80	21.619	757,82	2.314,49	67,31%
Belém	1.506.420	201,80	97.464	546,57	21.318,76	46,40%
Bento Gonçalves	123.090	26,90	13.118	45,18	1.826,90	50,00%
Caieiras	104.044	17,45	7.957	0,00	1.390,87	57,00%
Camaçari	309.208	92,72	42.266	109,91	7.551,98	58,30%
Campinas	1.223.237	256,30	122.573	92,29	20.203,27	64,35%
Caruaru	369.343	69,30	34.435	1.103,48	5.261,42	48,40%
Curitiba	1.963.726	353,20	163.154	1.207,39	28.672,96	40,74%
Feira de Santana	624.107	133,80	60.500	88,19	9.521,18	53,30%
Franco da Rocha	158.438	22,64	10.413	18,84	1.481,63	64,82%
Hortolândia	237.570	47,27	21.697	105,42	3.222,47	46,26%
Ibirité	184.030	25,50	12.012	0,00	1.548,00	45,00%
Macapá	522.357	68,60	33.814	1,39	4.841,88	46,93%
Palhoça	178.679	48,60	22.627	7,42	4.876,64	50,00%
Patos de Minas	154.641	45,80	25.498	377,17	3.257,48	57,89%
Petrolina	359.372	73,60	34.540	21,16	5.263,82	49,10%
Porto Alegre	1.492.530	208,60	101.487	537,07	16.302,39	44,80%
Ribeirão das Neves	341.415	56,43	26.491	0,00	3.346,12	46,00%
Santa Luzia	221.705	48,30	22.386	247,00	2.864,68	57,87%
São Paulo	12.396.372	1.225,00	602.067	1.128,41	124.262,93	50,00%
São Vicente	370.839	33,40	25.460	249,63	4.839,27	62,60%
Sapucaia do Sul	142.508	24,83	11.382	2,85	2.136,40	66,22%

<sup>1</sup> <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>

Tabela 1 - Número de habitantes, área urbana, número de pontos de IP, carga LED + Outros, carga convencional e meta de eficiência por município (cont.)

Município	N de habitantes	Área urbana IBGE Google Earth (km <sup>2</sup> )	Nº pontos IP	Carga LED + Outros (kW)	Carga convencional (kW - quiloWatt)	Meta eficiência
Teresina	871.126	180,50	87.079	162,16	13.420,64	52,70%
Vila Velha	508.655	65,50	34.930	6,43	7.789,30	62,52%
Média	-----	-----	-----	-----	-----	53,55%

Deve-se observar que na Tabela 1 são apresentados dados da carga de iluminação pública instalada em cada município. A carga é dividida em duas categorias: Carga convencional e Carga LED + Outros. A categoria “Carga convencional” refere-se às luminárias convencionais equipadas com lâmpadas de descarga a alta pressão. Já a categoria “Carga LED + Outros” refere-se aos pontos de iluminação pública equipados com luminárias LED, lâmpadas compactas, fluorescentes, halógenas, incandescentes e indução. Ressalta-se que esta categoria não é objeto do estudo por entender-se que a quantidade de pontos é pequena, ou que a substituição pela tecnologia LED não representaria redução de carga significativa (Angra dos Reis, 2019; Aracaju, 2020; Araguaína, 2016; Belém, 2020; Bento Gonçalves, 2019; Caieiras, 2019; Camaçari, 2020; Campinas, 2021; Caruaru, 2019; Curitiba, 2021; Feira de Santana, 2020; Franco da Rocha, 2020; Hortolândia, 2019; Ibirité, 2017; Macapá, 2019; Palhoça, 2018; Patos de Minas, 2021; Petrolina, 2019; Porto Alegre, 2019; Ribeirão das Neves, 2018; Santa Luzia, 2019; São Paulo, 2015; São Vicente, 2020; Sapucaia do Sul, 2020; Teresina, 2018; Vila Velha, 2019).

A Tabela 2 indica a quantidade total de pontos de iluminação pública, por tipo de lâmpada instalada no parque de iluminação pública dos 26 municípios analisados no estudo. Nesta tabela, o grupo “Outros” apresenta a soma das lâmpadas compactas, fluorescentes, halógenas, incandescentes e indução (Angra dos Reis, 2019; Aracaju, 2020; Araguaína, 2016; Belém, 2020; Bento Gonçalves, 2019; Caieiras, 2019; Camaçari, 2020; Campinas, 2021; Caruaru, 2019; Curitiba, 2021; Feira de Santana, 2020; Franco da Rocha, 2020; Hortolândia, 2019; Ibirité, 2017; Macapá, 2019; Palhoça, 2018; Patos de Minas, 2021; Petrolina, 2019; Porto Alegre, 2019; Ribeirão das Neves, 2018; Santa Luzia, 2019; São Paulo, 2015; São Vicente, 2020; Sapucaia do Sul, 2020; Teresina, 2018; Vila Velha, 2019).

Tabela 2 - Número de pontos de IP por tipo de lâmpada

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>N° pontos</b>	<b>%</b>
Mista	6.298	0,37%
Multivapor metálico	202.023	11,78%
Vapor de mercúrio de alta pressão	106.066	6,18%
Vapor de sódio de alta pressão	1.338.745	78,06%
LED	55.368	3,23%
Outros	6.542	0,38%
Total	1.715.042	100%

A Tabela 3 apresenta a quantidade de pontos de iluminação pública equipados com luminárias LED, enquanto a categoria “Outros” totaliza os pontos que utilizam lâmpadas compactas, fluorescentes, halógenas, incandescentes e indução (Angra dos Reis, 2019; Aracaju, 2020; Araguaína, 2016; Belém, 2020; Bento Gonçalves, 2019; Caieiras, 2019; Camaçari, 2020; Campinas, 2021; Caruaru, 2019; Curitiba, 2021; Feira de Santana, 2020; Franco da Rocha, 2020; Hortolândia, 2019; Ibitiré, 2017; Macapá, 2019; Palhoça, 2018; Patos de Minas, 2021; Petrolina, 2019; Porto Alegre, 2019; Ribeirão das Neves, 2018; Santa Luzia, 2019; São Paulo, 2015; São Vicente, 2020; Sapucaia do Sul, 2020; Teresina, 2018; Vila Velha, 2019).

Tabela 3 - Número de pontos de IP com tecnologia LED e demais

<b>Tipo de lâmpada e potência (W – Watt)</b>	<b>N° pontos</b>	<b>Representatividade* (%)</b>
LED 1 W a 50 W	5.330	0,31077900%
LED 51 W a 70 W	22.586	1,31693500%
LED 71 W a 110 W	9.984	0,58214300%
LED 111 W a 150 W	5.582	0,32547300%
LED 151 W a 210 W	8.488	0,49491400%
LED 211 W a 330 W	3.398	0,19812900%
Outros	6.542	0,38144800%
Total	61.910	3,60982100%

\*Valores percentuais calculados com base no total de 1.715.042 pontos de IP; valores truncados com precisão de oito dígitos.

Já a Tabela 4 indica as quantidades de pontos de iluminação pública por tipo e potência de fonte de luz para as lâmpadas de descarga a alta pressão (Angra dos Reis, 2019; Aracaju, 2020; Araguaína, 2016; Belém, 2020; Bento Gonçalves, 2019; Caieiras, 2019; Camaçari, 2020; Campinas, 2021; Caruaru, 2019; Curitiba, 2021; Feira de Santana, 2020; Franco da Rocha, 2020; Hortolândia, 2019; Ibité, 2017; Macapá, 2019; Palhoça, 2018; Patos de Minas, 2021; Petrolina, 2019; Porto Alegre, 2019; Ribeirão das Neves, 2018; Santa Luzia, 2019; São Paulo, 2015; São Vicente, 2020; Sapucaia do Sul, 2020; Teresina, 2018; Vila Velha, 2019).

Tabela 4 - Representatividade percentual do número de pontos de IP, por tipo e potência de lâmpada

Tipo de lâmpada	Potência lâmpada (W)	Perda reator (W)	Nº pontos	Representatividade* (%)
Mista	70	0	4.356	0,25398700%
Mista	125	0	2	0,00011600%
Mista	150	0	5	0,00029100%
Mista	160	0	938	0,05469200%
Mista	250	0	753	0,04390500%
Mista	300	0	1	0,00005800%
Mista	400	0	52	0,00303100%
Mista	500	0	191	0,01113600%
Multivapor metálico	70	14	17.620	1,02738000%
Multivapor metálico	100	17	4.203	0,24506600%
Multivapor metálico	125	17	20	0,00116600%
Multivapor metálico	150	22	74.655	4,35295400%
Multivapor metálico	250	23	64.086	3,73670100%
Multivapor metálico	360	36	30	0,00174900%
Multivapor metálico	400	29	38.512	2,24554200%
Multivapor metálico	1.000	50	2.786	0,16244500%
Multivapor metálico	1.500	80	4	0,00023300%
Multivapor metálico	2.000	80	96	0,00559700%
Multivapor metálico	3.500	80	11	0,00064100%
Vapor de mercúrio	70	10	2	0,00011600%
Vapor de mercúrio	80	10	10.959	0,63899300%
Vapor de mercúrio	100	14	8	0,00046600%

Tabela 4 - Representatividade percentual do número de pontos de IP, por tipo e potência de lâmpada (cont.)

Tipo de lâmpada	Potência lâmpada (W)	Perda reator (W)	Nº pontos	Representatividade* (%)
Vapor de mercúrio	125	14	52.373	3,05374400%
Vapor de mercúrio	150	17	77	0,00448900%
Vapor de mercúrio	250	25	13.854	0,80779300%
Vapor de mercúrio	400	36	28.781	1,67815100%
Vapor de mercúrio	1.000	70	12	0,00069900%
Vapor de sódio	70	14	329.476	19,21095800%
Vapor de sódio	100	17	360.764	21,03528600%
Vapor de sódio	125	14	16	0,00093200%
Vapor de sódio	150	22	247.200	14,41364100%
Vapor de sódio	250	30	332.521	19,38850400%
Vapor de sódio	350	35	19	0,00110700%
Vapor de sódio	360	36	39	0,00227300%
Vapor de sódio	400	38	68.644	4,00246700%
Vapor de sódio	1.000	90	44	0,00256500%
Vapor de sódio	1.500	80	22	0,00128200%
Total	-----	-----	1.653.132	96,39015600%

\*Valores percentuais calculados com base no total de 1.715.042 pontos de IP; valores truncados com precisão de oito dígitos

Então, utilizando os dados apresentados na Tabela 1 obteve-se a Figura 2, que apresenta a relação entre o número de pontos de iluminação pública versus a área urbana dos municípios. Essa figura também apresenta a linha de regressão ajustada, com o coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 0,9993 (99,93%). O valor do coeficiente de determinação próximo a 100% indica que a equação explica toda a variabilidade dos dados de resposta ao redor da média.

Utilizando a equação apresentada na Figura 2 e as áreas urbanas apresentadas na Tabela 1, calculou-se o número de pontos de iluminação pública para os 26 municípios, totalizando 1.715.035 pontos. Ou seja, a equação apresentada para o cálculo do número de pontos de IP nos municípios com população igual ou superior a 100 mil habitantes apresenta correspondência aos valores reais.

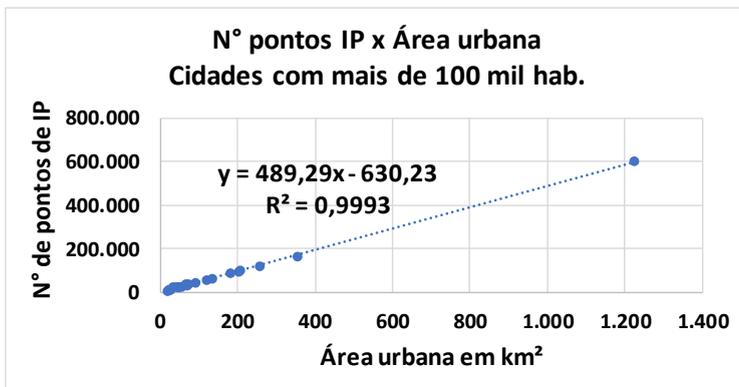


Figura 2 - Número de pontos de IP versus área urbana

De acordo com dados estatísticos apresentados no site do IBGE, existem no Brasil 326 municípios com população igual ou superior a 100 mil habitantes (IBGE, 2021a). Ainda, de acordo com os mapas das áreas urbanizadas do Brasil com a organização da tipologia do território apresentados pelo IBGE, e medições realizadas por meio do *software Google Earth Pro*, pôde-se determinar as áreas urbanas desses municípios (IBGE, 2021b).

Utilizando a equação apresentada na Figura 2, as áreas urbanas determinadas para os municípios, empregando os mapas apresentados pelo IBGE e medições realizadas com o *software Google Earth Pro*, pôde-se determinar a quantidade de 8.706.506 pontos de iluminação pública instalados nos 326 municípios com população igual ou superior a 100 mil habitantes.

Assumindo a representatividade percentual de distribuição das quantidades de pontos de iluminação pública para lâmpadas de descarga a alta pressão apresentada na Tabela 4, e a quantidade de pontos de iluminação pública estimada para os municípios com população igual ou superior a 100 mil habitantes (8.706.506 pontos), determinou-se a quantidade de pontos de IP por tipo e potência das lâmpadas, e a respectiva carga instalada, como apresentado na Tabela 5.

As perdas nos reatores, apresentadas na Tabela 5, foram consideradas de acordo com as normas ABNT NBR 13593:2013 – Reator e ignitor para lâmpada a vapor de sódio a alta pressão – Especificações e ensaios, ABNT NBR 14305:2015 – Reator e ignitor para lâmpada a vapor metálico (halogenetos) – Requisitos e ensaios e ABNT NBR 5125:1996 – Reator para lâmpada a vapor de mercúrio a alta pressão (ABNT, 2015; ABNT, 2013; ABNT, 1996).

Tabela 5 - Número de pontos e carga por tipo e potência de lâmpada de descarga a alta pressão

Tipo de lâmpada	Potência lâmpada (W)	Perda reator (W)	Potência total (W)	Nº pontos*	Carga (kW)
Mista	70	0	70	22.113	1.547,91
Mista	125	0	125	10	1,25
Mista	150	0	150	25	3,75
Mista	160	0	160	4.761	761,76
Mista	250	0	250	3.822	955,50
Mista	300	0	300	5	1,50
Mista	400	0	400	263	105,20
Mista	500	0	500	969	484,50
Multivapor metálico	70	14	84	89.448	7.513,63
Multivapor metálico	100	17	117	21.336	2.496,31
Multivapor metálico	125	17	142	101	14,34
Multivapor metálico	150	22	172	378.990	65.186,28
Multivapor metálico	250	23	273	325.336	88.816,73
Multivapor metálico	360	36	396	152	60,19
Multivapor metálico	400	29	429	195.508	83.872,93
Multivapor metálico	1.000	50	1.050	14.143	14.850,15
Multivapor metálico	1.500	80	1.580	20	31,60
Multivapor metálico	2.000	80	2.080	487	1.012,96
Multivapor metálico	3.500	80	3.580	55	196,90
Vapor de mercúrio	70	10	80	10	0,80
Vapor de mercúrio	80	10	90	55.633	5.006,97
Vapor de mercúrio	100	14	114	40	4,56
Vapor de mercúrio	125	14	139	265.874	36.956,49
Vapor de mercúrio	150	17	167	390	65,13
Vapor de mercúrio	250	25	275	70.330	19.340,75
Vapor de mercúrio	400	36	436	146.108	63.703,09
Vapor de mercúrio	1.000	70	1.070	60	64,20
Vapor de sódio	70	14	84	1.672.603	140.498,65
Vapor de sódio	100	17	117	1.831.438	214.278,25
Vapor de sódio	125	14	139	81	11,26
Vapor de sódio	150	22	172	1.254.924	215.846,93
Vapor de sódio	250	30	280	1.688.061	472.657,08

Tabela 5 - Número de pontos e carga por tipo e potência de lâmpada de descarga a alta pressão (cont.)

Tipo de lâmpada	Potência lâmpada (W)	Perda reator (W)	Potência total (W)	Nº pontos*	Carga (kW)
Vapor de sódio	350	35	385	96	36,96
Vapor de sódio	360	36	396	197	78,01
Vapor de sódio	400	38	438	348.475	152.632,05
Vapor de sódio	1.000	90	1.090	223	243,07
Vapor de sódio	1.500	80	1.580	111	175,38
Total	-----	-----	-----	8.392.198	1.589.513

\*Valores truncados com precisão de 0 dígitos.

Com a carga de iluminação pública estimada pode-se calcular os benefícios da efficientização do parque de IP das cidades com população igual ou superior a 100 mil habitantes. Para isso, deve-se assumir algumas premissas, sendo:

- Carga de IP estimada: 1.589.513 kW – valor apresentado na Tabela 5;
- Meta de efficientização média: 53,55% - média dos valores apresentados na Tabela 1;
- Tempo médio de faturamento: 11 horas e 25 minutos, ou 11,42 horas.

Estudos indicam que, quando comparado às lâmpadas convencionais, o consumo de energia elétrica pela tecnologia LED é aproximadamente 50% menor (OLIVEIRA, 2020b; NOVICKI e MARTINEZ, 2008).

A Resolução Normativa nº 2.590, de 13 de agosto de 2019, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, indica que os tempos de faturamento do setor de iluminação pública variam entre 11,37 horas e 11,48 horas, de acordo com a localização do município (ANEEL, 2019). Neste estudo foi considerado o valor de 11,42 horas, média dos valores para os tempos de faturamento, como o tempo de funcionamento do sistema de iluminação pública.

A equação (1) pode ser utilizada para o cálculo da carga do parque de IP pós-modernização com aplicação da meta de efficientização.

$$Carga_{pós-mod.} = Carga_{pré-mod.} \times (1 - Meta_{efic.}) \quad (1)$$

Sendo:

- $Carga_{pós-mod.}$ : carga do parque de IP pós-modernização (em kW);
- $Carga_{pré-mod.}$ : carga do parque de IP pré-modernização – valor estimado em 1.589.513 kW – Tabela 5;
- $Meta_{efic.}$ : meta de efficientização igual a 53,55% – considerada a média dos valores apresentados na Tabela 1.

A aplicação da equação (1) indica que a carga de IP pós-modernização seria de 738.329 kW.

A equação (2) pode ser utilizada para o cálculo da redução de carga alcançada com a modernização do parque de IP.

$$Redução_{carga} = Carga_{pré-mod.} - Carga_{pós-mod.} \quad (2)$$

Sendo:

- $Redução_{carga}$ : redução de carga alcançada ou esperada após a modernização do parque de IP (em kW);
- $Carga_{pré-mod.}$ : carga do parque de IP pré-modernização (em kW);
- $Carga_{pós-mod.}$ : carga do parque de IP pós-modernização (em kW).

Aplicando a equação (2) com a carga do parque de IP nas situações de pré-modernização (1.589.513 kW) e pós-modernização (738.329 kW), observa-se que a redução de carga seria de 851.184 kW.

A equação (3) pode ser utilizada para o cálculo do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação pública.

$$Cons_{energia} = Carga_{inst.} \times N^{\circ} dias \times T_{fat.diário} \quad (3)$$

Sendo:

- $Cons_{energia}$ : consumo de energia elétrica (em MWh – MegaWatt-hora);
- $Carga_{inst.}$ : carga do parque de IP na situação pré-modernização ou pós-modernização (em MW - MegaWatt);
- $N^{\circ} dias$ : número de dias em que ocorre consumo de energia elétrica (operação do parque de IP);
- $T_{fat.diário}$ : tempo diário de faturamento do consumo de energia elétrica pelo parque de IP –11,42 horas.

Aplicando a equação (3) nas situações de pré-modernização (carga: 1.589.513 kW ou 1.589,513 MW) e pós-modernização (carga: 738.329 kW ou 738,329 MW), observa-se que o consumo anual (365 dias) de energia seria respectivamente de 6.625.567 MWh e 3.077.577 MWh.

A equação (4) pode ser utilizada para o cálculo da redução de consumo de energia elétrica alcançada com a modernização do parque de IP.

$$Redução_{consumo} = Cons_{pré-mod.} - Cons_{pós-mod.} \quad (4)$$

Sendo:

- $Redução_{consumo}$ : redução do consumo de energia elétrica alcançado ou esperado após a modernização do parque de IP (em MWh);
- $Cons_{pré-mod.}$ : consumo de energia elétrica do parque de IP pré-modernização (em MWh);
- $Cons_{pós-mod.}$ : consumo de energia elétrica do parque de IP pós-modernização (em MWh).

Aplicando a equação (4) nas situações de pré-modernização (consumo: 6.625.567 MWh) e pós-modernização (consumo: 3.077.577 MWh), observa-se que a redução do consumo anual de energia seria de 3.547.990 MWh, ou 3.547,990 GWh.

O Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 da EPE indica que foram consumidos 319.290 GWh de energia no ano de 2019 entre os consumidores cativos. Desse total, o setor de iluminação pública foi responsável por consumir 15.850 GWh (4,96%) (EPE, 2021c).

Assim, observa-se que a modernização dos pontos de iluminação pública equipados com lâmpadas de descarga a alta pressão, instalados em cidades com população igual ou superior a 100 mil habitantes, representaria redução de 22,38% do consumo total do parque de IP brasileiro, ou 1,11% do consumo total entre os consumidores cativos.

Os percentuais de redução apresentados anteriormente poderiam ser maiores, tendo em vista que as luminárias LED podem ser dimerizadas, isto é, podem ter sua potência alterada conforme os fluxos de pedestres e veículos variam ao longo da noite. Ou seja, em horários de menor movimento nas vias, a potência das luminárias poderia ser diminuída através do Centro de Controle Operacional – CCO do parque de IP, fazendo com que as luminárias apresentassem uma diminuição de consumo ainda maior em relação à potência instalada do parque (OLIVEIRA et al., 2021).

#### 4. CONCLUSÃO

A metodologia apresentada e a equação determinada que descreve a relação entre o número de pontos de iluminação pública e a área urbana, podem ser utilizados para estimar e caracterizar o parque de IP de qualquer cidade com população igual ou superior a 100 mil habitantes, onde os dados não sejam conhecidos ou não estejam disponíveis.

As análises realizadas e apresentadas indicam que o parque de iluminação pública brasileiro é composto por 17.978.986 pontos, responsáveis pelo consumo anual de 15.850 GWh de energia elétrica (OLIVEIRA, 2022a; EPE, 2021c). Desse total, as análises indicam que 8.706.506 pontos, ou 48,43% do parque de IP brasileiro, estão instalados nos 326 municípios com população igual ou superior a 100 mil habitantes. As análises também apontam que dos 8.706.506 pontos instalados nas 326 cidades, 8.392.198 pontos, ou 46,68% do parque de IP brasileiro, estão equipados com lâmpadas de descarga a alta pressão, sendo responsáveis pelo consumo anual de 6.625,567 GWh de energia elétrica, ou 41,80% do consumo total de energia elétrica com iluminação pública.

A meta de eficiência média de 53,55%, alcançada com a modernização dos pontos de IP equipados com lâmpadas de descarga a alta pressão nos 326 municípios, pode representar redução de 3.547,990 GWh no consumo anual de energia elétrica. Ou seja, a modernização desses parques de IP pode representar redução de 22,38% no consumo de energia elétrica de todo o parque de IP brasileiro, ou 1,11% de redução do consumo entre os consumidores cativos.

A modernização do parque de iluminação pública pode contribuir para a redução do consumo de energia elétrica no período noturno, inclusive durante o horário de ponta. Essa energia economizada ficaria armazenada nas usinas hidrelétricas na forma de energia potencial, sendo utilizada ao longo do dia pelos demais setores, como indústria, comércio e serviços públicos.

Assim, observa-se que a modernização do parque de iluminação pública é uma ferramenta de eficiência energética que pode contribuir para evitar o desperdício de energia elétrica, principalmente nos momentos de crise energética.

E, como observado anteriormente, aproximadamente 57% da população brasileira reside nas 326 cidades mais populosas e todos esses cidadãos seriam impactados positivamente com os benefícios de uma iluminação pública de qualidade, citando-se:

- a. Geração de empregos, tanto durante a fase de modernização quanto na fase de operação do parque de IP;

- b. Diminuição do tempo de interrupção do serviço de IP, uma vez que as luminárias LED apresentam menos falhas em relação as outras tecnologias, e que parte das luminárias são monitoradas em tempo real através de telegestão;
- c. Melhoria da qualidade da iluminação pública e atendimento aos parâmetros de normas da ABNT;
- d. Diminuição da poluição luminosa das principais cidades do país;
- e. Possibilidade de diminuição de acidentes de trânsito, uma vez que ruas e calçadas melhor iluminadas podem contribuir para que condutores de veículos tenham uma maior percepção dos pedestres e ciclistas;
- f. Melhoria na sensação de segurança do cidadão, uma vez que vias mal iluminadas são um desestímulo para o cidadão permanecer na rua após o anoitecer, e uma oportunidade para pessoas mal-intencionadas;
- g. Possibilidade de atendimento de áreas atualmente não iluminadas nas cidades com iluminação de pontos escuros e áreas de demanda reprimida;
- h. A modernização da rede de iluminação pública pode abrir espaço para a expansão de outras atividades relacionadas, por exemplo implementação de aplicações de cidades inteligentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABESCO – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. O que é eficiência energética? (EE) – São Paulo: ABESCO, 2021. Disponível em <<http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>>. Acesso em: 20 out. 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 5125:1996 - Reator para lâmpada a vapor de mercúrio a alta pressão. Rio de Janeiro, p. 17, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 13593:2013 - Reator e ignitor para lâmpada a vapor de sódio a alta pressão - Especificações e ensaios. Rio de Janeiro, p. 45, 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 14305:2015 - Reator e ignitor para lâmpada a vapor metálico (halogenetos) - Requisitos e ensaios. Rio de Janeiro, p. 46, 2015.

ABRASI – Associação Brasileira de Empresas de Serviço de Iluminação Urbana. Dados do setor – – São Paulo: ABRASI, 2021. Disponível em <<http://www.abrasi.org.br/iluminacao-urbana/2/dadosdo-setor/>>. Acesso em: 17 out. 2021.

ALMEIDA, D. P.; MAIA, A. C. B.; FERRAZ, C. A.; MORO, D. S.; KONZEN, G.; ANDRADE, G. N.; SOUZA, M. A.; AMORIM, A. C.; PONTE, G. P.; SOARES, J. B.; EPE. Ações de eficiência energética: estudo de caso com base no sistema isolado de Roraima. In: XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, 25., 2019, Belo Horizonte. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-458/GCR10%20-%203789.pdf>>. Acesso em: Set. 2022.

ANGRA DOS REIS, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Relatório de Diagnóstico Técnico da Rede de Iluminação Pública de Angra dos Reis-RJ. Angra dos Reis, 2019. Disponível em <<https://ppp.angra.rj.gov.br/downloads/iluminacaopublica/1/DiagnosticoTecnicoDaRededelluminacaoPublicadeAngradosReis.pdf>>. Acesso em: Dez. 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Homologatória nº 2.590 de 13 de agosto de 2019. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20192590ti.pdf>>. Acesso em: 29 dez. 2019.

ARACAJU, PREFEITURA MUNICIPAL DE. PPP de Iluminação Pública de Aracaju – Diagnóstico Técnico. Aracaju, 2020. Disponível em <<https://www.aracaju.se.gov.br/pdf/ppp-iluminacao-2020/estudos/relatorio-diagnostico-tecnico.pdf>>. Acesso em: Out. 2021.

ARAGUAÍNA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Descrição Técnica das Soluções de Engenharia e Tecnologia (obras a serem executadas - investimentos) e dos Serviços de Gestão do Parque Luminotécnico. Araguaína, 2016. Disponível em <<https://cpl.araguaina.to.gov.br/AudienciaPublica.aspx>>. Acesso em: Out. 2021.

BELÉM, PREFEITURA MUNICIPAL DE. PPP de Iluminação Pública de Belém – Diagnóstico Técnico. Belém, 2020. Disponível em <<http://cgppp.belem.pa.gov.br/iluminacao-publica/>>. Acesso em: Out. 2021.

BENTO GONÇALVES, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Caderno 1 – Modelagem Técnica de Engenharia. Bento Gonçalves, 2019. Disponível em <<http://ppps.bentogoncalves.rs.gov.br/paginas/Iluminacao-publica-ML>>. Acesso em: Out. 2021.

BERNARDES, D. M.; CELESTE, W. C.; CHAVES, G. L. D. Eficiência energética na iluminação pública urbana: revisão bibliográfica dos equipamentos e tecnologias. Research, Society and Development, v.9, n. 7, pp. 1 – 21, 2020. Disponível em <Vol. 9 No. 7 | Research, Society and Development (rsdjournal.org)>. Acesso em: Ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos [...]. Brasília, DF, [1997]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm). Acesso em: Nov. 2021.

CAIEIRAS, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Relatório de Engenharia. Caieiras, 2019. Disponível em < <https://drive.google.com/drive/folders/1xJxh69IHJJHPhMEy2zvckNpolyE42Bm8>>. Acesso em: Out. 2021.

CAMAÇARI, PREFEITURA MUNICIPAL DE. PPP de Iluminação Pública – Diagnóstico Técnico. Camaçari, 2020. Disponível em < [http://parcerias.camacari.ba.gov.br/?page\\_id=372](http://parcerias.camacari.ba.gov.br/?page_id=372)>. Acesso em: Out. 2021.

CAMPINAS, PREFEITURA MUNICIPAL DE. PPP de Iluminação Pública – Relatório Técnico. Campinas, 2021. Disponível em < <https://www.campinas.sp.gov.br/ppp-iluminacao.php>>. Acesso em> Out. 2021.

CARUARU, PREFEITURA MUNICIPAL DE. PPP de Iluminação Pública – 02 – Diagnóstico Técnico da Rede de Iluminação Pública. Caruaru, 2019. Disponível em < <https://caruaru.pe.gov.br/lista-de-documentos-ppp/>>. Acesso em: Out. 2021.

CURITIBA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Estruturação de Projeto de Parceria Público-Privada (PPP) da Rede de Iluminação Pública de Curitiba/PR – Produto 2: Relatório de Diagnóstico Técnico da Rede de Iluminação Pública. Curitiba, 2021. Disponível em < <https://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/iluminacao-publica-curitiba-estudos-e-mo-delagem-do-projeto/3373>>. Acesso em: Out. 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia elétrica 2011 – Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/resultado-de-busca?k=anu%C3%A1rio%20estat%C3%ADstico>>. Acesso em: Out. 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 – Rio de Janeiro: EPE, 2021a. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: Out. 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Eficiência energética – Rio de Janeiro: EPE, 2021b. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>>. Acesso em: Out. 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia elétrica 2021 – Rio de Janeiro: EPE, 2021c. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/resultado-de-busca?k=anu%C3%A1rio%20estat%C3%ADstico>>. Acesso em: Out. 2021.

FEIRA DE SANTANA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. PPP de Iluminação Pública de Feira de Santana – Diagnóstico Técnico. Feira de Santana, 2020. Disponível em < [http://www.feiradesantana.ba.gov.br/servicos.asp?id=2&s=a&link=seadm/licitacoes\\_pm.asp&cat=PMFS&-dt=08-2020](http://www.feiradesantana.ba.gov.br/servicos.asp?id=2&s=a&link=seadm/licitacoes_pm.asp&cat=PMFS&-dt=08-2020)>. Acesso em: Out. 2021.

FILHO, J. P. C.; SILVA, J. A. A.; LEAL, S. S. A economia de energia elétrica na iluminação pública com o uso de lâmpadas LED: estudo de caso da Avenida Recife. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v.7, .n.11, pp. 1 – 21, Nov. 2021. Disponível em < <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/2989>>. Acesso em: Set. 2022.

FRANCO DA ROCHA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. PPP de Iluminação Pública – Relatório Técnico. Franco da Rocha, 2020. Disponível em < <https://www.francodarocha.sp.gov.br/franco/index/consulta-publicailuminacao2019>>. Acesso em: Out. 2021.

FRAGOSO, A. P.; FORTES, M. Z.; MORAES, D. A. P.; LOPES; A. P.; PEREIRA, A. M. E. Análise da economia de energia com dimerização quando da aplicação da tecnologia LED na iluminação pública – estudo de caso: cidade do Rio de Janeiro. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, 8., 2020. Disponível em <[https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/sbse/article/view/2298](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2298)>. Acesso em: Set. 2022.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. Estudos Avançados, 29, pp. 43 – 68, 2015. Disponível em <<https://www.scielo.br/j/ea/a/vkWLM6pfvzMGj8NxysXHbZm/abstract/?lang=pt#>>. Acesso em: Nov. 2021.

HORTOLÂNDIA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Anexo I – Projeto Básico. Hortolândia, 2019. Disponível em < <http://licitacao.hortolandia.sp.gov.br/licitacao/encerrados/16/mostrar>>. Acesso em: Out. 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas da população. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao>>. Acesso em: Ago. 2021a.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Áreas urbanizadas do Brasil. Disponível em <[https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao\\_do\\_territorio/tipologias\\_do\\_territorio/areas\\_urbanizadas\\_do\\_brasil/2015/Mapas/](https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/tipologias_do_territorio/areas_urbanizadas_do_brasil/2015/Mapas/)>. Acesso em: Ago. 2021b.

IBIRITÉ, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Estruturação da Concessão da Rede de Iluminação Pública do Município de Ibirité – Caderno 1 – Caderno Técnico. Ibirité, 2017. Disponível em < <https://www.ibirite.mg.gov.br/detalhe-da-licitacao/info/cp-7-2019/231>>. Acesso em: Out. 2021.

MACAPÁ, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Anexo III – Vias Levantadas e Análise das Soluções Luminotécnicas. Macapá, 2019. Disponível em < <https://macapa.ap.gov.br/consulta-publica-iluminacao-publica-macapa/>>. Acesso em: Dez. 2019.

NEPOMUCENO, M. S.; CASAGRANDE, C. G.; JESUS, H. C. S. A.; ALMEIDAA, A. Z. G. Retrofit da iluminação pública através do emprego de luminárias LED. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2019. Disponível em <<https://www.confeca.org.br/sites/default/files/uploadsimce/Contecc2019/EI%-C3%A9trica/RETROFIT%20DA%20ILUMINA%C3%87%C3%83O%20PUBLICA%20ATRAVES%20DO%20EMPREGO%20DE%20LUMINARIAS%20LED.pdf>>. Acesso em: Set. 2022.

NOVICKI, J. M.; MARTINEZ, R. LEDs para iluminação pública. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008. Disponível em <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/41.pdf>>. Acesso em: Ago. 2021.

OLIVEIRA, R. D. Índice de falha no sistema de iluminação pública brasileiro – análise de caso. Espaço Energia, n. 32, pp. 20 – 29, 2020a. Disponível em <<http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/32/EE032.pdf>>. Acesso em: Ago. 2021.

OLIVEIRA, R. D. Benefícios das luminárias LED para o setor de iluminação pública brasileiro. Espaço Energia, n. 33, pp. 21 – 32, 2020b. Disponível em <<http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/32/EE032.pdf>>. Acesso em: Ago. 2021.

OLIVEIRA, R. D.; MELERO, J. C. M.; REIS, M. A. C.; SOUZA, M. M.; SOUZA, L. S.; RODRIGUES, D. S. Avaliação da telegestão na iluminação pública brasileira – estudo de caso. Espaço Energia, n. 34, pp. 21 – 32, 2021. Disponível em < <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/34/34a.htm>>. Acesso em: Ago. 2021.

PALHOÇA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Anexo I – Memorial Descritivo Técnico. Palhoça, 2018. Disponível em < [http://www1.palhoca.sc.gov.br/consultailuminacao/Anexo%20I%20-%20Memorial%20T%-c3%A9cnico.pdf](http://www1.palhoca.sc.gov.br/consultailuminacao/Anexo%20I%20-%20Memorial%20T%C3%A9cnico.pdf)>. Acesso em: Dez. 2019.

PATOS DE MINAS, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Relatório Técnico da Rede Municipal de Iluminação Pública de Patos de Minas. Patos de Minas, 2021. Disponível em < <http://patosdeminas.mg.gov.br/home/pppiluminacaopublica/>>. Acesso em: Out. 2021.

PETROLINA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Estruturação de Projeto de Parceria Público-Privada (PPP) da Rede de Iluminação Pública de Petrolina/PE – Produto 2: Relatório de Diagnóstico Técnico da Rede de Iluminação Pública. Petrolina, 2019. Disponível em < <https://petrolina.pe.gov.br/parceria-publico-privada-ppp-da-iluminacao/>>. Acesso em: Out. 2021.

PORTO ALEGRE, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Relatório de Diagnóstico Técnico da Rede de Iluminação Pública de Porto Alegre. Porto Alegre, 2019. Disponível em < [https://www2.portoalegre.rs.gov.br/ppp/default.php?p\\_secao=1454](https://www2.portoalegre.rs.gov.br/ppp/default.php?p_secao=1454)>. Acesso em: Dez. 2019.

RIBEIRÃO DAS NEVES, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Caderno2: Modelo Técnico Operacional. Ribeirão das Neves, 2018. Disponível em <<https://www.ribeiraodasneves.mg.gov.br/detalhe-da-licitacao/info/con-9-2018/10316>>. Acesso em: Out. 2021.

SANTA LUZIA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Relatório de Diagnóstico Técnico da Rede de Iluminação Pública de Santa Luzia/MG. Santa Luzia, 2019. Disponível em <<https://www.santaluzia.mg.gov.br/v2/wp-content/uploads/2019/08/Caderno-1-Diagn%C3%B3stico-T%C3%A9cnico-de-Rede-IP.pdf>>. Acesso em: Dez. 2019.

SÃO PAULO, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Subanexo VI – Lâmpadas do Cadastro Técnico. São Paulo, 2015. Disponível em <[https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/spregula/iluminacao\\_publica/noticias/?p=206645](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/spregula/iluminacao_publica/noticias/?p=206645)>. Acesso em: Out. 2021.

SÃO VICENTE, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Relatório de Diagnóstico da Rede de Iluminação Pública. São Vicente, 2020. Disponível em < <https://www.saovicente.sp.gov.br/8406>>. Acesso em: Out. 2021.

SAPUCAIA DO SUL, PREFEITURA MUNICIPAL DE. PPP de Iluminação Pública de Sapucaia do Sul – Relatório Técnico. Sapucaia do Sul, 2020. Disponível em <<https://www.sapucaiaodosul.rs.gov.br/ppp-ip/>>. Acesso em: Out. 2021.

SOUZA, A. C. B. P.; FORTES, M. Z.; SANTOS, M. T.; MEDINA, V. P. Potencial de eficientização dos sistemas de iluminação pública. Revista de Tecnologia Aplicada (RTA), v.10, n.3, pp. 18 – 32, Set-Dez 2021. Disponível em < <http://www.cc.faccamp.br/ojs-2.4.8-2/index.php/RTA/article/view/1702/826>>. Acesso em: Set. 2022.

STUTZ, P. V. S; SOUSA, J. C. A.; YAMAGUCHI, N. U.; REZENDE, L. C. S. H.; IMAI, H. E. Sistema LED: uma alternativa sustentável para iluminação pública. Enciclopédia Biosfera, v.15, n.28, pp. 1500 – 1509, 2018. Disponível em <<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2018B/ENG/sistema%20led.pdf>>. Acesso em: Set. 2022.

TERESINA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Relatório de Engenharia. Teresina, 2018. Disponível em <<https://semcop.pmt.pi.gov.br/documentos-edital-iluminacao-publica/>>. Acesso em: Out. 2021.

VILA VELHA, PREFEITURA MUNICIPAL DE. Iluminação Pública de Vila Velha – Relatório de Engenharia Final. Vila Velha, 2019. Disponível em <<https://www.vilavelha.es.gov.br/licitacoes/view/3921>>. Acesso em: Dez. 2019.

## OPORTUNIDADES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE GESTÃO DE PARQUES DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DOS MUNICÍPIOS

Renato Lima Novais<sup>1</sup>  
Jadson dos Santos de Santana<sup>1</sup>  
Pedro Medina Ismerin<sup>2</sup>  
Ricardo Vieira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Instituto Federal da Bahia*

<sup>2</sup>*Fundação Escola Politécnica*

<sup>3</sup>*AV Argollo Vieira Consultoria Pesquisa e Desenvolvimento LTDA*

DOI: 10.47168/rbe.v28i3.707

### RESUMO

Eficiência Energética tem sido um tema muito estudado no Brasil nos últimos anos. Esse princípio de realizar uma atividade utilizando menos recursos e com resultados similares é de enorme importância para a sociedade, uma vez que promove redução de custos financeiros e uma maior colaboração com o meio ambiente. Esse conceito torna-se relevante também em nível municipal. Afinal, os municípios precisam gerir bem seus – quase sempre, poucos – recursos. Para isso, é importante o uso de sistemas de gestão de parques de iluminação pública. Existem diferentes soluções de *software* com esse propósito, mas sem considerar a eficiência energética. Diante desse importante cenário, este trabalho faz uma análise da literatura na área, bem como de *softwares* para atingir tal fim. Com esta análise, foi possível fazer um levantamento de oportunidades para os sistemas de gestão, incluindo oportunidades de manutenções e construções de novos parques, na interação com o cidadão, por meio de análise visual de dados e possibilidades via *hardware*.

Palavras-chave: Sistemas; Iluminação Pública; Eficiência Energética; Oportunidades.

### ABSTRACT

Energy efficiency is a subject that has been studied in Brazil in the past years. This principle of doing an activity using less resources and achieving similar results is of great importance for society, once it promotes the reduction of financial costs and a greater contribution to

the environment. This concept becomes relevant as well at the municipal level. After all, cities need to manage their – almost always few – resources. For this, it is important to use public lighting park management systems. There are different options of software for that purpose, but without considering energy efficiency. Due to this scenario, this work analyzes the literature on energy efficiency and also on software that works on it. With the results, it was possible to present opportunities for management systems, including opportunities for maintaining and building new parks, interacting with the citizens, using visual analytics and also hardware possibilities.

Keywords: Systems; Public Lighting; Energy Efficiency; Opportunities.

## 1. INTRODUÇÃO

A Eficiência Energética (EE) é um tema muito relevante para a sociedade, uma vez que tem impactos econômicos e ambientais. EE pode ser definida como o meio de realizar os mesmos serviços/produtos gastando menos recursos, sem perda de qualidade (PATTERSON, 1996). Em geral, a grande preocupação é com os recursos naturais, os quais não são infinitos e podem diminuir drasticamente – ou até mesmo sumir – da natureza. Neste contexto, é fundamental que a sociedade em geral, seja através das organizações públicas e privadas ou dos seus cidadãos, crie ações para buscar a efficientização do uso de seus recursos.

De fato, o tema, há um bom tempo, vem aparecendo nas agendas de políticas públicas (PATTERSON, 1996). Governos ou entidades não governamentais desenvolvem – ou incentivam – projetos que têm como objetivo a EE. É comum encontrar iniciativas fora do país, em especial nos países mais desenvolvidos. Por exemplo, o programa Europa 2020 da Comissão Europeia (CE), publicado em 2010, tinha como base um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo para os próximos dez anos. Dentre as cinco metas definidas, tem-se de alcançar um aumento de 20% na eficiência energética (COMMISSION; COMMISSION et al., 2010). Em 2015, Portugal lançou um programa alinhado ao Europa 2020, que tinha entre seus objetivos o foco específico em eficiência energética em municípios (MINISTROS, 2015). O que incluía o apoio à eficiência energética, à gestão inteligente da energia e à utilização de energias renováveis em infraestruturas públicas, nomeadamente em edifícios públicos locais, incluídos nos programas operacionais regionais e financiados pela CE. No Brasil, há, ainda que de forma promissora, iniciativas que visam apoiar a EE, como o Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), que busca promover o uso eficiente de energia visan-

do obter menor desperdício (MME, 1985), e também a criação da Olimpíada Nacional de Eficiência Energética (ONEE) no ano de 2021, que tem como objetivo fomentar o estudo da EE no ambiente escolar (ONEE, 2021).

A EE pode ser desenvolvida de diferentes formas e em diferentes contextos, uma vez que não está relacionada apenas com a energia elétrica. Dois exemplos disso são a geração de energia térmica renovável através da reutilização da água descartada em ares-condicionados (BENTES et al., 2019) e também a produção de energia cinética através de sistemas eólicos (TERCIOTE, 2002). Além disso, existem ações que atualmente podem ser tomadas por agentes em diferentes níveis da sociedade (governos, organizações não governamentais, empresas e cidadão), como a troca de lâmpadas residenciais por lâmpadas LED, uma melhor vedação dos ambientes com ar-condicionado (BATISTA; LEITE, 2021), ou até mesmo o reposicionamento dos postes de iluminação pública (ROCHA et al., 2016).

Uma forma de realizar EE diz respeito a economia com o consumo de energia elétrica. Este é, já também há um bom tempo, um recurso crítico, que tem sido fonte de problemas no país. Recentemente, em 2021, o Brasil atravessou uma forte crise hídrica, inflacionando os preços da energia elétrica e, por conseguinte, os preços de diversos produtos (GIFE, 2021). A busca por EE neste contexto é feita também em diferentes níveis, que vão do governo ao cidadão. Um dos atores relevantes nesse processo são as prefeituras, uma vez que as mesmas são responsáveis pela gestão de parte do consumo de energia e todas as medidas, sejam elas positivas ou negativas, podem impactar seus municípios, como a implantação de taxas como CIP/COSIP.

No Brasil, os municípios são, por força da lei, responsáveis pelo seu parque de iluminação pública (ANEEL, 2010). Normalmente, eles precisam pagar às concessionárias de energia elétrica os custos de energia consumida pela iluminação das ruas ou dos prédios públicos. A cobrança é feita através de estimativa baseada em levantamento, quase sempre feito pela própria concessionária, com um atraso que pode chegar a até dois anos. Em alguns casos, porém, os municípios dispõem de processos e plataformas de *software* para realizar o cadastro do parque de iluminação e, assim, terem dados mais reais e mais atualizados.

Quando o município faz uso de uma solução de *software* para controle do seu parque, sem dúvida passa a ter um conhecimento valioso a respeito de um ativo importante, que é responsável por um dos maiores custos do mesmo. Em cidades de pequeno e médio porte como Sinop-MT e Santa Rosa-RS, o valor anual pago pode ultrapassar 4 milhões de reais, enquanto que em municípios de grande porte, como Campinas-SP e Recife-PE os gastos com este tipo de despesa

podem chegar a 6 milhões de reais por mês (MILÉSKI, 2019) (POVO, 2022) (RECIFE, 2022) (GUGLIELMINETTI, 2022).

Ter conhecimento dos dados permite – ou deveria permitir – aos municípios tomarem ações mais efetivas em relação a EE. Entretanto, há ainda uma falta de maturidade nas ações de captação e gestão deste tipo de informação. Essas carências aliadas ao fato de as soluções de *software* existentes no país não disporem de funcionalidades que ajudem nesse sentido, atrapalham ainda mais os municípios nos processos de revitalização dos espaços.

Algumas ações, como é de se esperar, vêm sendo realizadas para mudar esse cenário. A Secretaria de Infraestrutura do Estado da Bahia (SEINFRA), por exemplo, está desenvolvendo um projeto que tem como meta prover um sistema para todos os municípios baianos com até 50 mil habitantes. Isso representa 369 dos 417 municípios (IBGE, 2021). Com uma maior maturidade tecnológica, é possível vislumbrar ações que municiem os municípios para a busca da EE.

Este trabalho tem como objetivo investigar a EE no contexto dos municípios, mais especificamente relacionado à iluminação pública. Para atingir tal objetivo, foi seguido um método incremental nesta pesquisa. Primeiramente, foi feito um estudo da literatura para entender ações de eficiência energética existentes nos municípios (seção 2). Em segundo lugar, foi feito um levantamento das principais ferramentas de gestão dos parques de iluminação e também de ferramentas de projeto de parques para se ter um entendimento de suas funcionalidades (seção 3). Por fim, este trabalho busca apresentar oportunidades a serem implementadas no sentido de ter suporte a EE em sistemas de *software* de gestão de parques de iluminação pública (seção 4).

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção aborda temas importantes que permeiam a análise dos parques de iluminação pública. A seção 2.1 apresenta alguns conceitos iniciais referentes à Eficiência Energética (EE). As Seções 2.2 e 2.3 discutem gestão de EE em municípios e mais especificamente em parques de iluminação pública, respectivamente. As quatro seções seguintes tocam em temas mais distintos, mas que ainda têm relação com este trabalho. A seção 2.4 define sistemas de gestão de parques de iluminação. A seção 2.5 destaca o importante papel da educação em todo esse processo, enquanto a seção 2.6 discorre sobre normas para definição dos parques. A seção 2.7 aborda a tarifa de iluminação pública. Por fim, é abordado o tema Análise Visual de Dados (seção 2.8) como outra ferramenta importante para auxiliar no processo de EE através de sistemas de gestão de parques de iluminação pública.

## 2.1 Eficiência energética

Eficiência energética pode ser definida como o uso de menos energia para produzir a mesma quantidade de serviços e produtos (PATTERSON, 1996). Ela é definida pela razão entre Saída útil de um processo e Entrada de energia neste processo. Numa visão mais econômica, a eficiência energética pode ser vista não como um objetivo final, mas como um meio para alcançar a produção de bens e serviços para a sociedade, de forma mais rentável (JAFFE; STAVINS, 1994).

A eficiência energética pode ser aplicada em diferentes setores e de diferentes formas, com foco em reduzir consumo de energia na construção de infraestrutura, edifícios, na operação de máquinas, nos dispositivos utilizados, entre outros. Dada a sua relevância, diversos estudos destacam um esforço para alcançar cada vez mais e melhor a eficiência energética. Por exemplo, Harvey (2009) estuda como a forma de realizar a construção civil pode impactar na eficiência dos prédios; Lung, Masanet e McKane (2006) analisam os impactos de tecnologias emergentes na indústria de processamento de alimentos à luz da eficiência energética. No ramo do transporte, é possível identificar também alguns estudos em diferentes locais, como China (CHUNG; ZHOU; YEUNG, 2013), Japão (LIPSCY; SCHIPPER, 2013), países europeus (TVARONAVIČIENE, 2018), (MARCUCCI; VALERI; STATHOPOULOS, 2012), Estados Unidos (KOSHAL; KOOL, 1978) e Brasil (DOMINGUES; PECORELLI-PERES, 2013); além de várias outras áreas.

As ações de eficiência energética acontecem em praticamente todo o mundo. De fato, eficiência energética afeta consideravelmente qualquer país que pretende ter um desenvolvimento sustentável e seguro (TVARONAVIČIENE, 2018). Muitos países, principalmente os mais desenvolvidos, desenvolvem políticas de incentivo à eficiência energética. Exemplos disso são o governo da Alemanha, que em 2019 resolveu adotar uma política denominada *Energiewende* (transição energética), buscando reduzir pela metade o consumo de energia até o ano de 2050 (ENERGIEWENDE, 2019), e também a Dinamarca, que em 2020 firmou acordos para deixar de emitir licenças para exploração de petróleo e gás, e eliminar toda sua produção de combustível fóssil até 2050 (FARAND, 2020).

Na prática, quem tem o maior potencial de realizar a economia é quem está na ponta final: i.e. governos municipais. O governo federal (ou centrais em alguns países) precisam contar com o apoio dos governos locais. Os municípios desempenham um papel crucial na defesa e implementação de medidas de eficiência energética em escala local (ANNUNZIATA; RIZZI; FREY, 2014). Em última instância, mas não menos importante, é preciso contar com a ação dos cidadãos

neste processo.

## 2.2 Gestão da eficiência energética em municípios

A melhoria da eficiência energética é por natureza uma atividade descentralizada. O município é um importante ator no processo de efficientização energética (REZESSY et al., 2006). Ele tem um papel essencial a desempenhar na garantia de condições adequadas e na aplicação de medidas para a melhoria da eficiência energética (LAPONCHE et al., 1997).

Os municípios são responsáveis pelos consumos de energia dos prédios públicos, bem como pelo parque de iluminação pública. A gestão adequada desse recurso beneficia toda a população. A redução nos custos públicos melhora a vida do cidadão, com possível redução de impostos e melhoria na qualidade dos serviços públicos (FIASCHI; BANDINELLI; CONTI, 2012).

Dada a relevância do papel dos municípios neste contexto, muitos estudos investigam esse tema (DANILINA et al., 2016) (JIANG et al., 2020) (REZESSY et al., 2006). Implementar eficiência energética nos municípios requer investimentos (ANNUNZIATA; RIZZI; FREY, 2014). Por exemplo, realizar uma auditoria pode ajudar a identificar se as ações de EE estão de fato sendo realizadas. Entretanto isso requer investimento. Infelizmente, nem sempre os municípios dispõem de recursos abundantes e é comum priorizarem ações mais populistas, principalmente em curto prazo. É importante ressaltar que as ações de EE geram impactos em longo prazo. Muito do que é feito hoje gerará frutos para gerações futuras.

De acordo com Annunziata, Rizzi e Frey (2014), o tamanho do município parece não influenciar o desenvolvimento da eficiência energética nas edificações municipais. Entretanto, municípios menores dispõem de menos recursos e de possibilidades de melhoria de arrecadação. Nesses municípios menores, inclusive, o peso relativo do custo de energia elétrica geralmente aumenta (FIASCHI; BANDINELLI; CONTI, 2012). Assim, urge ainda mais a necessidade de economia de recursos. Geralmente, as soluções passam por instalação de fontes de energias renováveis nos prédios públicos, e trocas de lâmpadas (FIASCHI; BANDINELLI; CONTI, 2012). Muitos trabalhos de fato destacam o papel das lâmpadas de LED como uma alternativa para a economia. Já Danilina et al. (2016) destacam diversas ações possíveis como: modernização ativa; introdução de tecnologias de inovação; mudança para fontes de energia renováveis (energia eólica, geotérmica, maremotriz e biomassa); desenvolvimento de geração de energia em pequena escala (usinas de diesel e painéis solares). Para isso, os autores evidenciam a necessidade de se ter um ambiente administrativo e infraestrutura necessária para atrair e manter investimentos.

É preciso buscar condutas que incentivem os municípios na participação em eficiência energética. Nesta linha, Rezessy et al. (2006) elencam ações importantes que podem determinar a participação dos municípios, tais como: i) dar posse: os municípios só investirão esforços e recursos financeiros nas esferas públicas para as quais foram atribuídas responsabilidades claramente definidas. Se o controle for nacional, ou ficar indefinido, pouco será feito; ii) dar acesso a financiamentos para investir na área; iii) motivação dos gestores e funcionários públicos depende dos benefícios que têm; iv) criar mecanismos que permitam reter as economias onde elas foram geradas.

Fica evidente, então, que é preciso definir políticas de larga escala e de longo prazo para os municípios. Os municípios precisam entender eficiência energética como algo necessário para sua sobrevivência, e não apenas como uma ação pontual.

### **2.3 Gestão da eficiência energética em parques de iluminação pública**

Um parque de iluminação pública pode ser definido como o conjunto de pontos de iluminação em áreas públicas associados ao município e seus respectivos distritos. Esses parques contribuem significativamente para os custos com energia dos municípios (SUBRAMANI et al., 2019). Isto inclui os postes que iluminam as vias públicas e praças, os semáforos, passeios, ciclovias, etc., além de outros ativos que podem, por exemplo, atuar de forma sazonal (e.g. iluminação de Natal) (COMPETENCE, 2005).

Esses custos podem variar de acordo com o município, dependendo do seu tamanho ou da quantidade de prédios públicos existentes. Municípios com poucos prédios públicos têm a maior parte dos custos de energia associados ao parque. Contudo, segundo levantamento da Eletrobrás, em 2019 a iluminação pública correspondeu a cerca de 3,3% da demanda nacional, o equivalente a um consumo de 15,8 bilhões de kWh/ano (EMPRESA DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020). Há estudos que reportam a economia em consumo de energia, como são os casos de ROCHA et al. (2016) e SHINTABELLA (2021). Entretanto, estes são casos específicos, não permitindo generalizações. Em qualquer situação, conhecer e gerir esse parque passa a ser fundamental para administrar os custos associados.

A gestão passa primeiramente por conhecer seu parque. Sistemas de telegestão (KDL, 2021) (GREEN, 2022) (SOMA, 2016) (MERCANTIL, 2021) (FACILITA.TECH, 2022) são importantes nessa tarefa, uma vez que ajudam a registrar quantitativos de lâmpadas e todo material auxiliar necessário para o funcionamento da mesma. Contudo, nem todos os municípios brasileiros utilizam essas soluções.

Considerando a existência do sistema, e conseqüente um

maior conhecimento do parque, abre-se espaço para implementar ações de EE. Estudos encontrados na literatura trazem propostas de implementação de EE em parques de iluminação.

Subramani et al. (2019) destacam que o sistema de iluminação é frequentemente mal calculado, conduzindo à perda de recursos energéticos inestimáveis. Os autores propõem um sistema de iluminação pública inteligente consistindo de luz LED, sensores de luminosidade, para movimento e rede de transferência de dados a curta distância. A ideia é que as luzes possam acender pouco antes de os pedestres e veículos passarem e desligarem ou reduzirem a intensidade após a passagem. Na busca da eficiência, eles destacam a importância para atividades como: seleção de luminárias eficientes; projeto eficaz e instalação adequada; fator de baixa potência e baixa operação e práticas de manutenção.

Como boa parte dos autores, Subramani et al. (2019) sugerem também a troca por lâmpadas mais eficientes. Porém, na contramão, Alzubaidi e Soori (2012) relatam que um possível retorno financeiro na troca de lâmpadas de halogeneto de metal por LED levaria cerca de trinta e cinco anos para ser obtido, e um projeto com lâmpadas de sódio de alta pressão ao ser trocado por LED apresentaria retorno somente após algumas centenas de anos. De acordo com os autores, isso mostra que o design usando LED nem sempre pode ser considerado uma escolha boa no que diz respeito ao julgamento financeiro, apesar de sua alta economia de energia, pois os projetos de iluminação podem não durar o tempo necessário para o retorno. Vale ressaltar, entretanto, que o estudo feito por Alzubaidi e Soori utiliza luminárias LEDs fabricadas até 2012, que possuem valores de lúmen por watt (entre 28 e 79 lm/W) abaixo dos disponíveis em 2022 (entre 130 a 160 lm/W, as mais eficientes). Além disso, o custo das luminárias baixaram. Há estudos, por exemplo, que relatam economia no consumo de energia com o uso de lâmpadas de LED (LI et al., 2009).

Spur, Houel e Tourre (2020) usam ferramentas de visualização de dados por imersão para buscar locais que sejam iluminados além do necessário na opinião dos cidadãos. O objetivo é encontrar trechos de vias nos quais o nível de iluminação pode ser reduzido, diminuindo assim o consumo de energia. Além disso, os autores também visam diminuir a poluição luminosa, que pode ser entendida como a iluminação superdimensionada e/ou falta de controle da distribuição luminosa das luminárias (COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE DA ABNT, 2018). Assim, há impacto não só financeiro, mas também no conforto dos pedestres e motoristas. Uma boa iluminação pública pode trazer diversos benefícios aos cidadãos. Uma via bem iluminada diminui os riscos de acidentes de automóveis e atropelamentos, além de trazer maior segurança. Uma boa iluminação traz um embelezamento urbano, trazendo também uma maior qualidade de vida.

## 2.4 Sistemas de gestão de parques de iluminação pública

Em 2020 a ANEEL publicou a resolução 888, que dá mais liberdade aos sistemas de gestão do parque de iluminação pública (ANEEL, 2020). Um sistema de gestão ou telegestão do parque de iluminação pública constitui-se de um *software* que pode conter a base de dados da iluminação pública, incluindo todos os pontos luminosos, potências das lâmpadas, informação em tempo real de lâmpadas defeituosas, dimerização das lâmpadas e geração de relatórios de consumo de energia elétrica.

Um sistema de gestão aumenta a quantidade de informações dos gestores municipais e traz informações sobre o consumo de energia elétrica, que pode ser usado para a fatura (ANEEL, 2020), reduzindo eventuais erros de registro que levam a faturas incorretas. Entretanto, esses sistemas de gestão ainda não são amplamente utilizados, e além disso, eles são recentes, ou seja, o conceito de utilizar essas ferramentas ainda não está amplamente estabelecido nos municípios. Um fator importante desses sistemas é a visualização de uma quantidade muito grande de dados, de forma simples, e que auxilie a tomada de decisão.

## 2.5 O papel da educação/informação

Um ponto crucial que aparece recorrentemente na literatura é a necessidade de educar e informar o cidadão. Se os municípios têm um papel importante, os seus cidadãos também precisam ajudar. Da mesma forma, é preciso que cada indivíduo tenha noção da importância da eficiência energética em longo prazo. Tendo isso incorporado, cada um pode ajudar neste processo.

Muitas vezes o consumidor não tem noção de como a EE é realizada. Os governos são responsáveis por tornar tudo isso mais transparente. Há inclusive iniciativas já de longa data nesta direção. O *Joint Committee of the Congress of the United States* (1981) sugeriu a criação de uma medida para apresentar ao consumidor final a energia economizada de forma que seja fácil de compreender o resultado (PATTERSON, 1996).

A falta de informação pode impactar negativamente nas ações realizadas pelos municípios. Por exemplo, tecnologias – como novos tipos de lâmpadas – nem sempre vão ser adotadas como esperado pela sociedade (JAFFE; STAVINS, 1994).

É preciso educar e informar as pessoas para fazerem parte do processo e adotarem boas práticas de eficiência energética. As pessoas muitas vezes não se preocupam em economizar pouco, mas é importante ter uma noção de comunidade: cada kilowatt economizado beneficia mais a sociedade como um todo do que individualmente

(JAFFE; STAVINS, 1994).

Ações de economia de energia que incentivam a participação da população se tornam cada vez mais importantes. O Plano Nacional de Energia 2030, do Ministério de Minas e Energia (MME, 2007), destaca o crescimento do consumo de eletricidade, inclusive na classe residencial.

Da mesma forma que os municípios, os consumidores precisam ser motivados. Danilina et al. (2016) destacam a falta de motivação dos consumidores para a conservação de energia como uma das principais barreiras.

## **2.6 As normas para definição dos parques**

As vias públicas dos municípios brasileiros têm que ser iluminadas respeitando a norma ABNT NBR 5101 (Comitê Brasileiro de Eletricidade da ABNT, 2018). Essa norma regula os requisitos mínimos de iluminação para os diferentes tipos de vias.

A norma separa as ruas em diferentes classes de iluminação, que são definidas de acordo com o seu objetivo, o fluxo de pessoas e o fluxo de pedestres. Para a pista de fluxo de veículos, as classes variam de V1 a V5, e para o fluxo de pedestres, de P1 a P4. O menor número indica um fluxo maior, e requisitos maiores de iluminação.

Cada via tem diferentes requisitos:

- requisito de iluminação mínima: dado em função da iluminância média ou luminância média. Serve para garantir um nível adequado de iluminação;
- requisito de uniformidade mínima: em função da relação entre a média da iluminação e os mínimos obtidos nas vias. Serve para evitar zonas escuras numa via;
- requisito de ofuscamento máximo: Serve para evitar que a luz traga desconforto aos cidadãos;
- requisito da razão da iluminação na via e na calçada: usado em vias V1 e V2, para garantir que a passagem de pedestre esteja bem destacada e evitar acidentes entre veículos rápidos e objetos ou pessoas entrando na pista.

## **2.7 Contribuição para o serviço de iluminação pública**

Os custos com manutenção da iluminação pública não são baixos. A gestão do parque também ajuda na tomada de decisão, inclusive preventiva, para otimizar os gastos. Consequentemente, impacta também nas despesas com energia elétrica pagas pelos municípios. Luzes acesas durante todo o dia, por exemplo, ou cobran-

ça em duplicidades são situações mais fáceis de detectar ao ter uma gestão.

O parque de iluminação pública é um elemento importante para as prefeituras. Além das possibilidades apresentadas para gestão, cabe destacar o potencial de arrecadação dos municípios. A Emenda Constitucional nº 39 de 19 de dezembro de 2002 acrescenta o art. 149-A à Constituição Federal, instituindo contribuição para custeio do serviço de iluminação pública nos Municípios e no Distrito Federal (BRASIL, 2002).

A partir de então, os municípios brasileiros têm o direito à implementação da Contribuição para o Custeio do Serviço de Iluminação Pública - COSIP. A forma como essa contribuição é calculada depende do município e da criação de lei específica. Essa contribuição é embutida na conta de energia das residências, e serve para o município pagar o consumo de energia elétrica na iluminação pública, além da manutenção, operação, melhoramento e expansão do parque de iluminação.

Os valores arrecadados passam a ajudar os municípios no pagamento de suas despesas com energia elétrica.

## 2.8 Análise visual de dados

Um dos desafios dos sistemas de gestão e de auxílio à tomada de decisão é a representação visual de uma grande quantidade de dados. Essa representação é chamada de análise visual de dados. A visualização de dados é ampla e conhecida, mas poucos estudos da área focam em eficiência energética, especialmente quando aplicada à iluminação pública.

Prouzeau et al. (2018) discutiram o uso de análise visual (*Visual Analytics* em inglês) em sistemas de automação predial na gestão de temperatura. Eles propõem uso de representação contextual em mapas, mostrando parâmetros de consumo de energia elétrica e de feedback de conforto dos usuários. Além disso, usa-se telas comparativas de períodos diferentes, para checar eficiência energética e conforto.

No contexto de planejamento urbanístico de iluminação pública, Spur, Houel e Tourre (2020) propuseram uma observação de analítica imersiva, um ramo novo da análise visual para a tomada de decisões. Foi proposto o uso de visualização simultânea de múltiplas camadas de informação utilizando realidade virtual. Escolheu-se cidadãos para serem entrevistados e para analisarem mapas com camadas de informações espalhadas verticalmente. Os entrevistados deveriam procurar uma área da cidade onde achavam que poderiam diminuir a iluminação, e por consequência, a poluição luminosa. As camadas de informações incluem: consumo energético, poluição luminosa vista de

uma foto aérea noturna, linhas de transporte público e pontos de interesse, como restaurantes. O autor fala que o uso de projeções 3D é desnecessário, visto que a representação final é em um mapa 2D.

### 3. FERRAMENTAS DE GESTÃO E PROJETO DE PARQUES DE ILUMINAÇÃO

Tanto a literatura acadêmica quanto as soluções disponíveis no mercado possuem uma série de trabalhos e ferramentas que buscam auxiliar os gestores no controle dos parques de iluminação. Muitas delas contam com funcionalidades como mapeamento georreferenciado dos ativos, gerenciamento de ordem de serviços e análise de luminância dos campos, porém carecem de métodos que atuem de forma ativa nas ações de tomada de decisão e inserção de novos pontos. Atualmente, há plataformas para diferentes estágios da gestão pública, como gerenciamento geral da iluminação municipal ou somente o planejamento luminotécnico de ambientes. A subseção 3.1 apresenta alguns trabalhos no âmbito acadêmico, enquanto que as subseções 3.2 e 3.3 exibem ferramentas direcionadas à gestão ou projeção dos parques públicos.

#### 3.1 Trabalhos correlatos

No trabalho de (ROCHA et al., 2016) foi desenvolvido um *software* com objetivo de melhorar a qualidade da iluminação e o consumo de energia. Para que isso fosse possível, foi projetado um cluster de computadores com um cliente Java e um sistema que faz uso de algoritmos evolutivos para definir um melhor posicionamento dos postes. Na ferramenta, o usuário fornece informações como a altura dos postes, lâmpadas permitidas, nível de luminância desejado e a planta do local a ser iluminado. Além desses dados, é possível selecionar espaços na área onde não se deseja a inserção de pontos. Com base nessas informações, o *software* executa o algoritmo e gera uma visualização indicando o melhor posicionamento para cada ponto. Para validar a ferramenta, o autor comparou o resultado gerado pelo algoritmo com o modelo de referência fornecido por um profissional. Como resultado, a solução apresentou consumo de energia 37,5% menor e aumento em 227,3% na uniformidade da iluminação.

Já o trabalho de (SHINTABELLA; ABDULLAH; HAKIM, 2021) versa sobre a projeção de um algoritmo genético que busca otimizar o posicionamento dos pontos de iluminação, permitindo um redesenho dos ambientes. Para gerar os resultados, o algoritmo leva em consideração parâmetros como largura das vias, altura dos postes, potência das lâmpadas e características relacionadas às normas técnicas da Indonésia. Para a validação da solução, os autores utilizaram como

objeto de estudo uma estrada na cidade de Bandung, Indonésia. A simulação utilizou como base as características da via e os postes posicionados na mesma. Em seguida, foi executado o algoritmo em um ambiente montado na ferramenta MATLAB, que permite executar diferentes cálculos matemáticos em alta performance. Por fim, a saída gerada pelo sistema foi desenhada no *software* luminotécnico Dialux, que permite analisar informações de luminância e eficiência energética de ambientes. Como resultado, a solução apresentou uma redução de 32% no consumo de energia e 70% no custo ao longo de um ano. Entretanto, é válido mencionar que o resultado provido não atingiu totalmente a norma técnica da região (SNI 7391: 2008), uma vez que a iluminação média estava de acordo com o padrão, mas o nível de distribuição de luz não obteve o mesmo êxito.

### 3.2 Sistemas de gestão do parque de iluminação

#### 3.2.1 Cidade iluminada

Atualmente, é a solução líder em atendimentos, estando presente em mais de 300 municípios, incluindo 10 capitais e gerenciando mais de 4 milhões de pontos de iluminação por todo o Brasil (MERCANTIL, 2021). A plataforma desenvolvida pela companhia Exati Tecnologia permite ao gestor visualizar todos os pontos da cidade de forma georreferenciada, facilitando o acesso e organização dos mesmos. Ademais, por meio do *software* é possível gerenciar as ordens de serviços relativas à manutenção ou instalação de pontos, que podem ser geradas por atendentes da companhia ou pelos próprios munícipes, via aplicativo móvel disponível para as plataformas Android e IOS. A ferramenta ainda permite que os gestores visualizem por meio de relatórios o desempenho das equipes de campo, os materiais disponíveis, itens instalados e outros dados (EXATI, 2021).

Apesar das funcionalidades acima, o *software* Cidade Iluminada (CI) carece de funcionalidades que atuem no processo de tomada de decisões. Em situações de planejamento de pontos ou reordenação de ambientes, a ferramenta pode ser utilizada apenas como objeto de consulta de dados, por não possuir muitas funções com foco em eficiência energética.

#### 3.2.2 SomaSIG

O SomaSIG é um *software* produzido pelo Instituto Soma, que tem como objetivo permitir que as prefeituras consigam gerenciar melhor os ativos e parques de iluminação (SOMA, 2016). Por meio desta, o administrador é capaz de gerenciar o estoque da região, visualizar os ativos cadastrados na cidade, emitir relatórios sobre os parques e fazer

a gestão das equipes de campo disponíveis. Além disso, os residentes da cidade também são capazes de registrar solicitações referentes à manutenção ou inserção de pontos por meio de uma plataforma web criada pela companhia (SOMA, 2016).

O sistema é dividido em quatro módulos: O módulo cadastral é responsável pelo registro de todos os pontos atuais, que são obtidos por meio de importação de dados das concessionárias de energia ou inserção manual, feita pela equipe de campo via aplicativo mobile. O módulo operacional é destinado à gestão das ocorrências e equipes de campo. Quando um usuário solicita atendimento, este subsistema faz o registro do mesmo e aloca uma equipe de campo para atender ao chamado. Por meio do módulo gerencial, o gestor consegue visualizar dados e acompanhar todas as ocorrências do sistema, utilizando cruzamentos e filtros, que permitem analisar informações como bairros com mais chamados, tempo médio para atendimento das ocorrências e qual tipo de ocorrência é mais frequente. Por fim, o módulo de atendimento é responsável por permitir a interação dos residentes do município com a plataforma. Por meio de uma interface web, é possível abrir ocorrências e visualizar seus respectivos status (SOMA, 2016).

O SomaSIG possui muitas características em comum com o Cidade Iluminada. Funções como controle de estoque, registro de chamados e emissão de relatórios estão presentes na maior parte das plataformas focadas na gestão do parque de iluminação. Porém, assim como o sistema da Exati, o SomaSIG não oferece muitas ferramentas que apoiem a tomada de decisões de eficiência energética ou que exerçam grande influência do processo de planejamento de ambientes.

### 3.2.3 SIPUB

O Sipub é uma ferramenta criada pela empresa Facilita.tech, que assim como as duas anteriores, busca auxiliar os gestores municipais no controle dos pontos de iluminação. A ferramenta está presente em alguns estados, como Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo, e conta com funcionalidades de gerenciamento de estoque, controle dos ativos da cidade, gestão de ordens de serviços para manutenção e inserção de novos postes, e também um módulo que permite relatórios com dados sobre os atendimentos e pontos, em geral (FACILITA.TECH, 2022).

Assim como o Cidade Inteligente, os atendimentos do Sipub são registrados por meio de aplicativo móvel, desta vez denominado SipuB Iluminação Fácil Cidadão, que está disponível para os sistemas Android e IOS de forma gratuita em lojas de aplicativos. Além disso, a plataforma conta com um segundo aplicativo, chamado SipuB Iluminação Fácil Cadastramento, que também é disponibilizado aos dois sis-

temas operacionais. Entretanto, não é de acesso livre, sendo utilizado apenas por gestores e funcionários diretamente envolvidos nos processos de cadastramento dos ativos dos municípios (FACILITA.TECH, 2022).

As principais funcionalidades presentes nos *softwares* de gerenciamento da iluminação pública estão presentes também no Sipub, que assim como as plataformas relatadas acima, tampouco atua de forma muito ativa no processo de tomada de decisões. Isso indica que essa carência pode ser comum em ferramentas voltadas à gestão geral dos pontos. Além da questão supracitada, é válido mencionar que o fato de existirem dois aplicativos com nomes similares em cada loja pode levar os usuários a se confundirem e baixarem o *software* errado.

### 3.2.4 Análise comparativa

Tabela 1 – Comparação entre as ferramentas disponíveis

Característica	Exati CI	SomaSIG	Sipub
Permite gerenciar o estoque	Sim	Sim	Sim
Oferece análises sobre a região	Sim	Sim	Sim
Permite modelar novos parques	Não	Não	Não
Controla manutenções nos parques	Sim	Sim	Sim
É Open Source	Não	Não	Não
É gratuito	Não	Não	Não
Plataforma	Web e Mobile	Web	Web e Mobile

Como é possível visualizar na Tabela 1, as três ferramentas cumprem o mesmo papel e podem ser consideradas iguais. Funções como controle de estoque, análise de dados e controle da manutenção dos ambientes podem ser consideradas essenciais para este tipo de aplicação e estão presentes em todas. As diferenças entre as opções podem ser consideradas sutis, como exemplo a forma de interação com o usuário, que no caso do SomaSig é somente via aplicação *web*; já no CI e no Sipub podem ser realizadas por meio de aplicativos móveis, sendo que o Sipub ainda possui uma versão de acesso exclusivo para gestores.

Além dos *softwares* mencionados acima, o mercado brasileiro de sistemas conta com mais opções, como o Gisworks, da empresa Unidesk (UNIDESK, 2019), Sig Iluminação Pública, da Multisig (MULTISIG, 2022) e também o IPCadastro e SoftLuz, ambos desenvolvidos pela empresa FastSoft (FASTSOFT, 2016). Todas essas ferramentas contêm características e propósitos semelhantes aos das supracitadas. Por fim, é importante reforçar que apesar da quantidade de fun-

cionalidades disponíveis nas soluções, todas as plataformas listadas carecem de funcionalidades que auxiliem o processo de planejamento dos parques, especialmente lidando de forma ativa com a ênfase na eficiência energética dos projetos.

### 3.3 Sistemas de projeto do parque de iluminação

#### 3.3.1 Dialux

Atualmente, é a ferramenta mais popular para projeções luminotécnicas, estando disponível em mais de 26 idiomas e recebendo apoio de cerca de 150 fábricas de luminárias e lâmpadas por todo o mundo. O *software* desenvolvido pela Dial em 1994 é referência em simulação computacional, permitindo projetar os ambientes internos e externos com visualizações 2D e 3D (LANCELLE, 2018).

A plataforma consiste em um ambiente no qual o usuário consegue gerar uma modelagem do espaço real, inserindo todas as características do local, como quantidade e altura de paredes, escadas ou portas, e também a presença de árvores ou prédios, em situações de modelagem de ambientes externos, o que torna a simulação mais próxima da realidade. Além disso, o sistema trabalha com as características físicas das lâmpadas, permitindo compreender o nível de alcance de cada uma e seu respectivo consumo. É válido mencionar ainda que o Dialux permite ao usuário trabalhar com a iluminação natural, artificial e simultânea nos ambientes, e ao fim, é possível gerar todo o cálculo luminotécnico e de eficiência energética do espaço, possibilitando ainda visualizar quão distribuídos estão os pontos do local. O Dialux está disponível em duas versões: Dialux 4 e Dialux Evo. A versão 4 foi a primeira da companhia, porém alguns anos depois, foi descontinuada. Em 2012, foi lançado o Dialux Evo, que busca aprimorar os recursos presentes na versão anterior. Esta versão permanece recebendo atualizações de seus mantenedores (CRÍZEL, 2019).

#### 3.3.2 AGI32

É a ferramenta pioneira no ramo de design ponto a ponto e projeção de iluminação. O *software* desenvolvido em 1985 serve de base para diversos projetos luminotécnicos, mesmo sendo mais focado na elaboração de cálculos para previsões fotométricas e índices de luminâncias de ambientes (CRÍZEL, 2019).

O AGI32 possui muitas características similares ao Dialux, como a possibilidade de projeção dos ambientes em formatos 2D e 3D, a aceitação de diferentes padrões de fotometria e projeção dos índices de luminância de diferentes locais. Entretanto, o ponto forte do *software*

está na precisão dos cálculos fotométricos. A ferramenta consegue auxiliar na validação e adesão aos diferentes critérios e normas de iluminação, e também calcular a radiosidade tanto em luz elétrica quanto iluminação natural. Uma outra diferença entre os projetos está no acesso aos mesmos. Enquanto o Dialux é gratuito e *open source*, o AGI32 está disponível apenas por meio de licença mensal ou anual (CRÍZEL, 2019).

### 3.3.3 Relux

É possivelmente o principal concorrente do Dialux disponível no mercado. Este conjunto de ferramentas recebe o apoio de cerca de 100 fábricas e também permite projetar os ambientes com visualizações 2D e 3D (LANCELLE, 2018).

No *software* é possível desenvolver projetos luminotécnicos para uma diversidade de locais, como praças, ruas, avenidas, escritórios e até mesmo edifícios inteiros. Além do mais, no Relux o usuário consegue simular iluminação de emergência para vias, além de natural, artificial e simultânea, da mesma maneira que seus principais concorrentes, Dialux e AGI32. Ainda é válido mencionar que a ferramenta conta com suporte a diferentes normas de iluminação, permitindo uma projeção mais próxima dos critérios de cada região (CRÍZEL, 2019).

Um outro fator diferencial da plataforma é a integração com outras ferramentas, como Revit, AutoCAD e TinLine Plan. Por meio de plugins, é possível incorporar as funcionalidades do Relux em ambientes de terceiros. Entretanto, a maior parte dos plugins não está disponível de forma gratuita (CRÍZEL, 2019).

Diferentemente do AGI32, o Relux possui uma versão gratuita. Porém, como mencionado anteriormente, a maior parte dos plugins e extensões disponíveis no mercado são pagas.

### 3.3.4 Análise comparativa

Tabela 2 – Comparação entre as ferramentas luminotécnicas

Característica	Dialux	AGI32	Relux
Permite modelagem 2D e 3D	Sim	Sim	Sim
Utiliza Ray Tracing	Sim	Sim	Sim
Cálculo de eficiência energética	Sim	Sim	Sim
Cálculo de distribuição de luz e luminância	Sim	Sim	Sim
Aceita fotometria	Sim	Sim	Sim

Tabela 2 – Comparação entre as ferramentas luminotécnicas (cont.)

Característica	Dialux	AGI32	Relux
Integração com normas regionais	Sim	Sim	Sim
Permite gestão nos parques	Não	Não	Não
É Open Source	Sim	Não	Não
É gratuito	Sim	Não	Sim
Plataforma	Desktop e Mobile	Desktop	Desktop

Como é possível visualizar na Tabela 2, assim como as ferramentas de gestão de parque, as três opções possuem muitas semelhanças e podem ser consideradas iguais. Funcionalidades como projeção 3D, simulação de iluminação natural e aceitação de padrões fotométricos compõem todos os ambientes. As diferenças entre estes projetos podem ser consideradas sutis, uma vez que estão mais ligadas a usabilidade, preço, disponibilização e arquitetura do *software*. Além disso, é importante frisar que nenhuma das opções mencionadas pode ser recomendada para gestão da iluminação e dos parques, uma vez que não oferecem nenhuma funcionalidade para tal. Porém, a utilização dos mesmos em conjunto com plataformas como o Cidade Inteligente e o SomaSIG no momento de planejar expansões dos parques pode ser considerada uma opção interessante aos gestores e profissionais da área.

#### 4. OPORTUNIDADES NA GESTÃO EFICIENTE DOS PARQUES DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Uma gestão eficiente do parque de iluminação pública é necessária para que a população tenha suas necessidades atendidas. A gestão tem que ser capaz de trocar lâmpadas defeituosas e com luminosidades degradadas o mais rápido possível, mantendo toda cidade bem iluminada. Lâmpadas que ficam acesas o dia todo por falhas são uma fonte de desperdício de energia elétrica. Um fator muito importante para correção de falhas é a notificação das falhas que devem ser corrigidas. Sistema de telegestão, ou sistema no qual os cidadãos possam informar ao poder público, são incentivados. A segunda forma traz uma participação ativa da população, que pode ser interessante.

Todavia, a gestão não é apenas trocar equipamentos antigos por novos. O gestor deve olhar para a cidade como algo dinâmico, com mudanças constantes. Ruas e avenidas podem ter mais movimento

hoje do que quando a sua iluminação foi projetada, requerendo um novo projeto. Podem haver vias que por algum motivo não estejam cumprindo os requisitos estabelecidos pela norma, criando a necessidade de um novo projeto.

As melhorias na iluminação pública podem ser diversas e bastantes extensas. O gestor pode implementar mudanças pontuais e gradativas, começando de onde há maior necessidade. A maior necessidade vai ser em locais mal iluminados ou mais inseguros, que devem ser investigados. Visto que uma boa iluminação traz a redução do crime noturno em até 36% (CHALFIN et al., 2019), aumentar a iluminação de locais onde ocorrem assaltos e roubos a noite é interessante.

Algumas medidas para aumentar a eficiência energética no parque de iluminação pública já foram propostas. A primeira medida é a que permeia o senso comum, ou seja, a substituição de lâmpadas convencionais por tecnologias mais atuais, destacando-se, atualmente, o uso das luminárias LEDs. Essa substituição é um método comum, que já foi aplicada no início dos anos 2000 no Brasil para substituição por lâmpadas de vapor de sódio no programa Reluz (PROCEL, 2006). Recentemente, as luminárias de LEDs passaram a ser viáveis, devido à maturidade da tecnologia. Entretanto, o investimento inicial para a substituição do parque de iluminação pública é elevado para os municípios, sendo necessários fundos de investimentos, investimentos federais, ou parceria com empresas. Existem parcerias público privadas nas quais todo o investimento inicial é por parte da empresa, e a empresa ganha a partir do percentual da economia de energia. Importante destacar que ter um sistema que faz a gestão do parque e ajude no levantamento dos custos é algo desejável.

Na análise dos principais sistemas de telegestão de parques de iluminação pública foi observado que, apesar da importante contribuição na gestão do parque, pouco é dito a respeito de funcionalidades voltadas para a gestão da eficiência energética. A seguir, são apresentadas algumas oportunidades considerando alguns aspectos chave no contexto de sistemas de gestão de parques de iluminação pública.

#### **4.1 Oportunidades em manutenção em construção de novos parques**

Atividades de manutenção são bastante relevantes para os parques de iluminação pública. Na maior parte do tempo, são mais comuns que a construção de novos parques. Os sistemas de telegestão devem disponibilizar funcionalidades que permitam o monitoramento de tempo de uso de lâmpadas e antecipação da manutenção. Antecipar a manutenção reduz a ineficiência das lâmpadas e, consequentemente, reduz os custos.

A iluminação de ruas deve seguir a NBR 5101. Vários são os

parâmetros que devem ser considerados para especificar a luminosidade da rua, e conseqüentemente os equipamentos mínimos a serem utilizados. Uma vez tendo o parque catalogado, os sistemas podem disponibilizar meios de análise de conformidades do parque frente às normas, identificando, por exemplo, pontos desnecessários ou faltantes. Isso pode ser feito a partir de entrada de dados sobre as ruas junto ao cadastro, ou ainda considerando alguma solução automatizada para análise de dados de fluxo de via para análise frequente da adequação da rua.

Os sistemas podem permitir projeto de novo parque. Salvo melhor juízo, isso é feito com tecnologias à parte (ver seção 3.3). Considerando a realidade brasileira, projetar um novo parque para uma cidade inteira não é algo trivial de ser implementado na prática. As prefeituras precisariam fazer um esforço muito grande do ponto de vista financeiro para realizar tal ação. O que quase sempre não será possível. Entretanto, pode-se considerar o projeto de parques em regiões menores da cidade ou atualização do parque. Assim, os sistemas devem permitir novos projetos pelas prefeituras, ainda que em menor escala – uma nova praça, um novo bairro – ou uma atualização de algum local. Nestes casos, é importante a definição de custos e economia ao longo do tempo, sugestão de uso de equipamentos mais eficientes, conseqüentemente sugestão de troca de lâmpadas, propondo qualquer alteração que vise o impacto em redução de consumo. Ainda considerando a realidade brasileira, os sistemas devem também fazer sugestões de intervenção prioritária. Onde mexer primeiro? E baseado em que? Abordagens com essas perspectivas podem ajudar os gestores na tomada de decisão.

#### 4.2 Oportunidades na interação com o cidadão

Conforme destacado na seção 2.5, é necessário envolver o cidadão neste processo. Ele é a ponta final de uma cadeia em que todos precisam contribuir. É o cidadão o principal cliente da iluminação das vias. Sua participação torna-se então bem relevante.

Desta forma, sistemas de gestão de parques de iluminação pública devem criar mecanismos para a participação do cidadão, usando, por exemplo, abordagens de *crowdsourcing*. Os sistemas existentes já fazem isso em certa medida, principalmente permitindo que os mesmos abram chamados para eventuais problemas nos postes.

Mas é preciso ir além, é preciso envolvê-los mais no processo. Deve-se criar mecanismos de educação do cidadão em torno da eficiência energética e seu impacto para o futuro da sociedade. Assim, o sistema precisa educar o cidadão para que ele se sinta parte do processo de economizar energia.

Outra abordagem que pode se tornar interessante é o uso de

gamificação, ou ainda bonificação. Os sistemas devem prover meios pelos quais as prefeituras possam criar políticas de bonificação de clientes por interação na plataforma. A bonificação pode ser feita em diferentes frentes, como por exemplo com desconto progressivo no IPTU.

Pode-se ainda permitir a criação de campanhas para premiar a população. Por exemplo, toda vez que reduzir a conta em relação ao mês anterior, ganha um benefício. Isso pode ser feito considerando os bairros e ruas das cidades. A política pode ser estendida também para os funcionários das prefeituras, os quais podem ser bonificados ao atingir determinadas metas.

Outra possibilidade é na direção da criação de programas de financiamento por parte da população. O grupo de uma rua, ou quarteirão, financia a atualização do parque em troca de algum benefício em longo prazo. Neste caso, há um componente político importante. É necessário viabilizar isso como programas da cidade.

### **4.3 Uso de análise visual de dados**

A Análise Visual de Dados (AVD) destaca-se como alternativa interessante para esses sistemas. Afinal eles lidam com muitos dados e são utilizados para a tomada de decisão por parte dos gestores. Ambos os casos são foco da AVD. Algumas das oportunidades citadas vão requerer do gestor avaliar visualmente o parque e, assim, ter o suporte adequado à tomada de decisão. O sistema pode, por exemplo, fazer uso de visualização para destacar regiões da cidade com mais e menos problemas, facilitando assim a ação prioritária do município, bem como campanhas educacionais junto à população.

### **4.4 Oportunidades com uso de *hardware***

Algumas alternativas fogem unicamente do, ou não se restringem ao, uso do *software*. Há alternativas que requerem o uso de hardwares específicos acoplados aos postes e lâmpadas para melhoria na inteligência dos mesmos. Por exemplo, é comum considerar como alternativa o uso de dimerização (OŻADOWICZ; GRELA, 2017). A maioria das ruas tem um maior fluxo de pessoas ou veículos no período até às 21 horas, e menor após esse horário. Pela norma ABNT (Comitê Brasileiro de Eletricidade da ABNT, 2018), um menor fluxo nas vias implica menores requisitos de intensidade luminosa. Então, um ponto de luz pode ser dimerizável de acordo com o fluxo de pessoas no local, deixando a rua levemente mais escura na maior parte da noite, e ainda mantendo os padrões da norma.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho fez um panorama dos sistemas de gestão de parques de iluminação pública visando oportunizá-los no desenvolvimento de funcionalidades voltadas para a eficiência energética.

O tema é relevante, uma vez que a eficiência energética é cada vez mais crucial para a sociedade. Considerando que os municípios são os responsáveis pela gestão do consumo de energia na cidade, é necessário que eles realizem ações para a redução do consumo de energia. De fato, esta é uma questão para além da exigência legal: os municípios devem ser os principais interessados em cuidar de seu parque e, conseqüentemente, do seu consumo, uma vez que são os principais beneficiados ou prejudicados, e o acesso a essas informações facilita o processo de análise de possíveis melhorias.

Os municípios antes de tudo precisam conhecer seu parque de iluminação. Isso passa obviamente pelo uso de sistemas de *software*, mais especificamente os sistemas de gestão de parques de iluminação pública.

Existem diferentes soluções de *software* com esse propósito. Em geral, eles permitem às prefeituras o cadastro e acompanhamento do parque. Porém, pouco é oferecido no sentido de projetar, atualizar, e manter os parques com foco na eficiência energética. Para isso, há outros tipos de sistemas que cobrem melhor esse propósito, mas ainda desconectados da realidade dos sistemas de gestão.

Diante disso, fizemos um levantamento de oportunidades para os sistemas de gestão, incluindo oportunidades em manutenção e construção de novos parques, oportunidades na interação com o cidadão, uso de análise visual de dados e oportunidades com uso de hardware.

Apesar das direções sugeridas, este trabalho não pode ser considerado exaustivo. Os autores reconhecem que há espaço para identificação de novas oportunidades aqui não mencionadas. Além disso, este trabalho limita-se a dizer o que pode ser feito, sem apresentar caminhos de como fazer.

Como trabalhos futuros, pretende-se fazer uma análise de dados de um parque em específico, para investigar padrões nesses tipos de dados. Além disso, pretendemos investir no desenvolvimento de algumas dessas oportunidades, uma vez que as consideramos importantes para os sistemas de gestão de iluminação pública com foco na eficiência energética e, por conseguinte, para a sociedade.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Projeto número

300035/2021-7) e pelo Polo de Inovação Salvador/PRPGI - IFBA (Edital 01/2021).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALZUBAIDI, S.; SOORI, P. K. Study on energy efficient street lighting system design. In: IEEE. 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia. [S.l.], 2012. p. 291–295.

ANEEL. Resolução normativa nº 414. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:< <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>> Acesso em 26 de out. de 2021.

ANEEL. Resolução normativa nº 888. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em:< <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020888.pdf> >. Acesso em 22 de nov. de 2021.

ANNUNZIATA, E.; RIZZI, F.; FREY, M. Enhancing energy efficiency in public buildings: The role of local energy audit programmes. *Energy Policy*, v. 69, p. 364–373, 2014. ISSN 0301-4215. Disponível em:< <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421514001165> >. Acesso em 3 de dez. de 2021.

BATISTA, V. V.; LEITE, Y. S. Redução do consumo de energia elétrica ao utilizar poliestireno expandido como isolante térmico em vedações verticais. *Construção seca: Um estudo comparativo com a construção convencional*. Minas Gerais: Poisson, p. 14–22, 2021.

BENTES, F. M. et al. Reaproveitamento da Água gerada do ar condicionado para atividades comerciais em restaurante. *Revista Augustus*, v. 24, n. 48, p. 134–145, 2019.

BRASIL, Constituição(1988) Emenda constitucional nº 39, de 19 de dezembro de 2002. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/emendas/emc/emc39.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc39.htm).> Acesso em 21 de maio de 2022.

CHALFIN, A. et al. Reducing Crime Through Environmental Design: Evidence from a Randomized Experiment of Street Lighting in New York City. [S.l.], 2019. (Working Paper Series, 25798). Disponível em:< <http://www.nber.org/papers/w25798> >. Acesso em 24 de jan. de 2022.

CHUNG, W.; ZHOU, G.; YEUNG, I. M. A study of energy efficiency of transport sector in china from 2003 to 2009. *Applied energy*, Elsevier, v. 112, p. 1066–1077, 2013.

COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE DA ABNT. Iluminação pública – Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

COMMISSION, C. from T.; COMMISSION, C. from the et al. Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Brussels, v. 3, 2010.

COMPETENCE. Energy Efficiency in Streetlighting and Transport Infrastructure. 2005. Disponível em <[https://www.eltis.org/sites/default/files/Competence\\_reference\\_material\\_urbandesign\\_en\\_6.pdf](https://www.eltis.org/sites/default/files/Competence_reference_material_urbandesign_en_6.pdf),> Acesso em 28 de out. de 2021.

CRÍZEL, L. Software para projeto de iluminação: saiba escolher o melhor para seu planejamento. 2019. Disponível em:< <https://blog.ipog.edu.br/engenharia-e-arquitetura/software-para-projeto-de-iluminacao/>>. Acesso em 19 de fev. de 2022.

DANILINA, E. I. et al. Increase of effectiveness of economy management in municipalities (through the example of energy conservation). International Review of Management and Marketing, EconJournals, v. 6, n. 5S, 2016.

DOMINGUES, J. M.; PECORELLI-PERES, L. A. Electric vehicles, energy efficiency, taxes, and public policy in brazil. Law & Bus. Rev. Am., HeinOnline, v. 19, p. 55, 2013.

EMPRESA DE ENERGIA ELÉTRICA, Anuário estatístico de Energia Elétrica. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em 15 de jun. de 2022

ENERGIEWENDE, A. A energiewende em resumo. 10 perguntas e respostas sobre a transição energética alemã. 2019. Disponível em: < [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Energiewende\\_Brasilien/156\\_A-Energiewende-em-resumo\\_PT\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Energiewende_Brasilien/156_A-Energiewende-em-resumo_PT_WEB.pdf)>. Acesso em 6 de mar. de 2022.

EXATI. Gestão de iluminação pública - mais luz, segurança e tecnologia. 2021. Disponível em: < <https://exati.com.br/iluminacao-publica/>>. Acesso em 15 de fev. de 2022.

FACILITA.TECH. Sistema de informação pública. 2022. Disponível em: < <https://sipub.facilita.tech/>>. Acesso em 17 de fev. de 2022.

FARAND, C. Denmark to phase out oil and gas production by 2050 in “watershed” decision. 2020. Disponível em: < <https://www.climatechange.com/2020/12/04/denmark-phase-oil-gas-production-2050-watershed-decision/>>. Acesso em 13 de set. de 2022.

FASTSOFT. Softluz - é um sistema de gestão para iluminação pública. 2016. Disponível em: < <https://www.softluz.com.br/>>. Acesso em 19 de fev. de 2022.

FIASCHI, D.; BANDINELLI, R.; CONTI, S. A case study for energy issues of public buildings and utilities in a small municipality: Investigation of possible improvements and integration with renewables. *Applied Energy*, v. 97, p. 101–114, 2012. ISSN 0306-2619. *Energy Solutions for a Sustainable World - Proceedings of the Third International Conference on Applied Energy*, May 16-18, 2011 - Perugia, Italy. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912002012> >. Acesso em 4 de dez. de 2021.

GIFE, Grupo de F. e. E. de. Crise hídrica: Brasil já perdeu um nordeste e meio de água. 2021. Disponível em: < <https://gife.org.br/crise-hidrica-brasil-ja-perdeu-um-nordeste-e-meio-de-agua/> >. Acesso em 22 de nov. de 2021.

GREEN, S. Telegestão da iluminação pública. 2022. Disponível em: < <https://smartgreen.net/solucoes/telegestao-de-iluminacao-publica/> >. Acesso em 16 de fev. de 2022.

GUGLIELMINETTI, R. Contrato milionário da concessão de Iluminação Pública de Campinas sai em 30 dias. 2022. Disponível em: <<https://blogdarose.band.uol.com.br/contrato-milionario-da-concessao-de-iluminacao-publica-de-campinas-sai-em-30-dias/>>. Acesso em 19 de set. de 2022

HARVEY, L. D. Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples. *Energy Efficiency*, Springer, v. 2, n. 2, p. 139–163, 2009.

IBGE. Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação. 2021. Disponível em:< <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html> >. Acesso em 14 de mar. de 2022.

JAFFE, A. B.; STAVINS, R. N. The energy-efficiency gap what does it mean? *Energy policy*, Elsevier, v. 22, n. 10, p. 804–810, 1994.

JIANG, Q. et al. Promoting the polluters? the competing objectives of energy efficiency, pollutant emissions, and economic performance in chinese municipalities. *Energy Research Social Science*, v. 61, p. 101365, 2020. ISSN 2214-6296. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629619304025> >. Acesso em 1 de dez. de 2021.

KDL. Telegestão e automação de iluminação pública. 2021. Disponível em: < <https://www.kdliluminacao.com.br/produtos/sistema-de-telegestao/> >. Acesso em 16 de fev. de 2022.

KOSHAL, R. K.; KOOL, K. L. Energy efficiency in the transport sector. *International Journal of Energy Research*, Wiley Online Library, v. 2, n. 4, p. 337–341, 1978.

LANCELE, L. Softwares para projetos de iluminação. 2018. Disponível em: < <https://www.lumearquitetura.com.br/lume/default.aspx?m-n=947&c=2034&s=0&friendly=softwares-para-projetos-de-iluminacao> >. Acesso em 19 de fev. de 2022.

LAPONCHE, B. et al. Energy efficiency for a sustainable world. International Conseil Energie, 1997.

LI, F. et al. Leds: A promising energy-saving light source for road lighting. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. [S.l.: s.n.], p. 1–3, 2009.

LIPSCY, P. Y.; SCHIPPER, L. Energy efficiency in the japanese transport sector. Energy Policy, Elsevier, v. 56, p. 248–258, 2013.

LUNG, R. B.; MASANET, E.; MCKANE, A. The role of emerging technologies in improving energy efficiency: Examples from the food processing industry. 2006.

MARCUCCI, E.; VALERI, E.; STATHOPOULOS, A. Energy efficiency in transport sector: policy evolution in some European countries. [S.l.], 2012.

MERCANTIL, A. Iluminação pública inteligente garante economia de até 30% na capital do paraná. 2021.

MILÉSKI, J. Prefeitura espera gastar r\$ 5,4 milhões com energia elétrica por ano. 2019. Disponível em: < <https://www.gcnoticias.com.br/geral/prefeitura-espera-gastar-r-5-4-milhoes-com-energia-eletrica-por-ano/72252440> >. Acesso em 10 de mar. De 2022.

MINISTROS, P. do Conselho de. Ministério do ambiente, ordenamento do território e energia. Portaria N. ESEUR. Diário da república, 1a série, Portugal, 2015.

MME. Procel - programa nacional de conservação de energia elétrica. p. 1–11, 1985.

MME. Plano nacional de energia 2030. p. 1–205, 2007.

MULTISIG. Sistema de informações geográficas voltado para iluminação pública. 2022. Disponível em: < <https://iluminacaopublica.multisig.com.br/> >. Acesso em 19 de fev. de 2022.

ONEE, Olimpíada nacional de eficiência energética. 2021. Disponível em:< <https://onee.org.br/olimpiada> >. Acesso em 22 de nov. de 2021

OŹADOWICZ, A.; GRELA, J. Energy saving in the street lighting control system—a new approach based on the en-15232 standard. Energy Efficiency, Springer, v. 10, n. 3, p. 563–576, 2017.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy policy*, Elsevier, v. 24, n. 5, p. 377–390, 1996.

POVO, C. do. Prefeitura de santa rosa vai reduzir custos com a implementação de usina solar. 2022. Disponível em: < <https://www.correiodopovo.com.br/correio-mais-interior/prefeitura-de-santa-rosa-vai-reduzir-custos-com-a-implementacao-de-usina-solar-1.777067> >. Acesso em 10 de mar. De 2022.

PROCEL. Disponível em: < <http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMID6C524BD8642240ECAD7DEF8CD7A8C-0D9PTBRIE.htm> >. Acesso em 24 de jan. de 2022.

PROUZEAU, A. et al. Visual analytics for energy monitoring in the context of building management. In: *International Symposium on Big Data Visual and Immersive Analytics (BDVA)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–9.

RECIFE, P. do. Prefeitura do recife lança edital para contratar estudos que vão desenvolver ppp para geração de energia fotovoltaica. 2022. Disponível em: < <http://www2.recife.pe.gov.br/noticias/20/01/2022/prefeitura-do-recife-lanca-edital-para-contratar-estudos-que-vaio-desenvolver-ppp> >. Acesso em 10 de mar. de 2022

REZESSY, S. et al. Municipalities and energy efficiency in countries in transition: Review of factors that determine municipal involvement in the markets for energy services and energy efficient equipment, or how to augment the role of municipalities as market players. *Energy Policy*, Elsevier, v. 34, n. 2, p. 223–237, 2006.

ROCHA, H. et al. Exterior lighting computer-automated design based on multi-criteria parallel evolutionary algorithm: optimized designs for illumination quality and energy efficiency. *Expert Systems with Applications*, v. 45, p. 208–222, 2016. ISSN 0957-4174. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417415006752> >. Acesso em 14 de fev. de 2022

SHINTABELLA, R.; ABDULLAH, A. G.; HAKIM, D. Application of genetic algorithm in optimizing redesign of street lighting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1098, p. 042036, 03 2021. Acesso em 14 de fev. de 2022

SOMA, I. Somasig – gestão iluminação pública. 2016. Disponível em: < <http://institutosoma.org.br/areas-de-atuacao/geoprocessamento/somasig-gestao-iluminacao-publica> >. Acesso em 16 de fev. de 2022

SPUR, M.; HOUEL, N.; TOURRE, V. Visualizing multilayered geospatial data in virtual reality to assess public lighting. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 43, p. 623–630, 2020.

## DECOMPOSIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL NOS ESTADOS BRASILEIROS

Marlon Salazar<sup>1</sup>  
Luís Felipe Ceranto Ribeiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São João Del-Rei

DOI: 10.47168/rbe.v28i3.708

### RESUMO

O consumo de energia elétrica é um dos principais indicadores de desenvolvimento e bem-estar de uma população, logo, as variáveis que determinam este consumo são de grande importância. Este trabalho tem como objetivo decompor o consumo de energia elétrica residencial entre os estados brasileiros, além disso, buscar-se-á verificar o impacto da epidemia de Coronavírus sobre o consumo de energia residencial. Para tanto, utiliza-se a metodologia de decomposição de índices, conhecida como *Index Decomposition Analysis* (IDA), cujo objetivo é decompor o consumo de energia elétrica residencial em três efeitos, são eles: Efeito Intensidade, Efeito População e Efeito Regional. Os resultados obtidos denotam que o Efeito Intensidade, ou seja, variação do consumo de energia elétrica mediante a variação do consumo per capita, apresentou a maior influência sobre o consumo de energia, além disso, para apenas dois estados, este efeito não foi o mais importante. Já com relação ao impacto da pandemia de Coronavírus, não foi possível determinar a influência desta sobre o consumo, haja vista que apenas o ano de 2020 foi analisado, contudo, o ano de 2020 apresentou o maior aumento (variação) do consumo de energia desde 2015, mesmo apresentando alta expressiva do desemprego e redução da renda do trabalho.

Palavras-chave: Consumo de Energia Elétrica; IDA; Pandemia de Coronavírus.

### ABSTRACT

The consumption of electric energy is one of the main indicators of development and well-being of the population, therefore, the variables that determine this consumption are of great importance. This work aims to decompose residential electricity consumption among Brazilian states, in addition, it will seek to verify the impact of the Coronavirus

epidemic on the residential energy consumption. For this purpose, the index decomposition methodology, known as Index Decomposition Analysis (IDA), is used, whose objective is to decompose residential electricity consumption into three effects, namely: Intensity Effect, Population Effect and Regional Effect. The results obtained show that the Intensity Effect, that is, the variation of electricity consumption through the variation of per capita consumption, had the greatest influence on energy consumption, in addition, for only two states, this effect was not the most important. Regarding the impact of the Coronavirus pandemic, it was not possible to determine its influence on consumption, given that only the year 2020 was analyzed, however, the year 2020 presented the largest increase (variation) in energy consumption since 2015, even though this year showed a significant increase in unemployment and a reduction in labor income.

Keywords: Electricity Consumption; IDA; Coronavirus Pandemic.

## **1. INTRODUÇÃO**

Há uma ampla gama de fontes de energia, mas uma das mais conhecidas e importantes é a elétrica. A energia elétrica é gerada por diferentes fontes, sendo que no Brasil a hidroelétrica representa a maior participação entre todas, obtendo 65,2% do total gerado, em dados referentes a 2020, contudo, outras fontes geradoras apresentam participação considerável - gás natural, eólica e biomassa - obtendo participações de 8,3%, 8,8% e 9,1%, respectivamente (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). No Brasil a geração de energia elétrica origina-se principalmente de fontes renováveis, diferente do que é observado no mundo e em países pertencentes à Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico (OCDE), em que essa participação desfrutou de uma queda do patamar de 88% em 2011 para 75,6% de participação em 2015; entretanto nos últimos anos observa-se um aumento, que alcançou uma participação de 83% em 2019 e 84,8% em 2020 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). A energia é um dos fatores essenciais para um bom funcionamento da economia devido ao seu consumo recorrente e indispensável por diversos setores, como, por exemplo, industrial, transportes, comercial e residencial (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Devido a isso, indicadores de desenvolvimento econômico e social que levem em conta a energia tenderam a ser cada vez mais utilizados nas últimas décadas, proporcionando diversas interpretações e explicações ao uso das energias.

Além de se observar a estrutura da geração de energia elétrica

é válido direcionar a atenção ao seu consumo. O consumo é feito em sua grande maioria pelos setores industrial, residencial e comercial, e o setor industrial detém 36,6% de participação, sendo essa a maior; já o setores residencial e comercial detêm 27,6% e 15,7%, respectivamente (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Como o foco deste trabalho é o setor residencial, é válido conhecer a estrutura de consumo referente à participação originária de cada fonte energética, tendo a possibilidade de focar em alguma de maior relevância. Sendo assim, necessita-se recorrer ao Balanço Energético Nacional (BEN) de 2021, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), para tal conhecimento. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2021) em 2020 as principais fontes originárias do consumo de energia residencial foram a eletricidade (46,4%), a lenha (26,1%) e o GLP (24,4%), sendo importante destacar um aumento na participação de energia elétrica de 3,5% com relação a 2019, causado por um aumento na demanda por climatização (EPE, 2020).

Diversos estudos têm buscado compreender o consumo de energia residencial, como destacam Xu e Ang (2014), sendo utilizadas uma diversidade de variáveis para decompor o consumo de energia residencial. Haas (1997) delimitou as variáveis que podem determinar o consumo de energia elétrica residencial, sendo elas: demografia, fatores econômicos, fatores locais, estilo de vida, cultura, estrutura residencial e estoque de eletrodomésticos, clima e política. Dado o número de variáveis, a disponibilidade dos dados assume papel importante. No exterior, trabalhos que analisam a variação do consumo de energia residencial são numerosos e, além disso, em muitos países há disponibilidade de dados relativos ao uso final de energia nos domicílios, tais como: (ANDREOU et al., 2020; CHUNG, KAM e IP (2011); HUANG (2020); NIE e KEMP (2014); TSEMEKIDI TZEIRANAKI et al. (2019); XU e ANG (2014)). Nesses trabalhos os autores analisaram o uso de energia para os mais diversos fins e o impacto de fatores determinantes, sejam eles, climatização, iluminação, comportamento e renda dos residentes, entre outros. Contudo, no Brasil, devido à falta de disponibilidade de dados, os estudos se concentram apenas no número de domicílios e classes de consumo para explicar o comportamento do consumo de energia. Para o Brasil, destaca-se o trabalho de Achão e Schaeffer (2009), que decompueram o consumo de energia elétrica residencial para as cinco grandes regiões do país, entre 1980 a 2007. Além disso, os autores diferenciaram a análise de acordo com as classes de consumo. Abrahão e Souza (2021) também decompueram o consumo de energia elétrica residencial do Brasil entre 2000 e 2018, entre as cinco grandes regiões, acrescentando à análise três especificações de modelos, diferenciando as variáveis incluídas nas decomposições.

Todavia, nos trabalhos anteriormente citados a decomposição é feita para grandes regiões do país, ou seja, não captam informações a nível estadual. Portanto, este trabalho tem como contribuição a decomposição do consumo de energia elétrica a nível estadual, entre 1991 a 2020, e mais, dada a epidemia de Coronavírus, será analisado o impacto da pandemia sobre o consumo de energia elétrica, especificamente no ano de 2020. Logo, o objetivo principal deste trabalho é decompor o consumo residencial de eletricidade do Brasil, levando em consideração dados de consumo e população por estado, no período de 30 anos. Além disso, buscar-se-á analisar inicialmente o impacto da pandemia de Coronavírus sobre o consumo residencial de energia elétrica no ano de 2020. Para tanto, o método utilizado aplica o índice de Divisia, conhecido como *Log-Mean Divisia Index Method I* (LMDI I), proposto por Ang et al. (1998), que satisfaz as principais propriedades desejáveis de um número índice e, além disso, não deixa resíduos na decomposição.

## **2. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Diversos estudos buscaram compreender o consumo de energia elétrica nas residências. Destacam-se, porém, trabalho que objetivaram decompor ou mesmo prever o consumo de acordo com o número de unidades consumidoras e/ou a intensidade de consumo decorrente do aumento de equipamento. Leon et al. (2005) propuseram analisar a dinâmica da evolução do consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro, englobando o começo dos anos 1980 até o ano de 2003; para tanto, utilizaram a decomposição de números índice, em que o efeito intensidade é dado pelo consumo médio das unidades consumidoras, o efeito estrutura (migração) é dado pela variação das unidades consumidoras que ocorre entre as faixas de consumo, e o efeito atividade é dado pelo número de unidades consumidoras da classe residencial. Os efeitos foram desagregados em regiões geográficas e por faixa de consumo, e para quantificar os efeitos utilizou-se o índice LMDI I. Para os períodos de análise vale notar que o efeito atividade contribuiu positivamente para o crescimento do consumo de energia elétrica em todos os períodos, representando um aumento da base de mercado que se deve ao aumento do número de domicílios e investimentos direcionados à taxa de atendimento. Já entre os outros dois efeitos, esses mostraram valores diversos ao longo do tempo, tendo que destacar que após o ano de 1994 houve o encerramento do período de altas taxas de inflação, permitindo reduzir a defasagem nas tarifas, levando a mesma a ser um componente estrutural para o consumo, ou seja, para níveis de rendimentos mais baixos o consumo

do domicílio teve que se adequar com o rendimento familiar.

Em estudo de previsão do consumo médio de energia elétrica para as residências da região sudeste, Bosignoli et al. (2008) desenvolveram uma metodologia que, por meio da estimação do consumo por unidade consumidora e por faixa de rendimento domiciliar para a série histórica, e pela projeção do índice de difusão de eletrodomésticos para cada faixa, conseguiram realizar a projeção do consumo médio. Foi considerado que o consumo total de energia elétrica das unidades consumidoras residenciais é explicado por meio do produto do consumo médio das unidades consumidoras e o total das unidades consumidoras, mas vale lembrar que o enfoque desse estudo foi estimar e projetar o consumo médio. Com o consumo médio relacionado com a evolução do rendimento das famílias, a evolução dos rendimentos em cada faixa, por sua vez, se relaciona com o estoque de eletrodomésticos nos domicílios de diferentes rendas e a maneira como são utilizados; a densidade domiciliar e as tarifas também são parâmetros determinantes.

Os dados utilizados para o período histórico das diferentes variáveis, que afetam o consumo médio, foram coletados do ano 1992 até 2005, e a projeção foi realizada para o ano 2006 até 2016. Com isso os autores realizaram a estimativa e a projeção de participação dos domicílios, difusão de eletrodomésticos e rendimento médio, por faixa de rendimento, possibilitando obter a projeção do consumo médio. Os resultados obtidos foram um crescimento do consumo médio de 1,4% a.a., durante o período de 10 anos de projeção, sendo que o crescimento do rendimento médio domiciliar no período foi um pouco inferior, de 1,3% a.a. Nota-se que a grande difusão de eletrodomésticos que se obteve não se mostrou de grande efeito no consumo médio, podendo este ser resultado do efeito conservação de energia, ou seja, novos eletrodomésticos são mais eficientes e há mudanças de hábitos de consumo com tendência a diminuir gastos desnecessários (BOSIGNOLI et al., 2008).

Por sua via, Achão (2009) decompôs a variação do consumo de energia elétrica residencial para o Brasil. A primeira proposta da autora apresenta o efeito estrutura como sendo o efeito que explica uma parte da variação do consumo residencial por meio da variação da participação do número de consumidores em cada região geográfica do país, e a segunda explora a variação da participação do número de consumidores de baixa renda e convencionais. Assim, o método de decomposição IDA foi realizado por meio dos efeitos: atividade (quantidade de consumidores), intensidade (consumo médio por residência), e estrutura (primeira análise no âmbito regional e a segunda por categoria de consumo). Na primeira análise a autora destaca que os efeitos mais importantes para o consumo de energia elétrica residencial foram

o efeito atividade e o efeito intensidade, ou seja, variação do número de domicílios e do consumo específico dos domicílios. O efeito intensidade é muito influenciado pela renda, acesso ao crédito, taxas de inflação e tarifas de energia elétrica, e o efeito estrutura pela importância das políticas governamentais de transferência de renda e de universalização do acesso à energia elétrica (ACHÃO, 2009). Na segunda análise a autora constatou que os efeitos atividade e intensidade continuaram sendo os mais importantes, mas o efeito estrutura tem destaque logo após o racionamento, pois houve alterações nos critérios de enquadramento e, também, aumento no número de consumidores de baixa renda nos programas de universalização e transferência de renda, contribuindo para maior utilização de energia.

Por outro lado, Leon e Pessanha (2011) realizaram projeção do consumo de energia elétrica na classe residencial com diferentes cenários de conservação de energia por faixa de rendimento domiciliar, com o consumo de energia das residências sendo expressado pelo produto das variáveis: total de domicílios, taxa de atendimento desses domicílios, e o consumo médio por unidade consumidora; sendo necessário realizar a projeção dessas variáveis para se ter a projeção da energia elétrica residencial. Os componentes que foram determinados pelos autores para o consumo por unidade consumidora são: estoque de eletrodomésticos, hábitos de consumo, rendimento médio domiciliar em relação ao preço da energia elétrica e distribuição dos rendimentos familiares. Utilizou-se o período 1995 até 2008 para se ter uma base de dados para a projeção, sendo a projeção realizada até o ano de 2019. Os cenários possuem dois aspectos, o sem conservação e com conservação, no primeiro o consumo médio por faixa de rendimento domiciliar evolui com a difusão dos eletrodomésticos, sem limitação crescimento, e já no segundo há limitações para cada faixa de rendimento (LEON e PESSANHA, 2011). São considerados aspectos de conservação de energia que contribuem para redução do consumo médio, sendo eles o componente tecnológico (mudança para eletrodomésticos mais eficientes) e a mudança de hábitos e consumo. Os resultados do trabalho mostraram que o consumo total tem taxas maiores em todos os possíveis cenários da projeção, e o mesmo ocorre para o consumo médio por unidade consumidora. Entretanto, as taxas de crescimento do consumo total são maiores se comparadas com o do consumo médio, e essa diferença mostra que o aumento do consumo foi causado, principalmente, pelo aumento de ligações de novos consumidores (LEON e PESSANHA, 2011).

Utilizando diferentes efeitos para compor o índice de consumo de energia, Andrade e Pinheiro (2014) apresentam uma avaliação quanto as variações do consumo e projeções de consumo da energia elétrica residencial no Brasil, pela técnica de cálculo da variação da

decomposição, *Logarithmic Mean Divisia Index* (LMDI), nos anos de 2005 e 2010, para o consumo histórico, e 2015 e 2020, para as projeções. Os efeitos considerados foram: atividade (quantidade de domicílios), estrutura (a porcentagem de domicílios em um dado estrato de renda), intensidade (consumo de energia de um dado serviço, por equipamento), e posse (estoque de um dado equipamento por domicílio consumidor). Os resultados obtidos da decomposição mostraram que o efeito atividade foi e será responsável por 57% da variação de consumo no período, ou seja, o aumento do consumo será causado principalmente pelo crescimento do número de domicílios que têm acesso à energia elétrica. O autor deixou em destaque o efeito estrutura, que resultará na redução no consumo no período, causado pela redução do número de famílias que possuem renda até três salários-mínimos, porém, com o aumento do número de famílias com renda maior que sete salários-mínimos, aumentará o consumo, resultando em um efeito estrutura líquido total positivo. Há redução do consumo por motivos como substituição de tecnologia e melhoria de eficiência, e o aumento do consumo por aquisição de equipamentos mais potentes e mudança de hábitos de uso (ANDRADE e PINHEIRO, 2014).

De uma perspectiva com enfoque principalmente demográfico, o artigo de Givisiez et al. (2019) discorrem acerca do crescimento do consumo de energia elétrica por meio das projeções de domicílios por categoria de renda e tamanho, e dessas projeções projetam o consumo de energia elétrica residencial no Brasil no período 2010 a 2040. Pode-se observar uma tendência de maior crescimento da demanda habitacional em relação ao crescimento da população, e isso indica uma diminuição do tamanho dos domicílios. A respeito das classes de renda às quais os domicílios pertencem, relatou-se redução em faixas de renda baixas e aumento nas intermediárias e altas (GIVISIEZ et al., 2019).

Com essas informações, e outras mais, os autores constataram que o consumo de energia varia positivamente quanto maior é a faixa de renda a qual o domicílio pertence, e quanto maior o tamanho do domicílio. No artigo há duas projeções de energia, uma com o “produto entre o número de domicílios em cada categoria de tamanho e o consumo médio de energia das mesmas categorias” (GIVISIEZ et al., 2019), e a outra seguido a mesma lógica só que para a divisão de domicílios pelas faixas de renda. Nessa última projeção verificou-se que há uma grande diferença do consumo de energia entre as faixas de baixa renda e as demais, e desse modo as projeções baseadas no consumo médio per capita tendem a ser superestimadas. Já a projeção do consumo baseada em domicílios apresentou uma tendência de maior consumo nas faixas de domicílios menos densas, e um menor crescimento, e até redução, para os domicílios mais densos. Compa-

rando a projeção do consumo por faixa de renda das estimativas com o consumo observado, entre 2010 e 2016, constatou-se que o modelo de projeção subestimou a estimativa, contudo, comparando com a projeção do consumo por tamanho de domicílio, percebe-se uma maior aderência entre os valores, evidenciando-se, assim, a baixa elasticidade renda que o trabalho discorre acerca do consumo de energia. Isso mostra que a formação de domicílios e a densidade domiciliar são determinantes da demanda de energia mais significativas que a renda (GIVISIEZ et al., 2019).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Método de decomposição

Os métodos de decomposição populares entre os analistas de consumo energia e intensidade energética podem ser divididos em dois grupos: os métodos relacionados com o índice de Laspeyres e métodos relacionados com o índice de Divisia. Bem conhecido em estudos econômicos, o índice de Laspeyres mede a variação percentual em algum aspecto de um grupo de itens ao longo do tempo, usando pesos baseados nos valores de alguns anos base. O índice Divisia é uma soma ponderada das taxas de crescimento logarítmico, onde os pesos são partes dos componentes do valor total, dado na forma de uma linha integral.

Em termos simples, a construção de métodos ligados ao índice de Laspeyres é baseada no conceito familiar de variação percentual, enquanto a construção de métodos relacionados com o índice de Divisia é baseado no conceito de mudança logarítmica (ANG, 2004). Ang e Zhang (2000) propuseram a aplicação do índice de Divisia na metodologia de *Index Decomposition Analysis* (IDA), de modo que a decomposição do consumo de energia pode ser denotada como:

$$\text{Efeito Atividade: } \Delta E_{act} = \sum_i w_i \ln \left( \frac{Q^T}{Q^0} \right) \quad (1)$$

$$\text{Efeito Estrutura: } \Delta E_{str} = \sum_i w_i \ln \left( \frac{S^T}{S^0} \right) \quad (2)$$

$$\text{Efeito Intensidade: } \Delta E_{int} = \sum_i w_i \ln \left( \frac{I^T}{I^0} \right) \quad (3)$$

Peso Média Logarítmica: 
$$w_i = \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \tag{4}$$

O método de decomposição por média logarítmica aditiva satisfaz as principais propriedades desejáveis de índices de preços: reversão no tempo, circularidade e reversão de fatores. Os métodos que passam no teste de reversão de fatores não deixam resíduo, que tenderia a complicar a interpretação dos resultados. Em alguns casos a decomposição aditiva pode ser preferível à decomposição multiplicativa, ou vice-versa, pois os resultados podem ser mais facilmente compreendidos e comunicados e, como tais métodos que dão uma associação direta entre a decomposição aditiva e multiplicativa, também pode levar à facilidade de interpretação dos resultados. Para mais detalhes a respeito da associação entre decomposição aditiva e multiplicativa pode ser consultado Choi e Ang (2003).

O presente trabalho aplica a metodologia ao conceito de consumo regional e não entre estruturas, de modo que é necessário modificar as fórmulas de cálculo na decomposição.

$$E = \sum E_i = \sum P \times \frac{P_i}{P} \times \frac{E_i}{P_i} = \sum P \times R_i \times I_i \tag{5}$$

$$\Delta E_i = \Delta E_{pop} + \Delta E_{reg} + \Delta E_{int} \tag{6}$$

Efeito População: 
$$\Delta E_{pop} = \sum_i w_i \ln \left( \frac{P^T}{P^0} \right) \tag{7}$$

Efeito Regional: 
$$\Delta E_{reg} = \sum_i w_i \ln \left( \frac{R^T}{R^0} \right) \tag{8}$$

Efeito Intensidade: 
$$\Delta E_{int} = \sum_i w_i \ln \left( \frac{I^T}{I^0} \right) \tag{9}$$

Peso Média Logarítmica: 
$$w_i = \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \tag{10}$$

O Efeito População é definido como variação do consumo residencial de energia elétrica devido à variação da população de cada estado brasileiro. Já o Efeito Regional é definido como a variação do consumo residencial devido a variação da participação de cada estado com relação à variação da população total, ou seja, estados que perdem participação relativa no total da população apresentam Efeito Regional negativo. Por fim, o Efeito Intensidade é caracterizado como a variação do consumo decorrente a variação do consumo de energia per capita.

### **3.2 Fonte de dados**

Os dados referentes ao consumo de energia elétrica foram obtidos junto ao Balanço Energético Nacional (BEN), publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), ligada ao Ministério de Minas e Energia. Este trabalho utilizou dados referentes ao período de 1991 à 2020.

Os dados estaduais da população foram obtidos junto o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), lembrando que a contagem populacional é feita pelo Censo, uma vez a cada 10 anos, em média; dessa forma, para os anos intermediários é feita uma estimativa pelo próprio IBGE, utilizando parâmetros obtidos pelo Censo e por outras pesquisas.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Na presente seção são apresentados os resultados obtidos para os efeitos população, regional e intensidade da variação do consumo de energia elétrica residencial, por meio da aplicação do método *Index Decomposition Analysis* (IDA), sendo os valores dos efeitos obtidos por meio do *Logarithmic Mean Divisia Method I* (LMDI I) no *Index Decomposition Analysis* (IDA). Pretende-se buscar explicações sobre os efeitos que mais contribuíram com a variação do consumo, possibilitando maior compreensão sobre o crescimento do consumo de energia elétrica nas residências, ampliando a discussão sobre o assunto e instigando demais trabalhos.

### **4.1 Decomposição do consumo de energia elétrica residencial**

A Figura 1 apresenta a decomposição do consumo de energia elétrica residencial entre 1991 a 2020; constata-se que o efeito intensidade apresentou os maiores impactos sobre o consumo de energia residencial. Entretanto, é bom apontar que não significa que os demais

efeitos não tenham importância; para exemplificar, pode-se mencionar o caso do efeito regional, o qual possui valores baixos, contudo pode indicar características da população quanto ao movimento e crescimento da população entre os estados do país. Achão (2009) denota que alterações pequenas em efeitos que considerem a estrutura regional do país podem mostrar grande relevância se consideradas as causas e consequências. Por exemplo, nos anos 2007 a 2009 o efeito regional foi negativo, indicando que estados que possuem um consumo de energia abaixo da média nacional cresceram em importância, podendo refletir tanto movimentos migratórios para esses estados, como um aumento da população, comparando com os demais estados.



Figura 1 – Resultados da decomposição do consumo de energia elétrica residencial; variações em GWh

Continuando com a Figura 1, o primeiro período, 1992 a 1994, apresenta efeito intensidade positivo, entretanto a sua variação não foi significativa. Para entender como o período em questão atingiu essa variação positiva na intensidade é preciso lembrar dos planos econômicos que visavam controlar a inflação; normalmente os planos que precederam o Plano Real melhoravam, inicialmente, a renda e o crédito das famílias, que conseguiam adquirir eletrodomésticos, pois a correção das tarifas possuía defasagem considerável em comparação à inflação e ao crescimento das rendas domiciliares, que também eram defasados (LEON et al., 2005). Pode-se concluir que o efeito intensidade positivo ocorreu pelo uso dos eletrodomésticos, adquiridos anteriormente.

No período 1995 a 1997 observa-se a enorme variação no consumo causado pelo efeito intensidade, e o crescimento exacerbado

nesse período ocorreu devido a implementação do Plano Real, em 1994, que causou mudanças significativas na economia como um todo, inclusive no consumo de energia. O Plano Real conseguiu conter o processo inflacionário em que o país se encontrava há anos, permitindo, assim, melhora no nível de renda da população e facilidade ao acesso a financiamentos e transferências de renda, possibilitando, subsequentemente, um aumento na aquisição de aparelhos elétricos, resultando no aumento no consumo médio de energia elétrica residencial (ACHÃO, 2009; SILVA, 2001).

De 1998 a 2000 houve variação positiva no consumo atrelado ao efeito intensidade, contudo menor que o período que o precede. Isso foi resultado de fatores derivados do Plano Real, que contribuíram positivamente ao consumo médio, enquanto houve fatores, como aumento de tarifas, que contribuíram de forma negativa, não deixando o crescimento ser acentuado como no período anterior. Entre os pontos que contribuíram positivamente para o consumo causado pelo efeito intensidade estão, segundo Schaeffer et al. (2003), aumento das vendas de eletrodomésticos e aumento do poder aquisitivo, causados, por sua vez, pelo aumento de crédito, redução da inflação, aumentos reais do salário-mínimo e agregação de novos consumidores ligados a rede elétrica. Entretanto, os pontos que contribuíram negativamente no efeito intensidade, não o deixando ter as mesmas proporções do período anterior, foram o aumento do desemprego, queda do rendimento médio do trabalho nas principais regiões metropolitanas do país, entre 1998 e 2001, desvalorização da moeda nacional, e aumento das tarifas residenciais (ACHÃO, 2009). A privatização de concessionárias de energia, que ocorreu no período, contribuiu com o aumento das tarifas e redução dos rendimentos familiares (PIRES et al., 2002).

No próximo período, 2001 a 2003, observa-se algo inédito em nossos resultados, pois obtém-se um efeito intensidade negativo, que não pode ser verificado nos demais anos. Esse valor negativo decorreu principalmente pela crise de energia de 2001, que intercorreu entre 1 de julho de 2001 e 19 de fevereiro de 2002. O apagão irrompeu devido à escassez de chuvas, deixando o nível dos reservatórios das hidroelétricas baixo, sendo que as hidroelétricas produzem a maior parte da energia elétrica do país; em adição, houve falha do planejamento do Governo e ausência de investimentos em geração e transmissão de energia elétrica, que resultaram racionamento em diversos setores, principalmente o residencial. O efeito negativo pode ainda ser explicado, segundo Achão (2009), pela queda dos rendimentos do trabalho, que já vinha acontecendo alguns anos antes, conjuntamente aos reajustes das tarifas residenciais.

Já no primeiro período pós-acionamento, 2004 a 2006, houve um pequeno incremento no efeito intensidade associado às decrescen-

tes tarifas de energia, a recuperação dos rendimentos familiares, favorecendo a aquisição e uso de eletrodomésticos, e inclusão de consumidores à rede elétrica (ACHÃO, 2009). Entretanto, só no ano de 2006 o consumo de energia elétrica residencial recuperou o patamar pré-acionamento, ou seja, o mesmo nível de consumo de 2000, enquanto o consumo médio apenas retomou um ano depois (IBGE, 2020; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). Entre as razões que explicam a recuperação tardia do consumo médio estão, de acordo com Achão (2009), a manutenção de hábitos de consumo adquiridos nas regiões mais afetadas pelo racionamento e o impacto indolente de programas governamentais de transferência de renda e universalização do acesso à energia elétrica, ocorrido alguns anos após o racionamento, além, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2020), da promoção de medidas de eficiência energética.

Nos períodos 2007 a 2009 e 2010 a 2012, os motivos que levaram a grandes crescimentos do consumo devido ao efeito intensidade foram os mesmos. A Empresa de Pesquisa Energética (2020) aponta que o progresso econômico das famílias, o avanço do crédito para compra de eletrodomésticos, a retração dos preços dos eletrodomésticos, as políticas governamentais de acesso a eletricidade e os programas habitacionais, além do aumento da posse de eletrodomésticos, contribuíram para o aumento observado do consumo. As políticas públicas, listadas por Abrahão e Souza (2020) e Pais (2012), foram positivas no aumento dos consumidores, como os programas Luz no Campo, Luz para Todos e Minha Casa Minha Vida. Para a contribuição do aumento da renda das famílias de baixa renda, com impacto no consumo de energia elétrica, criou-se o programa Bolsa Família. O aumento do consumo de energia ainda pode ser explicado pelo programa Tarifa Social de Energia Elétrica, o qual concedia benefícios no valor das tarifas de energia elétrica para famílias de baixa renda (ABRAHÃO e SOUZA, 2020; PAIS, 2012).

Passando para o período 2013 a 2015, observa-se que o aumento devido ao efeito intensidade foi menor, mas ainda se obteve um valor positivo considerável. Podemos atribuir o crescimento aos rendimentos médios reais metropolitanos e ao salário-mínimo real, mas não tão acentuados como no período anterior (IBGE; IPEA), a maior posse de eletrodomésticos, aos programas governamentais de habitação e renda, e crescimento de consumidores ligados a rede elétrica (ABRAHÃO e SOUZA, 2020; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020; SILVA, 2019). Mas o impacto foi menor em relação ao período anterior devido ao início do crescimento das tarifas médias de energia elétrica (ANEEL) e à queda dos rendimentos médios (IBGE 2020; IPEA, 2021), inclusive com a crise econômica que se iniciou nesse período, afetando as residências. Em adição, a Empresa de Pesquisa

Energética (2020) afirma que houve a substituição de eletrodomésticos antigos por novos, mais eficientes.

De 2016 a 2018, o penúltimo período de análise, constata-se um crescimento ínfimo no efeito intensidade. Houve estagnação da renda média real nacional (IBGE) e crescimento quase inexistente do salário-mínimo real (IPEA), que afetaram o uso e a compra de eletrodomésticos, além do crescimento das tarifas médias de energia elétrica. O consumo médio teve crescimento positivo devido aos programas governamentais já citados, e à continuidade da maior inclusão da população a rede elétrica.

No período 2019 a 2020, percebe-se que o crescimento do consumo médio devido ao efeito intensidade foi maior do que nos dois períodos anteriores. Olhando mais atentamente para os resultados de cada ano desse último período, é constatado que em 2019 o crescimento do consumo explicado pelo efeito intensidade foi um pouco maior que 3.500 GWh; entretanto, no ano de 2020 alcançou-se o aumento do consumo, explicado pelo efeito intensidade, de pouco mais de 5.000 GWh. Isso mostra como, possivelmente, o isolamento social, em consequência do surgimento do vírus COVID-19, fez as pessoas passarem um maior período nas residências utilizando mais energia elétrica, podendo denominar esse movimento como efeito pandemia.

Na Tabela 1 pode-se verificar a evolução do consumo de eletricidade residencial, e sua variação devido aos efeitos propostos por este trabalho. Entretanto, a tabela apresenta os resultados obtidos ano a ano. Destaca-se o ano de 1995, que apresentou um crescimento no consumo de 12% em relação ao ano de 1994, sendo o efeito intensidade responsável por aproximadamente 90% deste aumento.

Tabela 1 – Decomposição do consumo de energia elétrica residencial entre 1991 a 2020, por ano e efeito. Dados em GWh

Ano	Consumo de energia	Efeito População	Efeito Regional	Efeito Intensidade	Soma Efeitos	Varição Consumo
1991	51162	-	-	-	-	-
1992	51885	839,3	-40,1	-76,2	723	1,4%
1993	53620	818,8	2,9	913,3	1735	3,2%
1994	55969	773,0	-18,5	1594,5	2349	4,2%
1995	63617	808,9	-16,8	6855,9	7648	12,0%
1996	69053	528,7	162,5	4744,8	5436	7,9%
1997	74071	1159,2	20,5	3838,3	5018	6,8%
1998	79378	1027,8	15,5	4263,7	5307	6,7%
1999	81330	1064,2	13,9	873,9	1952	2,4%

Tabela 1 – Decomposição do consumo de energia elétrica residencial entre 1991 a 2020, por ano e efeito. Dados em GWh (cont.)

Ano	Consumo de energia	Efeito População	Efeito Regional	Efeito Intensidade	Soma Efeitos	Variação Consumo
2000	83613	2892,0	24,4	-633,4	2283	2,7%
2001	73621	1187,9	4,5	-11184,3	-9992	-13,6%
2002	72661	946,1	19,1	-1925,2	-960	-1,3%
2003	76144	947,4	12,7	2522,9	3483	4,6%
2004	78577	2032,7	20,3	379,9	2433	3,1%
2005	83193	1151,0	13,3	3451,9	4616	5,5%
2006	85810	1178,1	11,1	1427,8	2617	3,0%
2007	90881	-1326,0	-243,8	6641,2	5071	5,6%
2008	95585	2803,1	-14,3	1914,8	4704	4,9%
2009	101779	967,0	-15,9	5243,4	6194	6,1%
2010	107215	-396,3	8,3	5823,2	5435	5,1%
2011	111971	928,6	-16,5	3843,8	4756	4,2%
2012	117646	906,1	-14,0	4783,1	5675	4,8%
2013	124908	4376,9	36,1	2849,1	7262	5,8%
2014	132302	1105,3	4,6	6284,2	7394	5,6%
2015	131198	1087,9	9,6	-2202,0	-1104	-0,8%
2016	132895	1048,8	14,0	634,4	1697	1,3%
2017	134440	1021,2	16,3	507,5	1545	1,1%
2018	137810	512,8	250,3	2607,4	3371	2,4%
2019	142572	1106,3	30,8	3624,5	4762	3,3%
2020	148845	1151,8	31,0	5090,1	6273	4,2%

Além disso, destaca-se o ano de 2001, cujo consumo de energia elétrica residencial apresentou queda de 13,6%; mais uma vez, o efeito intensidade foi o principal responsável, visto que o efeito população e regional contribuíram para o aumento do consumo de energia. De modo geral, entre 2003 e 2014 o consumo de energia elétrica residencial cresceu de forma ininterrupta, porém, a partir de 2015, o consumo de eletricidade em residências passou a ter, em média, pequeno crescimento, sendo a recessão econômica a principal explicação.

A Tabela 2 apresenta os dados da pesquisa por estado. Destaca-se que o efeito regional negativo indica os estados que sofreram com movimentos migratórios de saída, mas o valor negativo pode remeter ao crescimento populacional não suficiente, em relação aos outros estados e ao país, impactando negativamente o consumo.

Tabela 2 – Decomposição do consumo de energia elétrica residencial entre 1991 a 2020, por estado e efeito. Dados em GWh

Estados	Consumo em 1991	Consumo em 2020	Efeitos			
			Efeito População	Efeito Regional	Efeito Intensidade	Total
Acre	89	552	85,1	97,4	281,0	463,5
Alagoas	413	1.564	288,0	-75,4	938,1	1150,7
Amazonas	642	2.263	420,2	378,1	822,9	1621,2
Amapá	72	520	102,9	192,2	153,2	448,3
Bahia	1.922	7.497	1438,4	-667,0	4804,0	5575,4
Ceará	1.015	4.906	854,4	-37,0	3073,8	3891,2
Distrito Federal	825	2.394	565,2	431,9	572,1	1569,3
Espírito Santo	837	2.661	574,4	143,0	1106,7	1824,1
Goiás	1.247	5.459	972,4	584,6	2655,0	4211,9
Maranhão	575	3.586	522,7	-10,2	2498,3	3010,8
Minas Gerais	4.717	11.854	2876,9	-540,8	4801,1	7137,2
Mato Grosso do Sul	647	2.260	409,0	121,8	1082,1	1612,9
Mato Grosso	617	3.382	524,9	279,6	1960,1	2764,6
Pará	908	3.947	678,8	365,6	1994,3	3038,7
Paraíba	462	2.199	375,1	-130,5	1492,3	1737,0
Pernambuco	1.579	5.438	1094,1	-170,7	2935,5	3858,8
Piauí	343	1.897	292,5	-109,9	1371,0	1553,6
Paraná	2.729	8.192	1832,7	-272,6	3903,1	5463,2
Rio de Janeiro	7.390	13.520	3860,1	-616,1	2885,6	6129,5
Rio Grande do Norte	436	2.375	397,8	22,9	1518,8	1939,4
Rondônia	282	1.455	233,3	56,4	883,0	1172,6
Roraima	65	519	77,1	179,3	197,3	453,7
Rio Grande do Sul	3.546	9.236	2134,0	-884,5	4440,8	5690,3
Santa Catarina	1.731	6.479	1272,3	445,5	3029,8	4747,7
Sergipe	311	1.288	226,2	44,5	706,1	976,8
São Paulo	17.654	42.275	10392,3	443,7	13785,4	24621,4
Tocantins	108	1.127	147,6	70,0	801,4	1019,0

É importante destacar diferenças entre as Tabelas 1 e 2. Na Tabela 1 verifica-se que o efeito regional tem contribuição apenas marginal com relação à variação do consumo de energia, e já na Tabela 2 é possível notar a importância de tal efeito para explicar a variação do consumo por estado. Entre os estados que apresentaram efeito regional

negativo, ou seja, a população cresceu menos que a média nacional (migração ou crescimento vegetativo), destacam-se o Rio Grande do Sul (o efeito regional representa 16% da variação do consumo entre 1991 e 2020), Bahia (o efeito regional representa 12% da variação do consumo entre 1991 e 2020) e, por fim, o Rio de Janeiro (o efeito regional representou 10% da variação do consumo entre 1991 e 2020). Por outro lado, o Amapá apresentou a maior contribuição positiva do efeito regional, sendo que este efeito foi responsável por 43% da variação do consumo de 1991 e 2020, seguido por Roraima (participação de 40% da variação do consumo no mesmo período decorrente do efeito regional) e, por fim, destaca-se o Distrito Federal (entre 1991 e 2020 teve 28% da variação do consumo decorrente do efeito regional).

#### 4.2 Consumo de energia elétrica e pandemia

Ademais, não é possível a partir de dados agregados apontar efeitos da pandemia do Coronavírus sobre o consumo de energia residencial. Contudo, é possível apontar que o consumo de energia elétrica entre 2019 e 2020 cresceu 4,2%, variação essa a maior desde 2014, ou seja, é possível que políticas de contenção da disseminação do vírus como, por exemplo, fechamento do comércio e indicação para que os cidadãos ficassem o máximo de tempo possível em suas casas, tenham contribuído para o crescimento do consumo de eletricidade no período.

Além disso, vale destacar que diferentemente de outras classes, o consumo residencial foi o único que apresentou variação positiva no ano de 2020 (EPE, 2020b). Destacam-se entre as possíveis causas: i) transferência de participação relevante de trabalhadores para o *home office*; ii) incentivo ao isolamento social; iii) fechamentos de escolas e adoção de ensino EAD (ensino a distância). Vale mencionar o papel da renda no consumo de energia mesmo em um cenário de redução de rendimentos e emprego (IBGE, 2021). Souza et al. (2021) estimaram a elasticidade renda da demanda residencial de energia elétrica no Brasil utilizando econometria espacial e constataram que a elasticidade renda do consumo de energia é 0,28, ou seja, caso a renda caia 10%, o consumo de energia se reduz 2,8%, caracterizando eletricidade como um bem normal, o que pode ter limitado o efeito da pandemia sobre o consumo de energia elétrica residencial.

Mattei e Heinen (2020) buscaram determinar os impactos no mercado de trabalho brasileiro provocados pelo Covid-19 e utilizaram para tanto dados da PNAD Contínua. Os autores destacam que o mercado de trabalho já vinha antes de 2020 apresentando deterioração na taxa de desemprego e no índice de formalidade, ou seja, aumento da informalidade. Contudo, a epidemia, além de provocar grande elevação

na taxa de desemprego, acelerou o processo de informalidade. Neste mesmo tópico, Barbosa e Prates (2020) buscaram determinar os efeitos das políticas de redução de impacto da crise sobre o emprego e desigualdade durante e depois da pandemia, dada a dificuldade imposta pelo isolamento social; os autores sugerem recalcular a taxa de desemprego por estar subestimada, ou seja, a real taxa de desemprego no período poderia ser consideravelmente maior do que as estatísticas oficiais sugerem.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho utilizou a metodologia de decomposição de números índices, conhecida como *Index Decomposition Analysis* (IDA), para analisar os dados relativos à população e consumo de energia elétrica residencial em todos os estados, mais o Distrito Federal do Brasil, entre 1991 e 2020. Constatou-se que o Efeito Intensidade, ou seja, o efeito que mede a variação do consumo de energia elétrica em decorrência da variação do consumo per capita, apresentou as maiores contribuições para a elevação do consumo de energia no período analisado; os únicos dois estados nos quais o Efeito Intensidade não representaram a maior contribuição no aumento do consumo de energia no período foram Amapá (maior contribuição Efeito Regional) e Rio de Janeiro (Efeito População). Por outro lado, não é possível verificar o impacto da epidemia de Coronavírus sobre o consumo de energia, e pode-se destacar como principal motivo o fato de apenas o ano de 2020 ter sido analisado.

Vale também destacar o efeito da restrição de consumo verificada no racionamento de 2001, quando o Efeito Intensidade apresentou grande magnitude no sentido de reduzir o consumo de energia, ou seja, houve uma queda acentuada do consumo per capita. O fato é importante, visto que no ano de 2021 foi verificada novamente crise hídrica e a necessidade de elevações da tarifa por meio de bandeira vermelha.

Este trabalho buscou contribuir para futuros estudos, uma vez que, no Brasil, a segurança energética deve ser tratada com seriedade em função dos impactos verificados no início da década de 2000.

Propostas de novos estudos são: i) verificar a sensibilidade do consumo de energia, ou mesmo da intensidade energética, de cada estado face à tarifa de energia, ii) avaliar a relação entre o efeito intensidade e a utilização em residências de novos eletrodomésticos e eletroeletrônicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, K. C. DE F. J. SOUZA, R. G. V DE. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408. 2020.

ABRAHÃO, K. C. DE F. J.; SOUZA, R. V. G. DE. What has driven the growth of Brazil's residential electricity consumption during the last 19 years? An index decomposition analysis. *Ambiente Construído*, v. 21, n. 2, p. 7–39, abr. 2021.

ACHÃO, C. DA C. L. Análise de Decomposição das Variações no Consumo de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro. Tese de Doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

ACHÃO, C.; SCHAEFFER, R. Decomposition analysis of the variations in residential electricity consumption in Brazil for the 1980-2007 period: Measuring the activity, intensity and structure effects. *Energy Policy*, v. 37, n. 12, p. 5208–5220, dez. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Tarifa Média por Classe de Consumo e por Região. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Acesso em: 26 maio 2021.

ANDRADE, F. V.; PINHEIRO, R. B. Análise de decomposição da projeção de consumo de energia elétrica no Brasil para o setor residencial. *ENGEVISTA*, v. 16, n. 4, p.340-355, 2014.

ANDREOU, A. et al. Decomposing the drivers of residential space cooling energy consumption in EU-28 countries using a panel data approach. *Energy and built environment*, v. 1, n. 4, p. 432–442, 2020.

ANG, B. W.; ZHANG, F. Q.; CHOI, K. H. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition. *Energy*, v. 23, n. 6, p. 489–495, 1998.

ANG, B. W.; ZHANG, F. L. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy*, v. 25, p. 1149 – 1176. 2000.

ANG, B. W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? *Energy Policy*, Hastings, v. 32, p. 1131-1139. 2004.

BARBOSA, R. J.; PRATES, I. Efeitos do desemprego, do auxílio emergencial e do programa emergencial de preservação do emprego e da renda (MP nº936/2020) sobre a renda, a pobreza e a desigualdade durante e depois da pandemia. Nota Técnica – IPEA, julho 2020. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10187>

BOSIGNOLI, D.; LEON, N.; PESSANHA, J. F. M., SCHECHTMAN, J. A. previsão do consumo médio mensal para as residências. Um enfoque baseado na distribuição dos rendimentos familiares. Modelo e resultados para a região sudeste. 18° Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. 06 a 10 de outubro, Olinda, Pernambuco, Brasil, 2008.

CHOI, K-H; ANG, B. W. Decomposition of aggregate energy intensity changes in two measures: ratio and difference. *Energy Singapore*, v. 25, p. 615-624. 2003.

CHUNG, W.; KAM, M. S.; IP, C. Y. A study of residential energy use in Hong Kong by decomposition analysis, 1990–2007. *Applied energy*, v. 88, n. 12, p. 5180–5187, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE, 2020b). Atlas da Eficiência Energética Brasil 2020 – Relatório de Indicadores. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2020>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2020. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 22 nov. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2021. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 22 nov. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional - Séries Históricas Completas: Capítulo 8 (Dados Estaduais). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>>. Acesso em: 25 jun. 2021.

GIVISIEZ, G. H. N; OLIVEIRA, E. L.; ROCHA, D. L. Projeção demanda demográfica de energia elétrica no Brasil de 2010-2040. 17 p., 2019.

HAAS, R. Energy efficiency indicators in the residential sector: What do we know and what has to be ensured? *Energy Policy*, v. 25, n. 7–9, p. 789–802, 1 jun. 1997.

HUANG, Y.-H. Examining impact factors of residential electricity consumption in Taiwan using index decomposition analysis based on end-use level data. *Energy (Oxford)*, v. 213, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Tabela 2182 - Rendimento médio e mediano nominal do trabalho principal, efetivamente recebido no mês de referência, pelas pessoas de 10 anos ou mais de idade, ocupadas na semana de referência (Reais). Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2182>>. Acesso em: 9 jun. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Tabela 5439 - Rendimento médio real, habitualmente recebido por mês e efetivamente recebido no mês de referência, do trabalho principal, por posição na ocupação no trabalho principal. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5439>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Tabela 6579 - População residente estimada. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>>. Acesso em: 25 jun. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Regional: População residente - 1º de julho – estimativas. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>. Acesso em: 15 set. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Regional: População residente – Total. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>. Acesso em: 8 abr. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Salário-mínimo real - R\$ (do último mês). Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>. Acesso em: 9 jun. 2021.

LEON, N.; FRANCISCO, J.; PESSANHA, M. Dinâmica da evolução do consumo de energia no setor residencial. Curitiba: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.cgti.org.br/publicacoes/dinamica-da-evolucao-do-consumo-de-energia-no-setor-residencial/>>. Acesso em: 19 nov. 2021.

LEON, N.; PESSANHA, J. F. M. Cenários de conservação de energia na projeção de mercado da classe residencial. Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 4, 2011, Juiz de Fora, MG. Anais. 7 p. 2011.

MATTEI, I.; HEINEN, V. L. Impacto da crise da Covid-19 no Mercado de trabalho brasileiro. Revista de Economia Política, vol. 4, nº4, pg. 647-668.

NIE, H.; KEMP, R. Index decomposition analysis of residential energy consumption in China: 2002–2010. Applied Energy, v. 121, p. 10–19, maio 2014.

PAIS, P. S. M. Demanda de Energia Elétrica no Brasil no Período Pós Racionamento. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2012.

PIRES, J. C. L., GIAMBIAGI, F., SALES, A. F. As Perspectivas do Setor Elétrico após o Racionamento. Texto de Discussão nº 97. BNDES, Rio de Janeiro. 2002.

SCHAEFFER, R., COHEN, C., ALMEIDA, M.A., ACHÃO, C.C., CIMA, F.M. Energia e Pobreza: Problemas de Desenvolvimento Energético e Grupos Sociais Marginais em Áreas Rurais e Urbanas do Brasil (Altomonte, H. (org.)), Unidad de Recursos Naturales e Infraestructura de La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), Naciones Unidas, Santiago de Chile. 2003.

SILVA, S. A. DA. Análise econométrica da demanda de energia elétrica nos setores residencial- urbano e rural do Brasil, 1970-1999. 58 f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.

SILVA, V. F. DA. Demanda Residencial de Energia Elétrica no Brasil. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2019.

SOUZA, D. M; MATTOS, R. S.; ALMEIDA, E. S.. Elasticidade da Demanda Residencial de Eletricidade no Brasil: uma análise a partir de modelos espaciais. Revista Brasileira de Energia. Vol. 27, N° 4, 2021.

TSEMEKIDI TZEIRANAKI, S. et al. Analysis of the EU Residential Energy Consumption: Trends and Determinants. Energies (Basel), v. 12, n. 6, p. 1065, 2019.

XU, X. Y.; ANG, B. W. Analysing residential energy consumption using index decomposition analysis. Applied Energy, v. 113, p. 342–351, 2014.

## **CÁLCULO DO PONTO DE MÁXIMO CARREGAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Lucas Simões Borges<sup>1</sup>  
Renan Souza Moura<sup>1</sup>  
Caio César Branco Nunes<sup>1</sup>  
Cristian Adolfo Alvez<sup>1</sup>  
Antonio Carlos Zambroni de Souza<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Universidade Federal de Itajubá*

DOI: 10.47168/rbe.v28i3.730

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma maneira de se obter o ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência de forma otimizada. Para tal fim, utilizou-se a técnica de busca do algoritmo genético para determinar um fator de aceleração que, quando aplicado ao Método da Continuação, diminui o tempo necessário para encontrar o ponto de máximo carregamento. A metodologia proposta foi aplicada ao sistema teste de 14 barramentos do IEEE e ao sistema sul sudeste brasileiro com todos os limites operacionais considerados. Os resultados demonstraram que a utilização do fator de aceleração, encontrado pelo algoritmo genético, permitiu uma diminuição do tempo computacional de 62,8% e 48,1% nos sistemas de 14 barramentos do IEEE e sul sudeste, respectivamente. Esta diminuição do tempo computacional pode ser vantajosa ao se realizar estudos de planejamento e operação que requerem executar o Método da Continuação repetidamente, como no caso da reconfiguração da rede para maximizar a margem de carga.

Palavras-chave: Estabilidade de tensão; Método da Continuação; Algoritmo genético; Otimização computacional.

### **ABSTRACT**

This work presents a way to obtain the maximum loading point of electrical power systems in an optimized way. For this purpose, the genetic algorithm search technique was used to determine an acceleration factor which, when applied to the Continuation Method,

decreases the time needed to find the maximum loading point. The proposed methodology was applied in the IEEE 14-bus test system and in the south-southeast Brazilian system with all operational limits considered. The results showed that the use of the acceleration factor, found by the genetic algorithm, allowed a reduction of the computational time of 62.8% and 48.1% in the IEEE 14-bus and south-southeast systems, respectively. This decrease in the computational time can be advantageous when carrying out planning and operation studies that require running the Continuation Method repeatedly, as in the case of network reconfiguration to maximize load margin.

Keywords: Voltage stability; Continuation Method; Genetic Algorithm; Computational optimization.

## 1. INTRODUÇÃO

Prever o ponto de máximo carregamento de forma rápida tem sido uma preocupação para os operadores de sistemas elétricos de potência, pois permite realizar intervenções, caso sejam necessárias, de modo a evitar condições operativas indesejadas (ADEBAYO et al. 2020; GHALJEHEI et al. 2017).

Uma das técnicas que calcula o máximo carregamento de sistemas elétricos de potência é o Método da Continuação (GUIMARÃES et al. 2011; NETO et al. 2017). Este método, sendo uma das ferramentas nos estudos de estabilidade de tensão (KUNDUR et al. 2004), pode ter a sua velocidade ajustada através do fator de aceleração. Considerando também que o fator de aceleração é diferente para cada sistema analisado, este trabalho apresenta, como contribuição científica, uma forma de obter um fator de aceleração que, quando aplicado ao Método da Continuação, reduza o tempo computacional necessário para calcular o ponto operativo máximo de sistemas elétricos de potência.

A busca de um melhor fator de aceleração será por meio da técnica do algoritmo genético. A utilização de algoritmos evolutivos tem a vantagem de não necessitar de conhecimentos prévios dos sistemas analisados (KAGAN et al. 2009), o que facilita a sua aplicação como, por exemplo, em (CHOI et al. 2022; SUN et al. 2021) que otimizaram a utilização de potência reativa em sistemas de elétricos de potência.

Três formas diferentes de cálculos do ponto de máximo carregamento são demonstradas como resultados neste artigo: passo fixo, Método da Continuação sem algoritmo genético e Método da Continuação com algoritmo genético. Em todas as simulações, os limites operacionais dos sistemas testes, 14 barras IEEE e sul sudeste, são considerados.

Este artigo é dividido da seguinte forma. Após uma breve introdução, a seção 2 é responsável por apresentar o referencial teórico de forma que a metodologia indicada na seção 3 possa ser compreendida. Por fim, resultados e conclusões são demonstrados, respectivamente, nas seções 4 e 5.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Estabilidade de tensão e curva de máximo carregamento

O ponto operacional de um sistema elétrico de potência é afetado por diferentes intensidades de distúrbios. Distúrbios pequenos como, por exemplo, o aumento de carga elétrica, mudança de tap de transformadores, chaveamento de banco de capacitores/indutores, entre outros, podem ser analisados por meio de equações algébricas, pois usualmente causam pequenas excursões das variáveis de estado (KUNDUR et al. 2004).

Formada por sucessivos cálculos de fluxo de potência, a curva PV (MONTEIRO et al. 2017), ou curva de máximo carregamento, utiliza como distúrbio o aumento de carga e demonstra o nível de tensão associado, conforme indicado pela Figura 1.

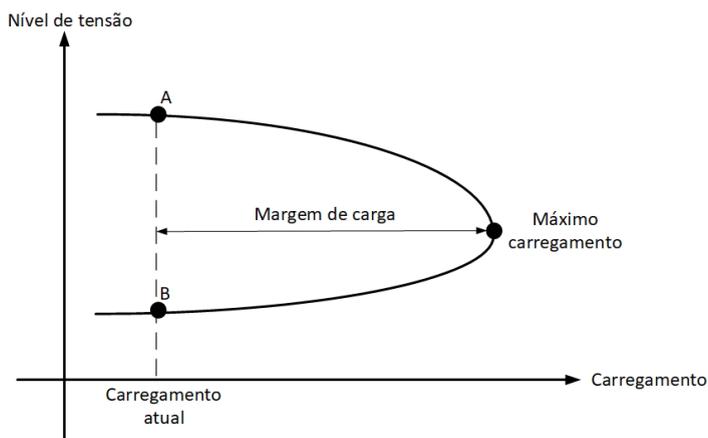


Figura 1 - Curva PV genérica

O ponto A da curva PV é considerado estável sob o ponto de vista de estabilidade de tensão, pois uma análise de sensibilidade indica que o aumento do carregamento resulta em uma diminuição do ní-

vel de tensão, algo esperado quando se atende uma carga do tipo potência constante. Como o ponto B apresenta características opostas ao ponto A, qualquer condição operativa em torno do ponto B deve ser evitada, sendo considerada instável.

A distância entre o ponto operativo atual e o máximo carregamento é definido como margem de carga. Um sistema elétrico deve sempre operar com uma margem de carga segura, o que permite ao operador realizar intervenções, caso sejam necessárias. Vários trabalhos na literatura técnica buscam ampliar a margem de carga (KUMAR et al. 2020; MOURA et al. 2013; LIN et al. 2011) de sistemas elétricos de potência.

Uma forma de calcular a margem de carga é através do Método da Continuação, descrito a seguir.

## 2.2 Método da Continuação

O Método da Continuação é dividido em três etapas (GUIMARÃES et al. 2011):

- passo previsor;
- passo corretor, e
- parametrização no ponto de máximo carregamento.

O passo previsor permite calcular o incremento de carga ( $\Delta\lambda$ ) durante a confecção da curva PV, conforme indicado pela equação (1).

$$\Delta\lambda = \frac{k}{\|VT\|} \quad (1)$$

Onde  $k$  é uma constante que determina a velocidade do passo e  $\|VT\|$  é a norma do vetor tangente. O vetor tangente é definido pela equação (2).

$$\|VT\| = [J]^{-1} \times \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde  $[J]$  e  $\begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix}$  são, respectivamente, a matriz jacobiana considerando os valores de fluxo de potência convergidos para um determinado valor de carregamento e a matriz com todos os valores de carga ativa e carga reativa nominais.

O elemento do vetor tangente que tem o maior valor absoluto permite também identificar o barramento crítico, que é aquele mais sus-

ceptível a instabilidade de tensão durante a confecção da curva PV (GUIMARÃES et al. 2011).

Uma observação interessante é que os valores dos passos previsores, calculados pela equação (1), são maiores para pontos operativos distantes do ponto de máximo carregamento e vão diminuindo à medida que o ponto operativo se aproxima do ponto de máximo carregamento. Esta característica é justificada pelo comportamento da matriz jacobiana utilizada na equação (2), pois quanto mais próximo do ponto de máximo carregamento, menor é o valor do determinante de  $[J]$ , o que resulta em maiores valores de  $\|J^{-1}\|$  e menores valores de  $\Delta\lambda$ . Esta característica deixou bem popular a técnica do Método da Continuação utilizando o vetor tangente para a determinação rápida do ponto de máximo carregamento.

Uma vez definido o novo carregamento da curva PV pelo passo predictor, equação (1), deve-se obter o correspondente ponto da curva PV. Isso é feito ao executar o cálculo de fluxo de potência e corresponde a segunda etapa do método da Continuação, o passo corretor.

Por fim, uma vez atingido o ponto de máximo de carregamento, deve-se realizar uma nova parametrização das variáveis do sistema elétrico (etapa 3 do Método da Continuação). A razão disso é porque o ponto de máximo carregamento, além de estar associado com o ponto de colapso de tensão, pode ser caracterizado matematicamente por uma bifurcação sela-nó (NETO et al. 2017; CANIZARES, 1998). Em termos práticos, isso significa que não é possível obter por meio de um fluxo de potência convencional o ponto de máximo carregamento porque a matriz jacobiana do Método de Newton Raphson apresenta determinante nulo.

### **2.3 Utilização do algoritmo genético para determinar o fator de aceleração, $k$**

Como o intuito é determinar o fator de aceleração que resulte na obtenção do ponto de máximo carregamento no menor tempo possível, os valores de  $k$  representam o espaço de busca.

De forma mais específica, os indivíduos são representados pelos valores de  $k$  por meio de uma codificação binária e o conjunto desses indivíduos formam a população. Durante o processo, os indivíduos são avaliados baseados na função objetivo representada pela equação (3).

$$\text{Função objetivo} = \text{minimizar } (t) \quad (3)$$

Onde,  $t$  é o tempo computacional para obter o ponto de máximo carregamento.

Após a avaliação dos indivíduos na equação (3), a técnica de seleção por torneio é utilizada para definir aqueles que participarão do processo de cruzamento.

No cruzamento dois indivíduos produzirão dois novos indivíduos. Para que isso seja possível, o número de indivíduos da população deve ser par. Assim, o número de indivíduos é equivalente ao número de barramentos do sistema. Caso o sistema apresente número ímpar de barramentos, é adicionado mais um indivíduo à população.

A etapa de cruzamento está sujeita a possibilidade de ocorrência de mutação. Por isso, definiu-se a probabilidade de ocorrência deste operador em 1%, o qual modifica a informação do *bit* (de “0” para “1”, ou vice-versa).

A cada geração obtida, os indivíduos são avaliados, e aquele que se mostrar mais apto a atender a função objetivo é armazenado. O processo é finalizado após 50 gerações e o resultado final é o melhor valor de  $k$  dentre os 50 valores armazenados.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consiste no cálculo do ponto de máximo carregamento através de três métodos diferentes, e a posterior comparação dos tempos computacionais obtidos. Tal metodologia será implementada com a seguinte ordem:

- 1 - cálculo do Fluxo de Potência para o valor de carga nominal;
- 2 - calcular a curva PV considerando passos fixos;
- 3 - calcular a curva PV através do Método da Continuação;
- 4 - calcular a curva PV através do Método da Continuação com o fator de aceleração obtido pelo algoritmo genético, e
- 5 - comparar o tempo computacional dos três métodos.

O fluxograma apresentado na Figura 2 ilustra os passos descritos anteriormente. Observe-se que o método 1 consiste em calcular o máximo carregamento que suporta o sistema utilizando incrementos fixos de carga (passos fixos), enquanto que o Método da Continuação determina os incrementos através dos passos previsor e corretor descritos na seção 2.2. Já o método proposto neste trabalho (método 3), utiliza o algoritmo genético para determinar o fator de aceleração  $k$  mais conveniente no método da continuação.

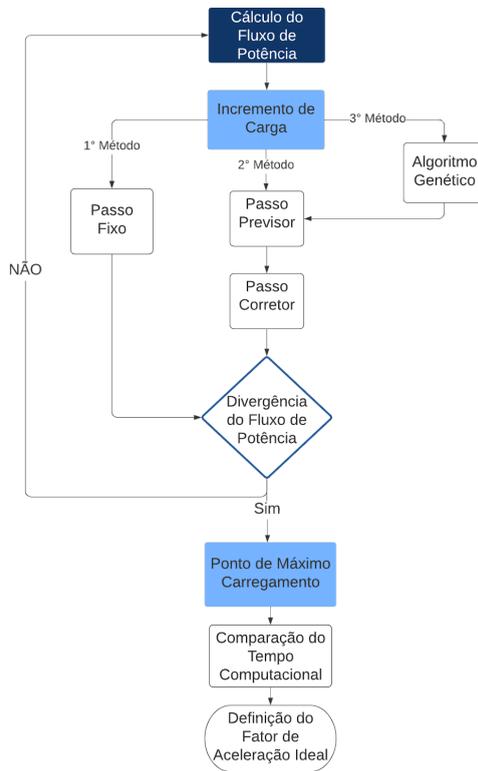


Figura 2 - Fluxograma da metodologia

#### 4. RESULTADOS

Para cada um dos sistemas analisados, o incremento de carga é feito utilizando métodos distintos, passo fixo, Método da Continuação sem algoritmo genético e Método da Continuação com valor de  $k$  encontrado pelo algoritmo genético. Em todas as simulações, os limites operacionais dos sistemas foram considerados.

- Sistema teste do IEEE de 14 barramentos

I - Passo fixo

É definido um acréscimo de 1% de carga elétrica, mantendo-se o mesmo fator de potência a cada cálculo de fluxo de potência. As curvas obtidas são apresentadas na Figura 3.

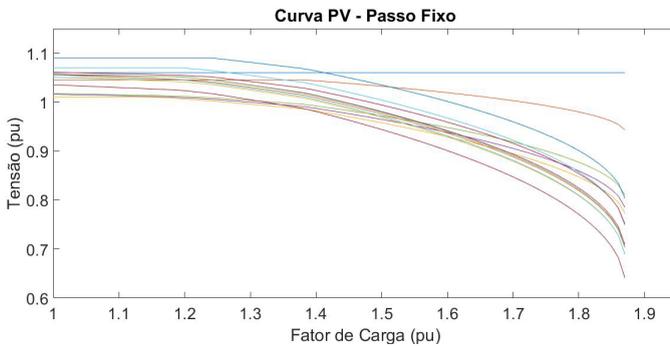


Figura 3 - Curvas PV – Passo Fixo, sistema 14 barramentos do IEEE

## II - Passo predictor sem Algoritmo Genético

É utilizado um valor de  $k$  igual a 0,26 (MOURA et al. 2013) na implementação do Método da Continuação, cujas curvas PV obtidas estão indicadas na Figura 4.

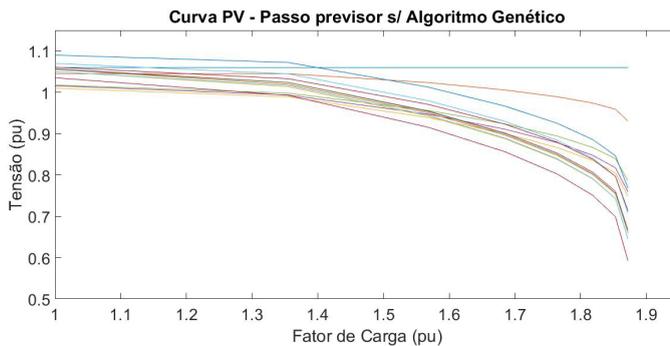


Figura 4 - Curvas PV – Passo predictor sem Algoritmo Genético, sistema 14 barramentos do IEEE

## III - Passo predictor com Algoritmo Genético

Como a população inicial da técnica de busca pelo algoritmo genético é gerada de forma randômica, o algoritmo genético foi executado 20 vezes e o gráfico da Figura 5 demonstra em porcentagem o número de vezes que cada valor de  $k$  foi obtido como solução.

Ao analisar o gráfico da Figura 5, é possível perceber que a implementação do algoritmo genético indica a utilização de um fator de aceleração igual a 0,63.

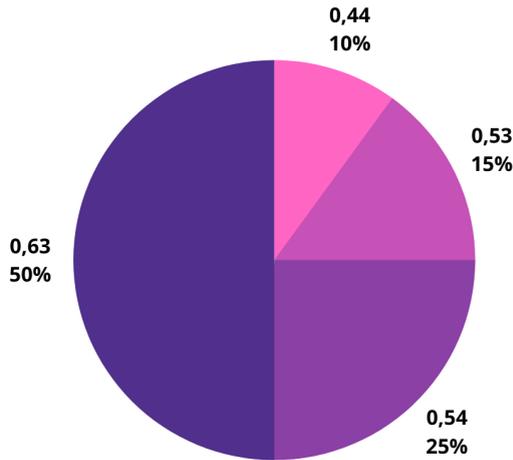


Figura 5 - Porcentagem de vezes que cada valor de  $k$  foi obtido como solução no sistema de 14 barramentos IEEE

Assim, ao utilizar o valor de  $k$  igual a 0,63 no Método da Continuação, são obtidas as curvas PV da Figura 6.

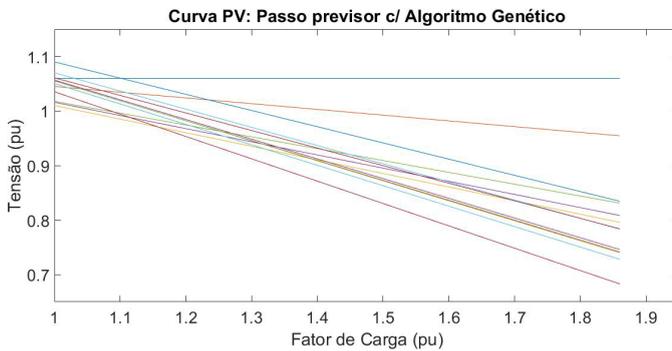


Figura 6 - Curvas PV – Passo predictor com Algoritmo Genético, sistema 14 barramentos do IEEE

A Tabela 1 apresenta as margens de carga obtidas para o sistema de 14 barramentos do IEEE. É possível perceber que os valores de margem obtidos por meio de diferentes métodos são bem próximos.

Tabela 1 – Margens de carga sistema de 14 barramentos

Método	Margem de Carga [pu]
Passo fixo	1,8700
Passo predictor s/ Algoritmo Genético	1,8720
Passo predictor c/ Algoritmo Genético	1,8600

- Sistema Sul-Sudeste

I - Passo fixo

Utilizando novamente um incremento de 1% de carga elétrica, mantendo-se o mesmo fator de potência, as curvas PV obtidas para o sistema sul-sudeste são apresentadas na Figura 7.

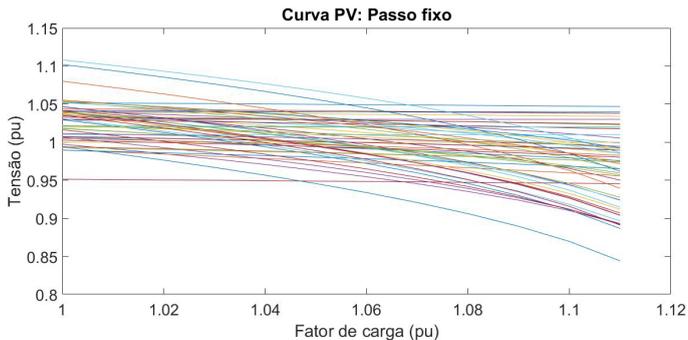


Figura - 7 Curvas PV – Passo Fixo, sistema sul-sudeste

II - Passo predictor sem Algoritmo Genético

É utilizado novamente um valor de  $k$  igual a 0,26 no Método da Continuação. As curvas PV obtidas estão representadas na Figura 8.

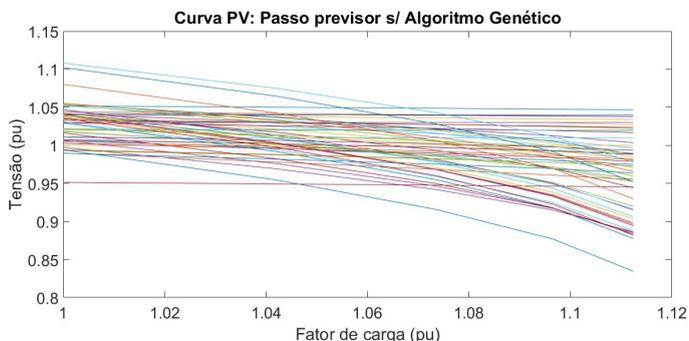


Figura 8 - Curvas PV – Passo predictor sem Algoritmo Genético, sistema sul sudeste

### III - Passo predictor com Algoritmo Genético

Semelhante ao processo realizado para o sistema de 14 barramentos do IEEE, o Algoritmo Genético foi executado 20 vezes e o gráfico da Figura 9 demonstra em porcentagem o número de vezes que cada valor de  $k$  foi obtido como solução.

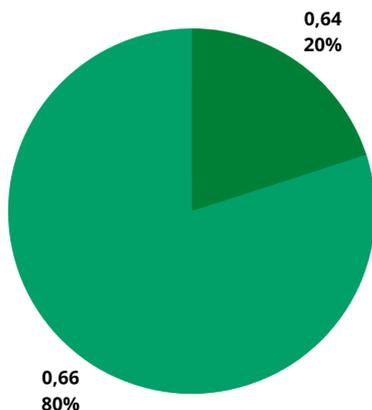


Figura 9 - Porcentagem de vezes que cada valor de  $k$  foi obtido como solução

De acordo com o gráfico da Figura 9, é possível perceber que a implementação do Algoritmo Genético indica a utilização de um fator de aceleração igual a 0,66. Ao utilizar este valor de  $k$  no Método da

Continuação, são obtidas as curvas da Figura 10.

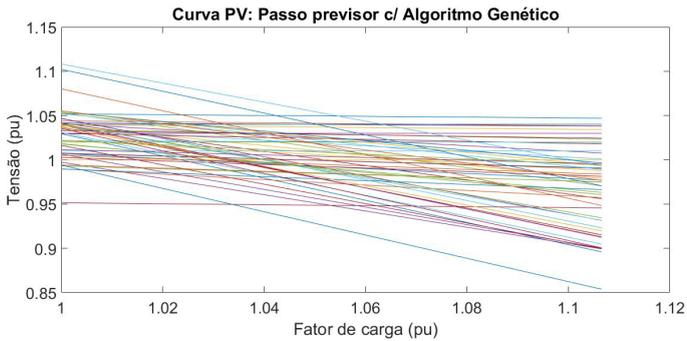


Figura 10 - Curvas PV – Passo preditor com Algoritmo Genético

É possível perceber pela Tabela 2 que os valores de margem obtidos por meio de diferentes métodos são bem próximos no sistema sul-sudeste.

Tabela 2 – Margens de carga sistema Sul - Sudeste

Método	Margem de Carga [pu]
Passo fixo	1,1100
Passo preditor s/ Algoritmo Genético	1,1124
Passo preditor c/ Algoritmo Genético	1,1066

#### - Validação dos resultados

Se comparados os valores obtidos por meio da simulação aos apresentados pelas referências através das Tabela 3 e 4, é possível perceber que são próximos. A diferença entre os valores pode ser justificada devido a divergência de parâmetros utilizados na simulação do cálculo do fluxo de potência como, por exemplo, critério de parada, entre outros. A divergência dos parâmetros utilizados reflete nos valores base obtidos e conseqüentemente na margem de carregamento obtida.

Tabela 3 – Comparação das margens de carga simuladas e apresentadas pelas referências para o sistema de 14 barramentos

Método	Margem de Carga [pu]
Passo fixo	1,8700
Passo predictor s/ Algoritmo Genético	1,8720
Passo predictor c/ Algoritmo Genético	1,8600
Apresentado por (Moura, 2016)	1,9110
Apresentado por (Moura et al, 2019)	1,9300
Apresentado por (Reis, 2019)	1,9400

Tabela 4 – Comparação das margens de carga simuladas e apresentadas pelas referências para o sistema Sul - Sudeste

Método	Margem de Carga [pu]
Passo fixo	1,1100
Passo predictor s/ Algoritmo Genético	1,1124
Passo predictor c/ Algoritmo Genético	1,1066
Apresentado por (Moura, 2016)	1,1200
Apresentado por (Moura et al, 2019)	1,1100
Apresentado por (Reis, 2019)	1,1100

#### - Comparação do tempo computacional

Para definição do ponto de máximo carregamento obtido por cada um dos métodos, foram registrados tempos diferentes para cada sistema analisado. O valor registrado é relacionado ao tempo cronometrado para que cada método obtivesse a curva PV e sua respectiva margem de carga. Além disso, é importante destacar que o tempo registrado para cada um dos métodos, assim como o tempo de treinamento do algoritmo genético, depende diretamente do computador utilizado, o que representa uma limitação da metodologia adotada. Assim, a Tabela 5 apresenta os tempos aferidos para cada um destes métodos.

Tabela 5 – Tempo computacional gasto por cada um dos métodos para os sistemas analisados

Sistema	Passo fixo [s]	Passo predictor s/ AG [s]	Passo predictor c/ AG [s]
14 barramentos	9,8616	1,7453	0,6482
Sul - Sudeste	22,2908	11,3955	5,9118

Por meio dos dados apresentados na Tabela 5, é notório que o método que exige maior tempo de processamento computacional é o dos passos fixos, pelo fato de apresentar um gráfico com número maior de pontos. Se compararmos o tempo obtido através da implementação do algoritmo genético com o método do passo fixo, houve uma redução do tempo computacional em aproximadamente 93,4% para o sistema teste do IEEE de 14 barramentos e de 73,5% para o sistema Sul-Sudeste.

Comparando o Método da Continuação em que é aplicado o algoritmo genético ao Método da Continuação convencional, temos uma redução de aproximadamente 62,8% para o sistema teste do IEEE de 14 barramentos e de 48,1% para o sistema Sul-Sudeste.

## 5. CONCLUSÕES

A técnica de busca do algoritmo genético permitiu calcular um fator de aceleração que, quando aplicado ao Método da Continuação, obtém o ponto de máximo carregamento com um menor tempo computacional. A ferramenta desenvolvida pode auxiliar os operadores de sistemas de potência nos estudos de planejamento e operação, pois permite determinar de forma eficiente o máximo nível de carregamento que o sistema suporta, antes que ocorram problemas de estabilidade de tensão. Esta diminuição do tempo computacional é muito vantajosa ao realizar estudos que requerem calcular por várias vezes o nível de carregamento, como no caso da reconfiguração da rede para maximizar a margem de carga, ou ao avaliar a margem de carga numa rede que integra montantes significativos de geração renovável. Como trabalhos futuros, sugere-se a comparação de diferentes algoritmos evolutivos no cálculo do fator de aceleração.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, Fapemig, Inerge e IFMG-Campus Formiga pelo suporte a este artigo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBAYO, I. G.; SUN, Y. (2020), Performance evaluation of voltage stability indices for a static voltage collapse prediction. 2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica, DOI: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219832, Nairobi, Quênia.

CANIZARES, C. A. (1998). Calculating optimal system parameters to maximize the distance to saddle-node bifurcations. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, Vol. 45, artigo número: 45, DOI: 10.1109/81.662696.

CHOI, J.; LEE, K. Y. (2022). *Probabilistic Power System Expansion Planning with Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems*. Wiley-IEEE Press, DOI: 10.1002/9781119819042.ch10, ISBN eletrônico: 9781119684190.

GHALJEHEI, M.; SOLTANI, Z.; HAGGI, H.; GOLKAR, M. A. (2017). Integrated power market with RESs and load uncertainties using scenario-based method in order to voltage collapse probability relief. *Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, DOI: 10.1109/IranianCEE.2017.7985221, Teerão, Irã.

GUIMARÃES, P.; FERNANDEZ, U.; OCARIZ, T.; MOHN, F. W.; SOUZA, A.C. Z. (2011). QV and PV curves as a planning tool of analysis. 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), DOI: 10.1109/DRPT.2011.5994153, Weihai, China.

KAGAN, N.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. B.; KAGAN, H. (2009). *Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência*. Editora Blucher, Edição 1, ISBN-10: 8521204728, ISBN-13: 978-8521204725.

KUMAR, R.; MITTAL, A.; SHARMA, N.; DUGGAL, I. V.; KUMAR, A. (2020). PV and QV curve analysis using series and shunt compensation. 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), DOI: 10.1109/PIICON49524.2020.9112917, Sonipat, India.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; CUTSEM, T. V.; VITTAL, V. (2004). Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, Washington DC, USA, v.19, n. 2, p. 1387-1401.

LIN, C.; JIANG, J. N.; TANG, C. Y.; RUNOLFSSON, T. (2011). A study on the impact of control on PV curve associated with doubly fed induction generators. 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, DOI: 10.1109/PSCE.2011.5772583, Phoenix, Estados Unidos.

MONTEIRO, M. R.; SOUZA, A. C. Z.; LOPES, B. I. L. (2017). Influence of Renewable Generation in Voltage Collapse Indexes. 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Santa Margherita Ligure, Itália.

MOURA, R. S. (2016). Estudo do efeito do tipo da curva QV em simulações dinâmicas em sistemas elétricos de potência. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

MOURA, R. S.; MARUJO, D.; SOUZA, A. C. Z.; LOPES, B. I. L. (2013). Blocking reactive power Generation as a voltage control measure. 22nd International Conference on Electricity Distribution, artigo número 0532, Estocolmo, Suécia.

MOURA, R. S.; REIS, C. F.; PEDROSA, R. K. R; NEVES, T. R. (2019). Estudos sobre a capacidade de hospedagem de geração distribuída em sistemas elétricos de potência utilizando algoritmo genético. ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 7, n. 1, e00452. DOI: 10.29069/forscience.2019v7n1.e452.

NETO, A. B.; ALVES, D. A. (2017). Singularities analysis of the jacobian matrix modified in the continuation power flow: performance evaluation. IEEE Latin American Transactions, Vol. 15, artigo número 11, DOI: 10.1109/TLA.2017.807041.

REIS, C. F. (2019). Estudos Sobre A Capacidade De Hospedagem De Geração Distribuída Em Sistemas Elétricos De Potência Utilizando Algoritmo Genético. Instituto Federal de Minas Gerais. Formiga – MG.

SUN, L.; ZHUO, F.; YANG, Z.; YI, H.; YIN, X. (2021). Optimal Voltage/Var Control of PV Inverters in Distribution Network Based on Genetic Algorithm. 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), DOI: 10.1109/PEAS53589.2021.962826, Shanghai, China.

# ENERGIA NA AMÉRICA LATINA

## APORTES DE LOS PLANES DE EFICIENCIA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y METODOLOGÍA PARA SUDESARROLLO: EL CASO DEL SECTOR RESIDENCIAL DE ARGENTINA<sup>1,2</sup>

Marina Recalde<sup>1,2</sup>  
Hilda Dubrovsky<sup>2</sup>  
Francisco Lallana<sup>2</sup>  
Gustavo Nadal<sup>2</sup>  
Nicolás Di Sbroiavacca<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>2</sup>Fundación Bariloche

DOI: 10.47168/rbe.v28i3.781

### RESUMEN

La eficiencia energética presenta una significativa relevancia como política de mitigación y de transición energética, aportando además beneficios económicos y sociales. Sin embargo, muchas de las opciones de eficiencia energética enfrentan diferentes barreras, y por ello no se implementan demandando la puesta en marcha de planes y programas de política para incentivarlas. En este estudio se aborda la importancia y la necesidad de elaborar planes de eficiencia energética en la búsqueda de la transición energética a partir de la presentación de la propuesta de plan de eficiencia energética (PlanEEAr) para el sector residencial de Argentina. El objetivo del trabajo es, a partir de un caso de estudio particular, ilustrar una propuesta metodológica construida para la elaboración de planes de eficiencia energética, la cual combina herramientas cuantitativas y cualitativas de análisis

---

1 Los puntos de vista y opiniones expresados en este artículo son exclusivamente de las autoras y no reflejan necesariamente la política o posición oficial de las instituciones a las que pertenecen o que financiaron el estudio.

2 La propuesta de Plan Nacional de Eficiencia Energética para Argentina que incluye el capítulo del sector residencial que incluye en este artículo fue financiado por el Instrumento de Asociación de la Comisión Europea bajo contrato (PI/2018/396-324) y realizado en el marco del proyecto Eficiencia Energética en Argentina.

que permiten evaluar los potenciales de eficiencia, sus impactos sistémicos para el sector energético y ambiental, y construir, sobre la identificación de barreras, propuestas de instrumentos que promuevan su implementación. Entre las principales lecciones del proceso, se destaca la importancia de contar con herramientas que contengan evaluaciones de los potenciales de eficiencia, impactos futuros, la relevancia de un buen diagnóstico e identificación de barreras, y la construcción participativa de las propuestas de políticas, así como la necesidad de avanzar en los procesos de gestión del conocimiento para la implementación de las propuestas construidas.

Palabras-clave: Eficiencia; Energía; Política; Prospectiva; Residencial.

## RESUMO

A eficiência energética tem relevância significativa como política de mitigação e transição energética, proporcionando também benefícios econômicos e sociais. No entanto, muitas das opções de eficiência energética enfrentam diferentes barreiras e, por isso, não são implementadas, exigindo a implementação de planos e programas de políticas para incentivá-las. Este estudo aborda a importância e a necessidade de desenvolver planos de eficiência energética na busca da transição energética a partir da apresentação da proposta de um plano de eficiência energética (PlanEEAr) para o setor residencial na Argentina. O objetivo do trabalho é, a partir de um estudo de caso particular, ilustrar uma proposta metodológica construída para a elaboração de planos de eficiência energética, que combina ferramentas de análise quantitativa e qualitativa, e que permitem avaliar os potenciais de eficiência, seus impactos sistêmicos para o setor energético e ambiental e construir, a partir da identificação de barreiras, propostas de instrumentos que promovam sua implementação. Entre as principais lições do processo, destaca-se a importância de contar com ferramentas que contenham avaliações de potenciais de eficiência, impactos futuros, a relevância de um bom diagnóstico e identificação de barreiras e a construção participativa de propostas de políticas, bem como a necessidade de avançar nos processos de gestão do conhecimento para a implementação das propostas construídas.

Palavras-chave: Eficiência; Energia; Política; Prospecção; Residencial.

## ABSTRACT

Energy efficiency has a significant relevance as a mitigation and energy transition policy, also providing economic and social benefits. However, many of the energy efficiency options face different barriers and for this

reason they are not implemented, demanding the implementation of plans and policy programs to encourage them. This study addresses the importance and the need to develop energy efficiency plans in the search for the energy transition; it presents a proposal for an energy efficiency plan (PlanEEAr) in the residential sector in Argentina. The objective of the work is, from a particular case study, to illustrate a methodological proposal for the elaboration of energy efficiency plans, which combines quantitative and qualitative analysis tools that allow evaluating the efficiency potentials, their systemic impacts for the energy and environmental sector, and build, on the identification of barriers, proposals for instruments that promote their implementation. Among the main lessons of the process, the importance of having tools that contain evaluations of efficiency potentials, future impacts, the relevance of a good diagnosis and identification of barriers, and the participatory construction of policy proposals, as well as the need to advance in knowledge management processes for the implementation of the built proposals.

Keywords: Efficiency; Energy; Politics; Prospective; Residential.

## 1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética tiene significativos beneficios para la economía en su conjunto y es una variable clave de la política de mitigación y de la transición energética. No obstante, aun cuando en general muchas de las opciones de eficiencia energética se presentan como costo efectivas, tanto desde un punto de vista global como privado la existencia de diferentes barreras hace que estas acciones no se implementen en la realidad, dando lugar a las brechas de eficiencia energética significativas.

Argentina no escapa a esta situación, y a pesar de la existencia de algunos programas implementados por el Estado, los sectores no han logrado avanzar en la puesta en marcha de acciones de eficiencia energética. Sin embargo, recientemente se ha observado un cambio del contexto energético nacional, tales como modificaciones en los precios de la energía para los distintos sectores y el posicionamiento ambiental del país, marcan un entorno propicio para diseñar e implementar acciones de eficiencia. Por ello, desde la Secretaría de Energía de la Nación se comenzaron a diseñar e implementar múltiples acciones aisladas en los diferentes sectores de consumo, los cuales son de mucha relevancia, pero que no presentan, aún, una estructura integrada y coherente entre sí.

En este contexto, este estudio busca resaltar la importancia y la necesidad de elaborar planes de eficiencia energética en la búsqueda de la transición energética de los países, y presentar como caso concreto de estudio la elaboración de una propuesta de plan

de eficiencia energética para el sector residencial de Argentina. Esta propuesta, fue elaborada entre el año 2018 y 2021 para la Secretaría de Energía de la Nación en el marco de un proyecto de Cooperación con la Unión Europea, “Eficiencia Energética en Argentina”<sup>1</sup>. Entre los principales objetivos de dicho proyecto se encontraba la elaboración de los lineamientos para un “Plan Nacional de Eficiencia Energética (PlanEEAr)”, junto con el marco regulatorio requerido para su implementación, orientado, especialmente, a los sectores industria, transporte y residencial. Ante la imposibilidad de resumir la extensión completa de la propuesta del plan, se ha seleccionado para este artículo uno de los sectores trabajados, solo a título ilustrativo.

En lo que sigue el artículo se encuentra estructurado en cuatro secciones. En primer lugar, se analiza la transición energética, la eficiencia y la necesidad de desarrollar planes; en segundo lugar, se presenta la metodología sobre la cual se desarrolla el caso de estudio para finalmente destacar cuales son los principales desafíos y lecciones aprendidas del proceso.

## 2. LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y LA NECESIDAD DE PLANES

A lo largo de las últimas décadas, la eficiencia energética ha cobrado un lugar cada vez más importante para las políticas energéticas y climáticas, y con ello un rol en la transición energética. La relevancia que la aplicación de estrategias de eficiencia energética tiene para la política energética en general se debe a sus múltiples beneficios sobre diferentes dimensiones, seguridad energética, el alivio de la pobreza energética, el aumento de la productividad industrial y general, impactos positivos sobre el presupuesto público, entre otros (IEA, 2014).

Uno de estos beneficios múltiples, se refiere a su potencial como estrategia de mitigación del sector energético, acompañando a otras acciones como la promoción de fuentes limpias de energía en un contexto en el cual se ha demostrado que las iniciativas del lado de la oferta por sí solas (como por ejemplo el aumento de la participación de las energías renovables) no serán suficientes para reducir el impacto ambiental del sector energético, y lograr la transición a las economías de cero emisiones netas.

En los estudios de las acciones de mitigación, los resultados de los análisis costo beneficio dependen de los costos estimados de las opciones y de su comparación con el costo de oportunidad de estas. En el último informe sobre mitigación del Grupo de Trabajo III realizado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), publicado en el año 2022, se destaca que, para

<sup>1</sup> <https://www.eficienciaenergetica.net.ar/>

los tres sectores más relevantes en términos de consumo energético (Edificios, Transporte e Industria) los costes de las opciones de eficiencia energética (cambio tecnológico o uso racional de la energía) son inferiores a la tecnología de referencia, o corresponden a alternativas de bajo coste entre 0-20 USD por tCO<sub>2</sub>eq. Así, de entre muchas alternativas de mitigación, las acciones de eficiencia energética se mantienen como las más costo-efectivas a nivel global.

De acuerdo con el UNEP's Emissions Gap Report 2017, los sectores de más potencial de eficiencia energética a nivel global son los de equipamientos e iluminación, edificación (para los usos de calefacción y refrigeración) y el sector industrial a través de las mejoras en motores y otros equipamientos. No obstante, esta relevancia como estrategia de mitigación, y la existencia de sus múltiples beneficios, son pocos los países que han incorporado las acciones de eficiencia energética dentro de sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), con niveles de ambición elevados.

Las estimaciones recientes realizadas por IRENA y la IEA, muestran que la reducción del *Energy Efficiency Gap* coherente con los escenarios de Net-Zero requiere de esfuerzos que exceden los incluidos inicialmente en el Objetivos de Desarrollo Sustentable 7 (ODS7). El enfoque del *Energy Efficiency Gap* intenta entender o explicar la brecha de inversión, generalmente definida como la diferencia entre el nivel real de eficiencia y un nivel estimado, alcanzable en la práctica. Tal como lo destacan Estache y Kaufmann (2011), esto significa que la cantidad de energía utilizada para cumplir con los diferentes servicios energéticos (calefacción, refrigeración, iluminación, transporte, producción de bienes, etc.) podría (y debería) ser inferior a la real. Así, el *Energy Efficiency Gap* se define como la diferencia entre los niveles de eficiencia que podrían alcanzarse mediante inversiones rentables en eficiencia energética y los niveles de eficiencia (más bajos) que se observan en la realidad. Estache y Kaufmann (2011) argumentan que, la brecha de eficiencia energética puede estar reflejando una subestimación de los costes energéticos y unas preferencias de consumo mal entendidas; mientras que otros estudios mostraron que uno de los problemas más importante es el acceso limitado al capital. En muchos casos esta subestimación del costo energético privado se relaciona con el desacople entre el costo real de la energía y el percibido por los consumidores vía tarifas. En estas situaciones las estrategias públicas orientadas al desarrollo de instrumentos que orienten a la mejora del desempeño energético (aun cuando implique erogaciones significativas) se presenta como costo-efectiva desde una perspectiva sistémica, del sector y la macroeconomía. Rosenow et al. (2017) argumentan que, aunque muchas acciones de eficiencia energética suelen ser rentables a medio y largo plazo, los actores privados se enfrentan a diferentes proble-

mas (barreras) que les impiden implementar estas acciones. La identificación de estos problemas es clave para cerrar la brecha de la eficiencia energética, y para ello es crucial la implementación de políticas públicas.

Es aquí donde aparece la necesidad por parte de los Estados de poner en marcha políticas de eficiencia energética y definir diferentes mecanismos de intervención para influir sobre el comportamiento de los actores descentralizados. El diseño e implementación de los planes y programas de eficiencia energética son claves para el alcance de los objetivos de las políticas, y en la mayoría de los casos representan un reto al que se enfrentan las instituciones y los funcionarios en cada país o región.

Los responsables políticos pueden eliminar estas barreras específicas con instrumentos adecuadamente diseñados. Es importante reconocer que se necesita una combinación de instrumentos bien orientada y completa (KERN et al., 2017; ROSENOW et al., 2016; ROSENOW et al., 2017). Como sostienen Purkus et al. (2017), la elección y el diseño de los instrumentos son pasos cruciales en la elaboración de la política, empezando por la selección y la combinación de los diferentes tipos de instrumentos; teniendo en cuenta que, para cumplir los requisitos de sostenibilidad, la política debe ser completa y coherente. El análisis de la combinación de políticas es especialmente relevante en el marco de la descarbonización y la transición, ya que en muchos casos los gobiernos pueden utilizar instrumentos similares para la política energética y la política de cambio climático, y su combinación (cuando no está bien diseñada) puede conducir a resultados no deseados. El sexto informe del IPCC reconoce explícitamente la necesidad y la importancia de la política pública para estimular el cambio tecnológico para reducir las emisiones, y destaca la importancia que tiene en el resultado de la misma la creación de expectativas creíbles de futuras oportunidades de mercado (ALKEMADE y SUURS, 2012). Es por ello por lo que el reporte insiste que reforzar la credibilidad y la durabilidad de las políticas relacionadas con la tecnología de bajas emisiones de carbono es crucial para acelerar el cambio tecnológico e inducir la inversión del sector privado necesaria (HELM et al., 2003; HABERMACHER et al., 2020).

### 3. METODOLOGÍA

Siguiendo la metodología propuesta para la elaboración de políticas y planes energéticos, en OLADE (2017) se desarrolló la propuesta que se reproduce en la Figura 1. Dada la naturaleza de la política de eficiencia energética, el proceso se apoya en diferentes metodologías, desde técnicas de investigación cualitativa hasta modelados y técnicas

de optimización energética. Es importante reconocer que se trata de un proceso que podrá modificar su ritmo, pero que deberá ser revisado periódicamente, para ser ajustado a los cambios del entorno. La información suficiente y de calidad es una condición habilitante clave para poder desarrollar cualquier plan o programa.

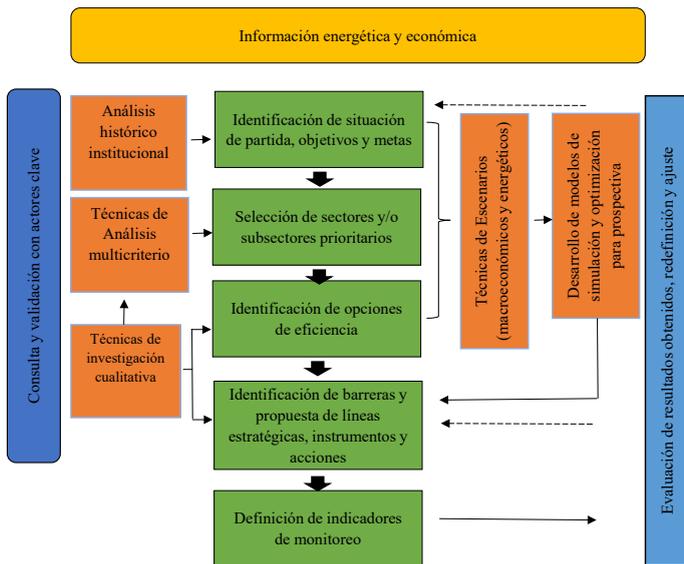


Figura 1 - Esquema para la elaboración de un plan de eficiencia energética

El primer punto para el desarrollo de cualquier plan requiere de la realización de un diagnóstico inicial. Esto implica determinar el punto de partida, identificando además actores e instituciones claves que deberían incorporarse en el proceso. La fase de diagnóstico requiere además fijar los objetivos que se pretenderán alcanzar y los potenciales de eficiencia en los sectores. Esta etapa se basa en un análisis histórico institucional del sector. Se trata de una de las etapas más importantes del plan, ya que un punto de partida inadecuado o insuficiente puede afectar negativamente todas las propuestas que se elaboren en etapas posteriores.

En segundo lugar, se priorizan los sectores y subsectores a incluir, ya que si bien existen potenciales de eficiencia energética en todos los sectores de la economía (demanda y oferta), en algunos casos no es posible poner en marcha planes que abarquen todos los sectores al mismo tiempo. Dado el impacto socioeconómico y ambiental de la energía, las políticas energéticas en general, y las de eficiencia en par-

ticular, enfrentan el desafío de cubrir múltiples objetivos en diferentes-dimensiones (OLADE/CEPAL/GTZ, 2003). Por estos motivos es que en general una priorización de sectores solo basadas en la dimensión energética puede resultar insuficiente. Estos aspectos implican una demanda adicional a los modelos tradicionales, puesto que se debe dar respuesta a más de un objetivo y compatibilizar información mixta (cualitativa y cuantitativa), y los métodos multicriterio suelen ser un instrumento valioso (MUNDA et al., 1994; PACHECO y CONTRERAS, 2008).

En tercer lugar, y una vez seleccionados los sectores prioritarios, se analizan las medidas de eficiencia energética (técnicas y de buenas prácticas) a implementar en cada uno de los sectores. Esta fase debe estar precedida de un análisis de la situación inicial en términos de consumos, usos energéticos y eficiencia energética en cada sector, y el establecimiento de potencial de eficiencia energética. Una vez analizadas estas medidas y sus potenciales impactos en términos de energía y emisiones, costos y otras variables, es sumamente conveniente evaluar su impacto en la totalidad del sistema en un período bajo estudio a partir de la realización una prospectiva energética, muchos beneficios indirectos se subestiman al no realizarlo de este modo. En este caso se utilizó el LEAP (*Low Emissions Analysis Platform*)<sup>1</sup>, una plataforma de evaluación integrada de planificación energética y evaluación de mitigación del cambio climático, basado en escenarios, desarrollada por el *Stockholm Environmet Institute* (SEI) y ampliamente utilizada en la literatura empírica.

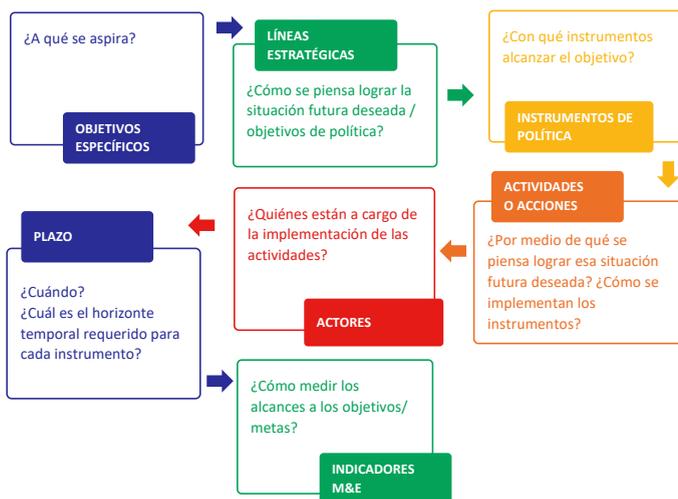
El quinto paso de la metodología es fundamental, y se refiere a la identificación de barreras y la propuesta de política. La propuesta de líneas estratégicas debe reconocer que las mismas son el medio para alcanzar los objetivos específicos en cada sector, planteados en la primera etapa de la elaboración del plan. Cada línea incorpora los instrumentos y el plan de acción. Es fundamental comprender que esta fase de diseño del plan depende de la identificación y priorización de las barreras, y de las condiciones de entorno. Los instrumentos deben ser seleccionados dependiendo de las barreras que pretenden eliminar, y diseñados atendiendo al entorno en el cual se implementarán. Es fundamental reconocer que las medidas de eficiencia energética no pueden lograrse mediante un único instrumento de política y, por lo tanto, es necesario contar con una combinación de instrumentos bien orientada y exhaustiva (ROSENOW et al., 2016; ROSENOW et al., 2017). La etapa el diseño del instrumento es primordial, ya que un instrumento bien seleccionado, pero mal diseñado, no dará lugar a los resultados deseados. Cada instrumento tiene características específicas: es importante tomar en consideración las condiciones del con-

1 Heaps, C. G., 2021. LEAP: *The Low Emissions Analysis Platform*. [Software version: 2020.1.30] *Stockholm Environment Institute*. Somerville, MA, USA. <https://leap.sei.org>

texto (factores estructurales, políticas existentes, y condiciones políticas y culturales); establecer el objetivo (target) del mismo; población objetivo o actores alcanzados; tecnologías que son alcanzadas por el instrumento y criterio para seleccionarlas, etc. En los últimos años ha aumentado la literatura que discute la necesidad de un mix de instrumentos de política y la forma de diseñar esta mezcla de instrumentos, de forma de potenciar las sinergias y evitar posibles solapamientos entre los mismos (GRUBB et al., 2017; JACOBSSON et al., 2017).

La etapa final en el armado del plan será la definición de un conjunto de indicadores. El monitoreo y seguimiento de las políticas, estrategias, programas y de las iniciativas tanto públicas como privadas, se hace indispensable para establecer los impactos en los objetivos y metas, así como para evaluar el desempeño y la eficacia de las políticas de eficiencia energética del país. El monitoreo y el seguimiento permitirá orientar los recursos en forma estratégica, coordinar acciones e iniciativas, replantear las metas y promover un mercado de la eficiencia en función de la productividad, el cambio climático, el confort y la calidad de vida de la población.

La Figura 2 resume todos los elementos que deben estar presentes en el armado de un plan de eficiencia energética, y muestra como cada uno de ellos responde a una pregunta específica que se aborda con las diferentes metodologías mencionadas más arriba.



Fuente: Elaborado en base a OLADE/CELAP/GTZ (2003)

Figura 2 - Elementos de un plan de eficiencia energética y preguntas guía para identificarlos

#### 4. CASO DE ESTUDIO: EL PLAN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA EL SECTOR RESIDENCIAL DE ARGENTINA<sup>1</sup>

A pesar de haber implementado diferentes programas (aislados) para la promoción de la eficiencia energética, Argentina se caracteriza por presentar un significativo *energy efficiency gap* en todos los sectores de consumo, y ha enfrentado en los últimos años algunos problemas energéticos de relevancia, con un significativo impacto macroeconómico, especialmente desequilibrios en la balanza comercial con repercusiones sobre el tipo de cambio (BARRERA y SERRANI, 2018). Una característica energética fundamental de Argentina ha sido su elevada dependencia de los hidrocarburos, en especial del gas natural, el cual en el año 2019 representó el 55% de la Oferta Interna Primaria, con significativa relevancia en la generación de electricidad y elevada penetración en el consumo de energía final de los sectores de consumo (62% en el sector residencial, 59% industrial y 32% en transporte). Además, en los últimos años ha entrado en la discusión energética y económica la existencia de recursos gasíferos no convencionales, que posicionarían al país en el mercado internacional y que podrían tener impactos económicos y productivos positivos y negativos (AGGIO et al., 2017; LANDRISCRINI, 2019; BRAVO y DI SBROIIVACCA, 2021).

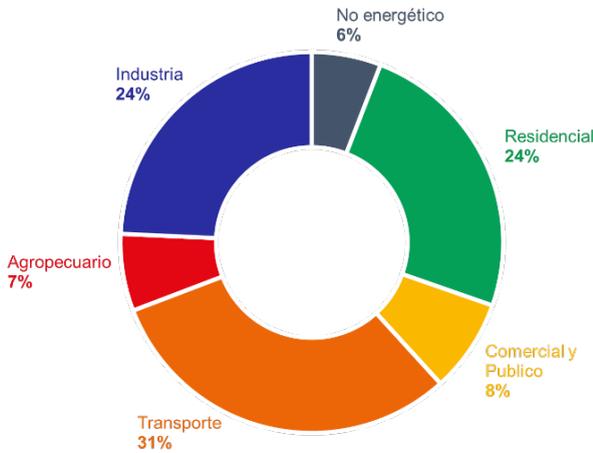
En el año 2021 las emisiones totales del país representaban el 0,74% de las emisiones globales y Argentina se encontraba en el puesto 155 del ranking de países por emisiones de CO<sub>2</sub>. En el año 2016, el Gobierno presentó su NDC, y una revisión en el año 2020 en la cual se propuso como meta, “La República Argentina no excederá la emisión neta de 359 MM TonCO<sub>2</sub>eq. en el año 2030, aplicable a todos los sectores de la economía”.

Todos estos aspectos en su conjunto, propiciaron que en el año 2018, a partir de una solicitud de la Secretaría de Energía y con financiamiento de la Unión Europea, se pusiera en marcha la elaboración de una propuesta de Plan Nacional de Eficiencia Energética, el cual, siguiendo la metodología descrita más arriba, se concentró en tres sectores fundamentales (y dentro de ellos algunos subsectores seleccionados con la metodología multicriterio), industria, transporte y residencial, los cuales en su conjunto explican cerca del 80% del consumo de energía final del país.

Dada la complejidad de la propuesta del plan, y lo difícil de abarcar su exposición en un artículo, en lo que sigue, se presenta el caso de estudio del sector residencial.

---

<sup>1</sup> Este capítulo resume los resultados del Informe Final de la Propuesta del Plan Nacional de Eficiencia Energética Argentina realizado por los autores: Daniel Bouille (coordinador), Aliosha Behnisch, Gonzalo Bravo, Nicolás Di Sbroiavacca, Hilda Dubrovsky, Francisco Lallana, Gustavo Nadal, Hector Pistonesi, Marina Recalde, Beno Ruchansky, Raúl Landaveri, Alejandra Romano, e Ignacio Sagardoy, y el capítulo de residencial contó con el aporte Salvador Gil.



Fuente: elaboración propia en base al BEN 2019

Figura 3 - Consumo Final de Energía por sectores. Año 2019

En Argentina, el gas natural es la principal fuente energética (62%), seguida por la energía eléctrica (27%) para el sector residencial. Sin embargo, la composición por fuentes energéticas y por usos energéticos no es uniforme a lo largo de todo el territorio nacional, pues los factores climáticos y la posibilidad del acceso a estas fuentes distribuidas por redes varía significativamente. En especial, los requerimientos de energía la calefacción, Refrigeración y Ventilación, y Agua Caliente Sanitaria (ACS), se encuentran determinados fuertemente por el clima.

En términos de la estructura rural y urbano, si bien cerca del 8% del total de hogares son rurales, su participación en el consumo energético total del sector residencial no es superior al 3%. Por otro lado, la intensidad energética (consumo de energía/hogar) en la población rural es inferior al 40% de la intensidad en los hogares urbanos y, además, la estructura por fuentes también difiere entre ambos segmentos de la población.

En el presente estudio el análisis del consumo de energía y la prospectiva energética del sector fue realizada teniendo en consideración tres regiones bioclimáticas (las cuales agrupan las regiones bioclimáticas de la Norma IRAM 11.603 (1993)<sup>1</sup>). Es importante destacar que todo el análisis realizado se basó en los datos desagregados de consumo energético en base a la Encuesta Nacional de Gastos de los

<sup>1</sup> La norma IRAM 11.603 (1993) define seis zonas bioambientales teniendo en cuenta diferentes índices de confort para las zonas cálidas y los grados días para las necesidades de calefacción.

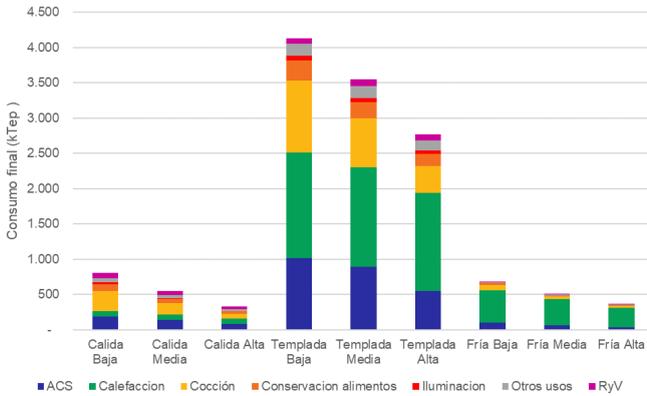
Hogares (ENGHo) 2017<sup>1</sup> realizada por el INDEC en colaboración con la Secretaría de Energía.

Cerca del 75% de los hogares urbanos se encuentran concentrados en la zona templada, seguido por el 21% de los mismos en la zona cálida. El 47% de los hogares urbanos corresponden a nivel educativo bajo (siendo esta la variable proxy para nivel de ingresos) seguido por nivel educativo medio (33%). Esta situación se mantiene en el caso específico de la zona templada, donde el 45% de los hogares corresponden a niveles educativos bajos. En forma coincidente con la distribución de hogares, el 76% del consumo final de las zonas urbanas se concentra en la zona de clima templado. Sin embargo, el 11% del consumo final de energía se encuentra en la zona fría (la cual concentra menos del 5% del total de los hogares urbanos). En gran medida este mayor consumo de energía relativo a la cantidad de hogares se relaciona con los requerimientos energéticos para calefacción y ACS, usos que tienen una correlación elevada con las bajas temperaturas.

Si se analiza la participación de usos energéticos por zona bioclimática se destaca que en el caso de la zona fría (analizado para todos los niveles educativos) el uso de calefacción representa el 71% del consumo de energía, mientras que en la zona cálida representa solo 14%. En este último caso, los principales usos reproducen a grandes rasgos la situación a nivel nacional. Se observa que a los niveles de ingreso y educación más bajos la participación relativa de la cocción y el ACS se incrementa, y también de la conservación de alimentos (en el último caso, en gran medida relacionada con la eficiencia y antigüedad de los equipamientos utilizados).

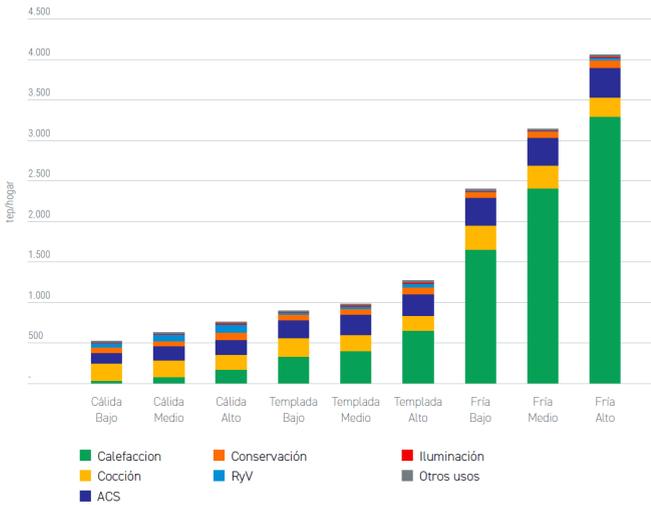
---

<sup>1</sup> Este análisis para el sector residencial urbano fue posible gracias a que desde el año 2017/2018 el INDEC quien en conjunto con la SE ha desarrollado un módulo específico para Energía dentro de la Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares (ENGHo). Esta encuesta se realizó en cerca de 45.000 viviendas de todo el país, en localidades con más de 2.000 habitantes, y la información que provee es de suma utilidad.



Fuente: Elaborado en base a datos preliminares de INDEC / SE- ENGHo 2017/2018

Figura 4 - Consumo por uso por zonas bioclimáticas y niveles



Fuente: Elaborado en base a datos preliminares de INDEC / SE- ENGHo 2017/2018

Figura 5 - Consumo por uso y por hogar por zonas bioclimáticas y niveles educativos. Año 2017 / 2018

#### 4.1 Identificación de medidas de eficiencia energética para el sector residencial

Siguiendo la metodología especificada anteriormente, se procedió a identificar cuáles podrían ser las medidas más relevantes para el sector residencial. En este caso en particular, la metodología utilizada para proponer medidas de eficiencia se basó en relevamientos y análisis de los expertos. En este sentido, luego de un proceso de propuesta por parte de los expertos y validación de aquellas más relevantes por parte de la Secretaría de Energía, se seleccionaron 22 medidas de eficiencia energética en el sector residencial, en los seis usos o servicios energéticos más relevantes: calefacción, ACS, cocción, refrigeración y ventilación, conservación de alimentos e iluminación. Estas medidas, que incluyen medidas técnicas y buenas prácticas, incorporan medidas de bajo costo (como por ejemplo las medidas de aislación de bajo costo o las acciones de uso racional) y medidas de elevado nivel de inversión (por ejemplo, las mejoras en la envolvente o el recambio de equipamiento). Todas estas medidas fueron analizadas en términos de su impacto sectorial y global.

Tabla 1 - Listado de medidas seleccionadas y validadas en el sector residencial

USO	MEDIDA
CALEFACCIÓN	Mejoras en la envolvente (Envolvente eficiente)
	Aislación medidas de bajo costo
	Control de la temperatura máxima / termostato
	Sustitución tiro balanceado convencional por tiro balanceado con termostato (GD)
	Sustitución de caldera viejas a calderas nuevas con regulación de temperatura (GD)
	Sustitución de equipamiento eléctrico (estufas eléctricas por bomba de calor)
	Acciones de Uso Racional y Eficiente (URE) de la Enegia
REFRIGERACIÓN Y VENTILACIÓN	Control de la temperatura mínima / termostato
	Promoción de ventilador / climatizador
	Recambio de equipos de Aire Acondicionado (AA) por equipos más eficientes
AGUA CALIENTE SANITARIA (ACS)	Sustitución de termostanque convencional por eficiente (EE)
	Sustitución de termostanque convencional por eficiente (GD)
	Sustitución de calefón estándar a calefón modulante eficiente (GD/GLP)
	Colector solar – complementado con termostanque a EE
	Economizador de ACS
COCCIÓN	Sustitución de anafes eléctricos por anafes a inducción
	Sustitución de cocina convencional a cocina eficiente
	Utilización de Olla térmica. Un % del uso, hornallas y cierto tipo de alimentos
	Utilización de Olla con aletas. Un % del uso, hornallas y cierto tipo de alimentos
CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS	Sustitución de equipos (heladeras y freezer) por otros más eficientes
ILUMINACIÓN	Penetración de LED
OTROS USOS TÉRMICOS	Sustitución de gas natural por electricidad en calefacción, cocción y ACS

Fuente: Bouille et al. (2021)

## 4.2 Potenciales impactos de las medidas y las acciones de política

En el marco de la propuesta del plan, se ha llevado a cabo una modelización del sistema energético nacional, bajo un enfoque sistémico, representando la dotación de recursos del país, los centros de transformación y la demanda de energía mediante el LEAP, utilizando como año base el 2017 y el horizonte de la prospectiva el año 2040. Por el lado de la demanda, se han elaborado un conjunto de escenarios basados en 91 medidas de eficiencia energética, que son propuestas para los principales sectores del consumo final (22 medidas en el Residencial, 38 medidas en la Industria y 31 medidas en el Transporte). Estas medidas fueron luego combinadas, para configurar tres escenarios que proponen diferentes grados de ambición en cuanto a su penetración: baja, media y alta ambición (BA, MA y AA respectivamente).

Los resultados de los escenarios fueron analizados en base a diferentes criterios y bajo diversas ponderaciones, estableciéndose un ranking de las medidas analizadas para cada sector del consumo final y para cada escenario. Entre los múltiples resultados cuantitativos disponibles de la modelización realizada, aquellos seleccionados por ser los más representativos para el análisis global/sistémico de las medidas fueron: la energía total evitada, las emisiones GEI totales evitadas, el costo o ahorro que implica llevar adelante la medida y la costo-efectividad relativa de la medida en términos de USD por energía evitada<sup>1</sup>.

En el caso específico del sector residencial en el escenario de AA, en el periodo 2017-2040 las 22 medidas evitan 147.922 kTtep, e implican en el año 2040 un 23,3% de energía evitada en la oferta total de energía respecto al Escenario Base. El 91% de esta energía evitada se logra con la implementación de 10 medidas: 1) Envolvente; 2) Aislación Bajo Costo; 3) Economizador; 4) Uso racional; 5) Temperatura Calefacción; 6) Sustitución Heladeras; 7) Bomba de calor; 8) Olla Térmica; 9) Termotanque Gas eficiente; 10) Olla con Aletas. A su vez, estas 10 medidas más relevantes generarían un ahorro acumulado de emisiones de 214 MM de TonCO<sub>2</sub>eq en el periodo 2017-2040 (94% del total del sector).

Sin embargo, si se consideran solo las medidas costo efectivas la energía evitada acumulada en el período asciende a 80.240 kTtep y en ese caso el listado de medidas más relevante es el siguiente: 1) Economizador; 2) Uso racional; 3) Temperatura Calefacción; 4) Sustitución Heladeras; 5) Bomba de calor; 6) Temperatura RyV; 7) Termotanque EE eficiente; 8) Termotanque Gas eficiente; 9) Calefón Modulante; 10) Olla térmica; 11) Iluminación Eficiente; 12) Colector Solar.

<sup>1</sup> Para una descripción extensa de cada uno de estos criterios ver Bouille et al. (2021).

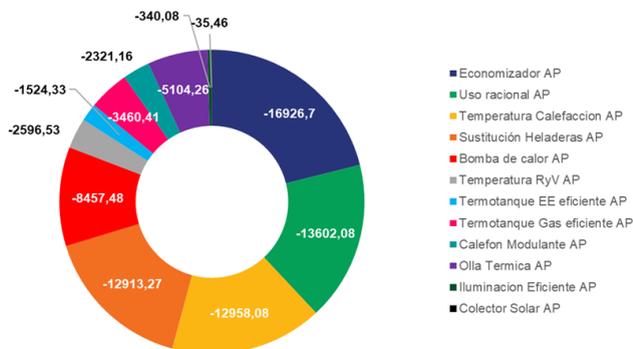
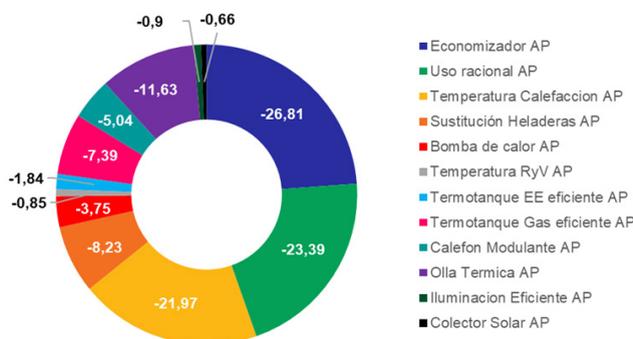


Figura 6 - Consumos evitados de energía por las medidas costo efectivas del sector Residencial. ALTA ambición. En kTtep, acumulado al 2040



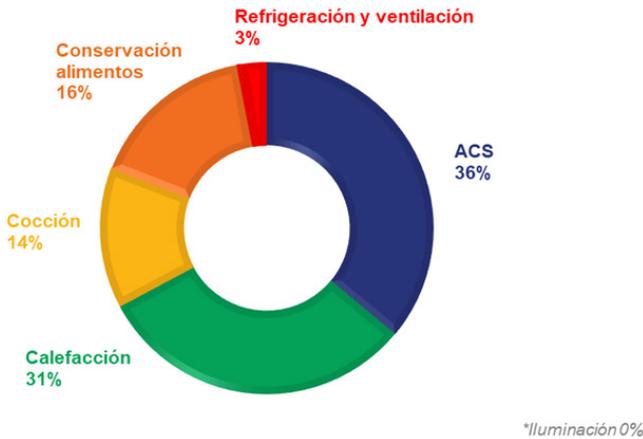
Fuente: Bouille et al. (2021)

Figura 7 - Emisiones evitadas de energía, por las medidas costo efectivas del sector Residencial. ALTA ambición. En MM TonCO2eq., acumulado al 2040

Adicionalmente, se construyó un escenario combinado con las seis medidas que más evitan energía al interior de cada uso para el sector residencial, lo que permite obtener una aproximación más realista a la energía evitada y evita solapamientos entre variables. El escenario combinado tiene una energía evitada acumulada 2017-2040 a nivel de la demanda cercana a 35.000 kTtep, lo que equivale a cerca de dos veces la demanda final de energía del sector residencial en el año 2040 en el escenario Base. Cerca del 62% de la energía evitada

corresponde a gas natural, 31% a la electricidad y 7% al gas licuado. El 72% de la energía evitada acumulada corresponde a la zona templada, el 16% a la cálida y el 12% a la zona fría.

El consumo específico de energía neta por hogar en 2040 se reduce de 0,88 tep/hogar en el escenario Base a 0,70 tep/hogar en el escenario combinado. Las emisiones evitadas acumuladas en el escenario combinado son cercanas a los 75 MM de TonCO<sub>2</sub>eq en el periodo 2017-2040. Esto equivale al 1,5% de las emisiones totales acumuladas en el periodo 2017-2040 en el escenario Base. El 77% de las emisiones evitadas acumuladas corresponde a la demanda final y el 23% a la transformación.



Fuente: Bouille et al. (2021)

Figura 8 - Estructura por uso de la energía evitada acumulada 2017-2040 en el escenario combinado a nivel de la demanda final.

### 4.3 Identificación de barreras para el desarrollo de políticas

Con el objetivo de recopilar las opiniones de algunos hogares en torno a los problemas que se enfrentan, y teniendo en cuenta las limitaciones para realizar operativos presenciales en el contexto de COVID-19, se realizó una encuesta abierta semiestructurada on line, con el objetivo de tener un sondeo de las opiniones de los usuarios residenciales<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Es importante aclarar que, al no seguir un diseño muestral estadístico, esta encuesta no presenta la representatividad ni geográfica, ni de grupos de ingresos que correspondería para ser considerada como representativa.

Se obtuvieron un total de 2.027 respuestas, principalmente concentradas en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (31%), y la Provincia de Buenos Aires (incluye interior y AMBA) (25%), seguida de Santa Fé (8%), Río Negro (8%) y Córdoba (5%). El nivel de instrucción de quienes respondieron las preguntas es principalmente Universitario (80%), Terciario (8%) y Secundario (10%). Respecto a las condiciones específicas de las viviendas de quienes respondieron a la encuesta, se observa que el 67% viven en casas y el 33% en departamentos. Del total de las viviendas, el 54% tienen una antigüedad superior a 20 años, el 25% inferior a 10 años y el 19% entre 10 y 20 años. El 77% de las respuestas provino de propietarios de las viviendas, el 24% de inquilinos, y el 3% de personas que viven en una vivienda prestada.

Entre los principales resultados obtenidos, se observa que la barrera del financiamiento es indicada como una de las barreras de mayor importancia (32% de los encuestados), en forma coincidente con lo que sucede a nivel global. En muchos de los casos los problemas suelen estar asociados no solo al financiamiento a tasas convenientes, sino a la dificultad de acceso al financiamiento. Estas barreras son relevantes para acciones relacionadas con el cambio de equipamiento, pero aún más para acciones relacionadas con las modificaciones en las viviendas. En general las barreras de financiamiento se relacionan con fallas del mercado de capitales, limitaciones a la liquidez, muchas veces relacionadas con el riesgo crediticio, los altos costos de transacción y la información asimétrica (GILLINGHAM et al., 2009; PALMER et al., 2012). El costo de las opciones ha sido indicado en segundo lugar (28%), haciendo referencia a que se trata de opciones muy costosas. Las barreras de información se mantienen también en términos generales, y en muchos de los usos en particular, como las principales barreras identificadas (11%). En este sentido se incluyen no solo las barreras sobre información referida a las acciones y potenciales en sí, sino a las barreras del propio instrumento de etiqueta de eficiencia energética. Nuevamente, esta es una de las barreras más relevantes en todo el mundo (WARD et al. 2011; NEWELL and SIIKAMÄKI 2014; DAVIS and METCALF 2016; HOUDE 2018), en especial en el sector residencial, lo que ha puesto a las campañas de información y concientización como uno de los instrumentos de primera necesidad en las políticas de eficiencia energética en el sector. Cuando los consumidores no cuentan con la información necesaria en términos de potenciales de eficiencia energética se reduce su inversión en eficiencia. Las barreras de información no incluyen solo la falta de información, sino también otros problemas como la información asimétrica y los intereses contrapuestos. En este último caso se enfrenta al conocido problema del principal agente, en donde hay intereses diferentes entre el principal (por ejemplo, un propietario que debería realizar la reforma) y el agente

(por ejemplo, el inquilino cuya factura energética es elevada si no se toman decisiones de eficiencia energética en el hogar). Finalmente, las barreras regulatorias, relacionadas con la falta de una regulación que obligue a realizar acciones de eficiencia energética, fueron indicadas como de importancia.

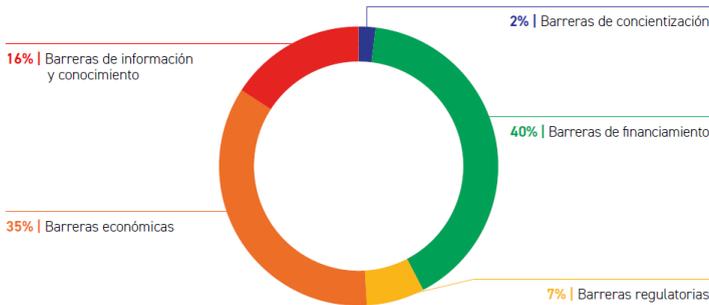


Figura 9 - Barreras a la eficiencia energética en el sector residencial argentino

#### 4.4 Propuesta de líneas estratégicas e instrumentos para remover las barreras a la eficiencia en el sector residencial

Con la información recopilada, los estudios y estimaciones, se avanzó en la propuesta de PlanEEAr, conformado principalmente por un objetivo global, apoyado en tres objetivos sectoriales, y cada uno de estos objetivos sectoriales con sus objetivos específicos, líneas estratégicas e instrumentos (tal como se ilustra en la figura siguiente). La dinámica para el armado de la propuesta se basó en un análisis de las principales medidas evaluadas para poder así agruparlas en objetivos específicos (teniendo en cuenta similitudes) y líneas estratégicas específicas. Luego, dentro de cada línea específica para promover medidas, se analizaron en detalle las barreras enfrentadas por cada una de ellas y diseñar los instrumentos de acuerdo con la barrera a remover (en este caso se presenta la dinámica mencionada esquematizando el sector transporte).



Fuente: Bouille (2021)

Figura 10 - Estructura del Plan Nacional de Eficiencia Energética para Argentina

En el caso del sector residencial, se decidió organizar el plan en torno a cinco objetivos específicos, los primeros cuatro agrupando medidas para usos/servicios energéticos y el último directamente destinado a mejorar las condiciones en hogares pobres, bajo el reconocimiento del aporte que la eficiencia energética puede hacer a la superación de la pobreza energética.



Fuente: Bouille (2021)

Figura 11 - Objetivos específicos para el plan de eficiencia energética en el sector residencial argentino

La discusión en detalle de cada una de las líneas estratégicas y los instrumentos queda fuera del alcance del presente artículo. No obstante, a modo de ejemplo puede recorrerse el camino de política propuesto para poner en marcha la medida de recambio de heladeras. En este caso, los instrumentos para la promoción se encuentran debajo del Objetivo Específico R2: Incrementar los niveles mínimos de performance energética del parque de electro y gasodomésticos en el sector residencial. Este objetivo se compone de tres líneas estratégicas y sus instrumentos que podrían ser implementadas en conjunto o en forma independiente (con diferentes resultados finales): LE R2.1: Implementar sistemas de revisión de etiquetados; LE R2.2: Implementar sistemas de mejoras y revisión de MEPs; y LE R2.3: Implementar programas de sustitución de equipamientos para calefacción, RyV, cocción, ACS, y conservación de alimentos.

En el caso particular de la LE R2.3, se han propuesto al menos cuatro instrumentos para incentivar al recambio de heladeras: Marco regulatorio del programa de recambio de artefactos domésticos; Incen-

tivos fiscales y de financiamiento a proveedores de tecnología; Bono de recambio para el equipo; Incentivo de financiamiento (atado) al comprador. Todos estos instrumentos deberían ser implementados si se quiere remover las barreras identificadas para esta medida. Por ejemplo, en el caso del primer instrumento, el diseño de un marco regulatorio para el recambio es fundamental y requiere de acciones relacionadas a implementar el esquema de quita de mercado de los equipos antiguos (o chatarrización), sin el cual se tiene un elevado riesgo de producir un efecto rebote<sup>1</sup>, duplicando artefactos en un mismo uso a causa de un bajo impacto económico para el usuario. De similar forma, los instrumentos de bono de recambio o de financiamiento deben estar necesariamente ligados a la eficiencia del equipo (MEPs determinados y nivel de eficiencia en la etiqueta) para asegurar el ingreso de equipos eficientes. Para la concreción de cada instrumento se proponen varias acciones complementarias de diferente alcance y profundidad, la mayoría de ellas orientadas a la elaboración de materiales didácticos y esquemas de capacitación a todo nivel; selección de sujetos obligados (industrias energo intensivas o grandes consumidoras), ó de sectores, y/o regiones de relevancia.

Finalmente, cada instrumento tiene un plazo de ejecución, lo que permite elaborar un cronograma aproximado para iniciar la discusión/aplicación de cada parte del plan, con el conjunto de actores involucrados. La diversidad de actores que participan en esas acciones muestra la complejidad de los procesos de políticas en los que se requiere consenso y/o compromiso de las partes implicadas.

Los siguientes cuadros muestran los objetivos específicos, las líneas estratégicas, los instrumentos y los plazos de ejecución para cada uno de los cinco objetivos propuestos para el plan de eficiencia energética residencial, en base a los resultados de las medidas y los análisis de las barreras enfrentadas.

---

<sup>1</sup> Este fenómeno indicado por primera vez por Jevons (1990) se refiere a situaciones en las cuales la reducción del consumo de energía o de las emisiones (en relación con una línea de base) asociada a la aplicación de medidas en una jurisdicción se ve compensada por los cambios inducidos en el consumo, la producción y los precios dentro de la misma jurisdicción.

Tabla 2 - Listado de medidas seleccionadas y validadas en el sector residencial

		CP	MP	LP
<b>OBJETIVO ESTRATÉGICO R1:</b> Mejorar los niveles de información y concientización, de la población respecto a las acciones de eficiencia energética en los hogares	R1.1: Desarrollar estrategias de información y concientización sobre las opciones tecnológicas y de consumo racional en los hogares			
	Campañas de difusión e información (instrumento de información y concientización)			
	LE R2.1: Implementar un programa de revisión, evaluación, mejora y actualización periódica del sistema de etiquetado de artefactos domésticos			
	Capacitación a los vendedores y distribuidores (instrumento de capacitación educación y entrenamiento / bienes públicos)			
	Etiquetas de eficiencia energética (instrumento de información y concientización).			
	LE R2.2: Establecer un programa de mejora y fortalecimiento del esquema de estándares de eficiencia (MEPs) en los artefactos de uso doméstico			
	Actualizar MEPs (instrumento regulatorio / comando y control)			
	LE R2.3: Implementar programas de sustitución de equipamientos para calefacción, RyV, cocción, ACS, y conservación de alimentos			
	Marco regulatorio del programa de recambio de artefactos domésticos (instrumento regulatorio / comando y control)			
	Incentivos fiscales y de financiamiento a proveedores de tecnología (económico / de financiamiento)			
Bono de recambio para el equipo (instrumento económico)				
Incentivo de financiamiento (atado) al comprador (instrumento económico / de financiamiento)				
<b>OBJETIVO ESTRATÉGICO R3:</b> Promover la eficiencia energética en los servicios de acondicionamiento térmico en el sector residencial (calefacción y refrigeración con impacto adicional sobre el uso de ACS) mejorando las condiciones de aislamiento térmico en base a las necesidades energéticas de cada biorregión del país mediante acciones de bajo y alto impacto.	LE R3.1: Establecer un programa orientado a acciones de aislamiento de las viviendas existentes en base a las condiciones bioclimáticas de los diferentes hogares			
	Campañas de difusión e información (instrumento de información y concientización)			
	Esquemas de financiamiento (instrumento económico / financiamiento)			
	Programas piloto de auditorías energéticas en viviendas existentes (instrumento de información y concientización)			
	LE R3.2: Establecer un programa integral construcción energéticamente eficiente para viviendas nuevas			
	Programas piloto de capacitación a certificadoros (instrumento de capacitación educación y entrenamiento / bienes públicos).			
	Etiqueta de eficiencia energética en viviendas (instrumento de información y concientización)			
	Capacitación a profesionales de los municipios (capacitación educación y entrenamiento / bienes públicos).			
	Capacitación a cámaras inmobiliarias (capacitación educación y entrenamiento / bienes públicos)			
	Programas públicos de financiamiento (instrumentos económicos / financiamiento)			
Programas privados de financiamiento (instrumentos económicos / financiamiento)				
LE R3.3: Crear un centro nacional de información y conocimiento referido a la construcción energéticamente eficiente y sustentable en Argentina				
Proyectos demostrativos / pilotos de construcción eficiente (información y concientización)				
Acuerdos voluntarios con proveedores de materiales y servicios de construcción (acciones voluntarias)				
Estándares y etiquetado voluntario de materiales (instrumento de información)				
<b>OBJETIVO ESTRATÉGICO R4:</b> Promover un uso eficiente de la energía en el sector residencial mediante medidas de uso racional de la energía e incorporación de tecnologías eficientes de bajo costo y sustitución de fuente.	LE R 4.1: Realizar una revisión y reestructuración tarifaria tendiente al logro de eficiencia energética			
	LE R 4.2: Desarrollar un programa de uso racional y eficiente de la calefacción y refrigeración en los hogares			
	Campañas de concientización e información (información y concientización)			
	Obligación de incorporar termostatos (regulación / comando y control)			
	Marco regulatorio para edificios de propiedad horizontal (regulatorio / comando y control)			
	LE R4.3: Implementar un programa de utilización de ventiladores y climatizadores para el alcance de niveles de confort térmico en algunas regiones del país			
	Campañas de información y difusión (instrumento de información y concientización)			
	LE R4.4: Desarrollar un programa para la promoción de colectores solares acompañados de calefones modulantes			
	Revisión y mejora de la normativa y regulación (regulación / comando y control)			
	Capacitación a técnicos para el mantenimiento (capacitación educación y entrenamiento / bienes públicos)			
Acuerdos público privados con los proveedores de la tecnología (acciones voluntarias)				
Esquemas de reducciones impositivas a los equipos (instrumentos económicos)				
LE R4.5: Incorporación de alternativas de cocción eficientes a partir de la utilización o reemplazo de ollas				
Campañas de difusión e información (información y concientización)				
Acuerdos público privados con proveedores de ollas (acciones voluntarias)				
<b>OE R5:</b> Mejorar las condiciones de consumo y eficiencia energética en viviendas de hogares de menores niveles de ingreso para contribuir al objetivo de eficiencia energética general, a las mejoras de la calidad de vida de la población y alivio de las condiciones de pobreza energética	LE R5.1: Diseñar y evaluar un programa regularización de la conexión de usuarios pertenecientes a hogares en situación de vulnerabilidad socioeconómica a la red eléctrica en ciudades de diferentes regiones bioclimáticas del país.			
	Proyectos piloto de regularización de conexión (instrumentos de información y concientización)			
	LE R5.2: Implementar un conjunto de proyectos piloto de capacitación y auditorías energéticas en viviendas existentes en asentamientos y zonas periurbanas			
	Proyectos piloto de auditorías gratuitas y entrega de kits (instrumentos de información y concientización)			
	Capacitación a personas en situación de desempleo (capacitación educación y entrenamiento / bienes públicos)			
	LE R5.3: Incluir criterios de eficiencia energética en viviendas sociales			
Normativa sobre eficiencia energética en las viviendas sociales (regulatorios / comando y control)				
Provisión gratuita de equipos básicos en las viviendas (luminarias LED cocinas, calefones, estufas, etc.) (instrumento económico)				
Financiamiento subsidiado (instrumentos económicos / de financiamiento)				

Fuente: Bouille et al. (2021)

## 5. PRINCIPALES DESAFÍOS Y LECCIONES APRENDIDAS

Este artículo tiene como objetivo principal resaltar la necesidad e importancia de desarrollar planes de eficiencia energética que contengan instrumentos de política para promover dichas acciones, ilustrando mediante un caso de estudio la aplicación de una metodología específica para su desarrollo. El caso de estudio seleccionado ha sido la elaboración del plan para el sector residencial, un capítulo específico de la elaboración de la propuesta de Plan Nacional de Eficiencia Energética para Argentina.

En el caso especial del sector residencial, se han simulado 22 medidas/acciones aplicables en Argentina, cuyo impacto a lo largo del sistema fue evaluado con una herramienta de prospectiva energética sistémica. Con los resultados obtenidos fue posible comparar las medidas en términos de requerimientos energéticos totales, de emisiones evitadas así como estimar un costo-beneficio económico resultante de su implementación. Finalmente, sobre la base de la información de las medidas y las barreras que cada una de ellas enfrenta en Argentina, se trazó un camino crítico, compuesto por objetivos específicos, líneas estratégicas, instrumentos y acciones, que el sector público podría seguir para promover las medidas seleccionadas.

El PlanEEAr es una herramienta que ofrece al decisor las principales pautas para el desarrollo de una política de eficiencia energética, con una desagregación importante sobre los sectores priorizados, las potencialidades de eficiencia en cada uno, los diferentes niveles de inversión en medidas posibles para lograr esa eficiencia, y las formas de abordarlas (instrumentos), actores a involucrar, y los plazos estimados para su ejecución. Sin embargo, existen fuertes barreras para su implementación.

Por ello, teniendo en cuenta la importancia que la implementación de las acciones tiene, y sobre el reconocimiento de que suelen existir problemas para pasar de la teoría a la acción, se propone en el futuro analizar la gestión del conocimiento llevada a cabo en las actividades realizadas en el PlanEEAr a partir del relevamiento de los modelos implementados para la gestión del conocimiento en organizaciones, y analizarlos, apuntando así a mejorar y el proceso de toma de decisiones de las autoridades responsables.

## REFERENCIAS

- AGGIO, C.; LENGYEL, M.; MILESI, D. Y PANDOLFO, L. 2017. Desafíos y oportunidades de innovación en la producción de Petróleo y Gas No Convencionales en la Argentina. Documento de Trabajo Nº 10.
- ALKEMADE, F.; SUURS, R. A. A. 2012. Patterns of expectations for emerging sustainable technologies. 19 Technol. Forecast. Soc. Change, 79(3), 448–456.
- BARRERA, M.A.; SERRANI, E. C. 2018. Energía y restricción externa en la Argentina reciente; Instituto Argentino para el Desarrollo Económico; Realidad Económica; 47; 315; 5-2018; 9-45.
- BOUILLE, D.; BEHNISCH, A.; BRAVO, G.; DI SBROIIVACCA, N.; DUBROVSKY, H.; LALLANA, F.; NADAL, G.; PISTONESI, H.; RECALDE, M.; ROMANO, A.; RUCHANSKY, B.; SAGARDOY, I.; LANDAVERI, R. 2021. Informe final de la propuesta del Plan Nacional de Eficiencia Energética
- ARGENTINA (PlaNEEAR). Proyecto de Eficiencia Energética Argentina. GFA Consulting Group. Disponible en: <https://www.eficienciaenergetica.net.ar/publicaciones.php>
- BRAVO, V.; DI SBROIIVACCA, N. 2021. Oil and Natural Gas Economy in Argentina: The Case of Fracking. The Latin American Studies Book Series. Springer Nature Switzerland AG.
- DAVIS, L. W.; METCALF, G. E. 2016. Does better information Lead to better choices? Evidence from energy-efficiency labels. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 3(3), 589–625.
- ESTACHE, A.; KAUFMANN, M. 2011. Theory and evidence on the economics of energy efficiency. Lessons for the Belgian building sector. Reflets et perspectives de la vie économique, tome I (3), 133-148. doi:10.3917/rpve.503.0133.
- GRUBB, M.; MCDOWALL, W.; DRUMMOND, P. 2017. On order and complexity in innovations systems: Conceptual frameworks for policy mixes in sustainability transitions. Energy Research & Social Science 33 (2017) 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.016>.
- HABERMACHER, F.P.; LEHMANN, F.; HABERMACHER; LEHMANN, P. 2020. Commitment Versus Discretion in 40 Climate and Energy Policy H23 · Q42 · Q48 · Q54 · Q58. Environ. Resour. Econ., 76, 39–67, 41.

HELM, D.; HEPBURNAND, C.; MASH, R. 2003. Credible Carbon Policy. *Oxford Rev. Econ. Policy*, 19(3), 438–41 450.

HOUDE, S. 2018. How consumers respond to product certification and the value of energy information. *RAND Journal of Economics*, 49(2), 453–477.

JACOBSSON, S.; BERGEK, A.; SANDÉN, B. 2017. Improving the European Commission's analytical base for designing instrument mixes in the energy sector: Market failures versus system weaknesses. *Energy Research & Social Science* 33 (2017) 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.009>.

KERN, F.; KIVIMAA, P.; MARTISKAINEN, M. 2017. Policy packaging or policy patching? The development of complex energy efficiency policy mixes, *Energy Research & Social Science* 23, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.11.002>.

LANDRISCRINI, G. 2019. Hidrocarburos de reservorios no convencionales en la cuenca Neuquina. El desarrollo de Vaca Muerta.

MUNDA, G.; NIJKAMP, P.; RIETVELD, P. 1994. Qualitative multicriteria evaluation for environmental management. *Ecological Economics* 10, 97-112.

NEWELL, R. G.; SIIKAMÄKI, J. 2014) Nudging energy efficiency behavior: the role of information labels. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(4), 555–598.

PACHECO, J. F.; CONTRERAS, E. 2008. Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos. CEPAL.

PURKUS, A.; GAWEL, E.; THRÄN, D. 2017. Addressing uncertainty in decarbonisation policy mixes – Lessons learned from German and European bioenergy policy. *Energy Research & Social Science* 33 (2017) 82–94.

ROSENOW, J.; FAWCETT, T.; EYRE, N.; OIKONOMOU, V. 2016. Energy efficiency and the policy mix, *Building Research & Information*, 44 (5-6), 562-574. DOI: 10.1080/09613218.2016.1138803.

ROSENOW, J.; KERN, F.; ROGGE, K. 2017. The need for comprehensive and well targeted instrument mixes to stimulate energy transitions: The case of energy efficiency policy. *Energy Research & Social Science*, Volume 33, November 2017, 95-104.

WARD, D. O.; CLARK, C. D.; JENSEN, K. L.; YEN, S. T.; RUSSELL, C. S. 2011. Factors influencing willingness-to-pay for the ENERGY STAR® label. *Energy Policy*, 39(3), 1450–1458

## **CLEAN ENERGY TRANSITION IN PERU: A GREEN HYDROGEN PERSPECTIVE**

Cesar Celis<sup>1</sup>  
Ronald Mas<sup>1</sup>  
Daniel Marcelo<sup>2</sup>  
Marlon Max H. Bellido<sup>3</sup>

*<sup>1</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú*

*<sup>2</sup>Universidad de Piura*

*<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro*

DOI: 10.47168/rbe.v28i3.782

### **ABSTRACT**

For anyone concerned about climate change, fostering the energy transition from fossil-based to low- or zero-carbon energy sources is a must. In this context, this work provides a brief overview of the clean energy transition in Peru, accounting for a green hydrogen perspective. Accordingly, after the corresponding introduction to the subject, the current situation of renewable energies in Peru is highlighted, along with their historical evolution during the last two decades or so, and the prospects for these more environmentally friendly energy sources in the following years. Next, the potential for renewable energy production in Peru is discussed, with especial emphasis on hydropower, wind, solar, and biomass. Finally, green hydrogen and its potential to contribute to the energy transition in Peru is addressed. A particular emphasis is put in this case on the production of green hydrogen and its applications in Peru and worldwide. From the discussions carried out in this work, it is concluded that, although Peru has a large potential to become a green hydrogen producing and exporting country, there is still a long way to go before Peru can achieve the desired carbon neutrality in the coming decades.

Keywords: Clean energy transition; Renewable energy; Wind energy; Solar energy; Biomass; Green hydrogen.

### **RESUMO**

Para qualquer pessoa preocupada com as mudanças climáticas, é essencial promover a transição energética de fontes de energia

baseadas em fósseis para fontes de baixo ou zero carbono. Nesse contexto, este trabalho fornece uma breve visão geral da transição para energia limpa no Peru, focando em uma perspectiva do hidrogênio verde. Assim, após a correspondente introdução ao tema, destaca-se a situação atual das energias renováveis no Peru, sua evolução histórica nas últimas duas décadas e as perspectivas para essas fontes de energia mais ecológicas nos próximos anos. Em seguida, discute-se o potencial de produção de energia renovável no Peru, com ênfase especial em energia hidrelétrica, eólica, solar e biomassa. Por fim, aborda-se o hidrogênio verde e seu potencial para contribuir com a transição energética no Peru. Uma ênfase particular é colocada na produção de hidrogênio verde e suas aplicações no Peru e no mundo. A partir das discussões realizadas neste trabalho, conclui-se que, embora o Peru tenha um grande potencial para se tornar um país produtor e exportador de hidrogênio verde, ainda há um longo caminho a percorrer para que o Peru alcance a desejada neutralidade carbônica nas próximas décadas.

Palavras-chave: Transição para energia limpa; Energia renovável; Energia eólica; Energia solar; Biomassa; Hidrogênio verde.

## 1. INTRODUCTION

The catastrophic threats that humanity may face due to climate change have been documented on numerous occasions in the past (RIPPLE et al., 2020). In addition, since about three-quarters of the emissions that pushed global average temperatures 1.1°C higher than that of the pre-industrial age have been attributed to the energy sector (IEA, 2021a), any solution to the climate change problem must include this sector. Furthermore, in modern society, energy consumption and human well-being are directly related to each other (INTERACADEMY COUNCIL, 2007; IEA, 2021a). Therefore, considering that by 2050 the world population will increase by about 2 billion people (IEA, 2021a) and that there will be a greater number of people with higher incomes who will demand for additional energy services, it is natural to expect that world energy demand will increase as well. The question now is how to meet this additional energy demand without further exacerbating the climate change problem. In this context, the progressive increase in the use renewable energy sources and more environmentally friendly energy production-related technologies is key.

Currently, in most countries, including Peru, energy production comes from burning natural gas and other hydrocarbon-based fuels. Renewable energies such, as solar or wind represent only a small percentage of the energy matrix. What it is interesting in the Peruvian electricity matrix, indeed, is that at the beginning of this century about

93% of the country's total energy was produced from hydropower, 4% from natural gas, and 3% from other sources, including diesel and carbon (OSINERGMIN, 2019). However, in 2018, 55% of the total electricity came from hydropower and 37% from natural gas. Since during the past two decades the annual growth rate of the total energy produced in Peru was about 7% (OSINERGMIN, 2019), this means that most of the increase in energy demand during this period was covered by natural gas. Although in terms of gaseous emissions natural gas is cleaner than diesel and carbon, this implies that CO<sub>2</sub> emissions associated with energy generation in Peru increased significantly during the last twenty years or so. Notice that, in 2018, the share of renewable energies (different from hydropower) in the Peruvian energy matrix was about 7.2% (OSINERGMIN, 2019). Although this share is still small, it represents an advance in terms of use of renewable energy sources because in 2008 this share was 0%.

The potential to produce renewable energy in Peru is relatively large. For instance, for hydropower, solar, and wind, this potential represents about 70, 25, and 20 GW, respectively (OSINERGMIN, 2019). Nevertheless, only about 7.1, 1.1, and 1.8% of this potential is currently utilized. There is a big room then to keep increasing the share of renewable energies in the Peruvian energy matrix. One of the drawbacks of some renewable energy sources, such as wind or solar, is their variability with weather conditions and time of the day (year). A solution to this issue is to use these renewable energy sources to produce hydrogen that can be stored and used when the wind or sun is not available. When involving renewable sources, water electrolysis is the main technology used for producing the so-called 'green' hydrogen. As previously reported (NIKOLAIDIS and POULLIKKAS, 2017; YODWONG et al., 2020), hydrogen production via water electrolysis is a promising technology. Electrolysis can be carried out indeed at both high and low temperatures, but the latter is the most widely used type of electrolysis nowadays (NIKOLAIDIS and POULLIKKAS, 2017). Thus, this specific hydrogen production technology will be accounted for in the discussions carried out in this work.

It is worth noticing here that, as highlighted in the WEO (World Energy Outlook) 2021 (IEA, 2021a), the tomorrow's energy economy is expected to be very different from the one currently in place. In particular, because of the ongoing global decarbonizing process, human society is expected to increasingly meet its energy needs with electricity. As shown in Figure 1, indeed, according to the different long-term scenarios accounted for in the original work (IEA, 2021a) used as reference here, (i) STEPS (Stated Policies Scenario), (ii) APS (Announced Pledges Scenario), and (iii) NZE (Net Zero Emissions by 2050), electricity usage is expected to increase up to 50% by 2050. Similarly, by 2050, the share of (variable) renewable energy sources in

electricity generation is also expected to increase between 40 to 70%, which is well above the current 10% value (Figure 1). In addition, contrarily to what happens today, the future energy system is expected to involve much more complex interactions between fuels (solid, liquid, and gaseous) and electricity. For instance, according to the NZE by 2050, around 40% of primary energy is expected to be converted at least twice before reaching end-users (IEA, 2021a). That is, energy is expected to travel through batteries, electrolyzers, and fuel cells undergoing conversions from electricity to heat or fuels, and vice versa. In this sense, low- or zero-carbon (green) hydrogen is expected to be key to helping manage the imbalances between variable energy supply and demand.

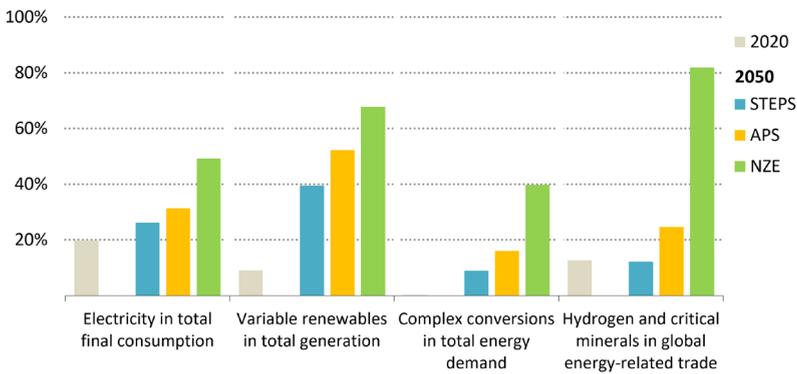


Figure 1 - Current and future indicators of energy systems (IEA, 2021a)

Naturally, the clean energy transition to an energy economy where electricity and renewable energy sources play a key role is also expected to significantly change the energy-related trade patterns, which have long been dominated by fossil fuels. Thus, as shown in Figure 1, the share in global energy-related trade of low-carbon hydrogen and critical minerals like lithium, an essential material to manufacture batteries, is expected to increase up 80% by 2050 (NZE). In this context, Peru has a big opportunity to become a key player in the future energy economy. This is true because Peru has both a huge potential to produce renewable energies and a long coastline with access to seawater, which represent the basic ingredients to generate large amounts of green hydrogen. Eventually, this produced hydrogen can be used not only for local consumption, but also for export to other countries. Similarly, the recent discovery of a vast deposit of lithium in Peru's southern region of Puno (NUNEZ-PALOMINO, 2020) also represents a big opportunity for the country to diversify and multiply its incomes

from natural resources, and to become a lithium exporter country, such as Chile and Argentina. Of course, exporting lithium raw material is not enough. Local technology needs to be developed and expertise needs to be built up to produce lithium batteries, and to create more employment opportunities and increase the country's incomes. In this sense, cooperation agreements such as the one signed between PUCP and H2 Peru (EYNG, 2021) are welcome because they will allow the training of the high-level professionals who will make the expected clean energy transition a reality in the country.

Accordingly, in this work, accounting for a green hydrogen perspective, an overview of clean energy transition in Peru is provided. Thus, after this introduction, in Section 2 the current situation of renewable energies in Peru is highlighted, along with their historical evolution during the last two decades or so, and the prospects for these energy sources in the coming years. Next, in Section 3 the potential for renewable energy production in Peru is discussed, with especial emphasis on hydropower, wind, solar, and biomass. Section 4 focuses in turn on green hydrogen and its potential to contribute to the clean energy transition in Peru. A particular emphasis is put in this section on the production of green hydrogen and its applications in Peru and worldwide. Finally, some final remarks are summarized in Section 5.

## **2. RENEWABLE ENERGY IN PERU**

In this section, the current situation of renewable energies in Peru is highlighted. This is complemented with the historical evolution of these environmentally friendly energy sources during the last two decades or so, and their prospects for the coming years.

### **2.1 Historical evolution**

As a result of the first auction involving renewable energy resources (RER) carried out by the Peruvian Energy and Mining Investment Supervisory Agency (OSINERGMIN), non-conventional renewable sources (solar, wind, and biomass) started playing a role in the Peruvian energy mix around 2009 and 2010. At that time, the first photovoltaic plants were awarded, including Tacna Solar (20 MW), Majes Solar 20T (20 MW), Panamericana Solar (20 MW), and Grupo T Solar Global S.A. (20 MW). In addition to the referred solar projects, in this first auction, wind and biomass projects were also awarded. More specifically, three wind power plants, (i) Talara (30 MW), (ii) Marcona (32 MW), and (iii) Cupisnique (80 MW), and two biomass ones, (i) Paramonga I Cogeneration Biomass Power Plant (23 MW) and (ii) Huaycoloro Biomass Power Plant (4.4 MW) were awarded (OSINERGMIN, 2019). The refer-

red first auction covered 430 MW, representing 87% of the auctioned demand (OSINERGMIN, 2019). Notice that the entry into operation of the Huaycoloro power plant in 2011 represented the starting point of the use of RER in the Peruvian National Interconnected Electric System (SEIN) (BNE, 2019). Since the end of the first energy auction in 2010, until 2019, three additional auctions were held, which allowed increasing the presence of renewable generating plants in the SEIN. This occurred because several of the projects awarded in these four auctions progressively came into operation (OSINERGMIN, 2019).

Accordingly, Figure 2 highlights the historical evolution of both the installed capacity and the electric generation by source in Peru during this century. Accounting for the electric generation, specifically, it is noticed from this figure that since 2010 or so the share of non-conventional renewable sources in the Peruvian electricity matrix progressively increased. Nevertheless, it is also observed that the generation of electric energy using non-renewable sources-based power plants did so as well. This occurred due to the increase in electricity demand, which during the period under analysis grew at an average annual rate of 6% (MENDIOLA et al., 2012). To meet this additional demand, it was necessary to increase the electricity production in Peru. In particular, due to the availability of large amounts of natural gas from Camisea, in this period, thermoelectric power plants featured the highest average growth rate, 20%. Hydroelectric power plants in turn grew at an average rate of 1% only (MENDIOLA et al., 2012). In 2020, because of the pandemic caused by the Coronavirus, compared to the previous year, the electricity energy demand decreased by 29% (BID, 2022).

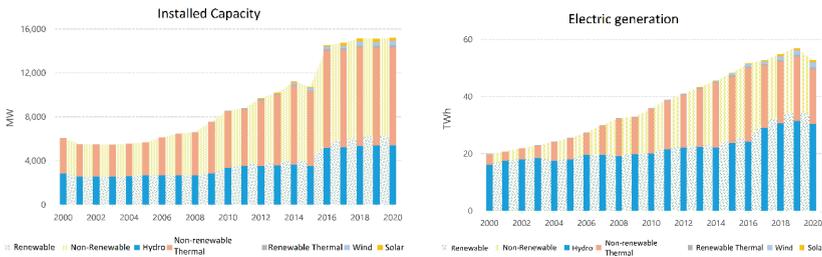


Figure 2 - Evolution of installed capacity (left) and electric generation (right) by source in Peru (adapted from OLADE, 2021)

## 2.2 Current situation

According to the International Energy Agency (IEA), the world energy matrix is currently based on fossil fuels. For instance, in 2019 the share of fossil fuels (oil, natural gas, and coal) in the world energy

mix was 80.9%, followed by biofuels and waste with 9.4% (IEA, 2021). Comparatively, in Peru, in the same year, the share of fossil fuels in the Peruvian energy mix was 64.2% and of electric energy 20.5% (BNE, 2019). From the total amount of electric energy generated in Peru in 2019, 39.78% (22.644 TWh) came from non-renewable thermal and 55.2% (31.485 TWh) from hydropower (BNE, 2019). In 2020, in turn, as shown in Figure 3, the installed capacity and electric generation in Peru was 15.2 GW and 52.7 TWh, respectively. These values include all generation sources, renewable and non-renewable. Figure 3 highlights particularly that, although in percentage terms the installed capacity of non-renewable thermal is higher than the one associated with hydropower (58.57% vs 35.64%), when come to electricity production the share of hydropower (57.85%) is higher than that corresponding to non-renewable thermal (36.22%). Operating costs are one the main drivers for this outcome. Regarding renewable energy sources, in 2020 the share of wind, solar and renewable thermal was 5.79% in terms of installed capacity and 5.94% in terms of electric generation.

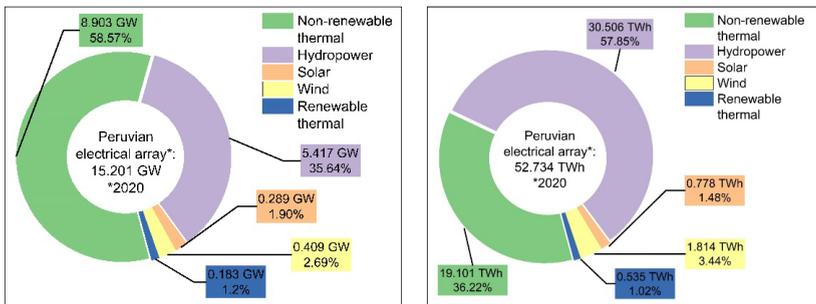


Figure 3 - 2020 installed capacity (left) and electric generation (right) in Peru (data taken from OLADE, 2021)

It is worth emphasizing here that Peru has not yet considered small-scale grid-connected or off-grid power generation systems. Notice here that microgeneration includes power generation systems featuring installed capacities of less than 200 kW, and medium distributed generation ones between 200 kW and 10 MW (OSINERGMIN, 2019). Indeed, even though the potential to develop this type of power generation ones between 200 kW and 10 MW (OSINERGMIN, 2019). Indeed, even though the potential to develop this type of power generation systems in Peru (especially those based on solar energy) is relatively large, there is no legal framework to promote and regulate them. However, in various regions of the country several projects (of the

type mini solar on-grid, in particular) are being developed in an isolated manner. For instance, there are photovoltaic systems of 12 kWp and 14 kWp in bank offices in the neighborhoods of Lima (Metropolitan area) and Canto Grande, respectively, a 60 kWp photovoltaic system in a supermarket in Trujillo city, and a 40 kWp photovoltaic system in a cotton production company in the Ica region (NOVUM, 2021).

In addition to on-grid systems, the Peruvian Ministry of Energy and Mines (MINEM) has been developing mass electrification programs through the installation of off-grid photovoltaic systems in isolated communities (MINEM, 2021). For instance, the Mass Photovoltaic Program, under the responsibility of the MINEM General Directorate of Rural Electrification (DGER), aims to benefit 48 thousand rural homes in the regions of Amazonas, Ancash, Cajamarca, La Libertad, Lambayeque, Loreto, Piura, San Martín, and Tumbes (MINEM, 2021). At the same time, MINEM, through Electro Ucayali, a state-owned power generation and distribution company, and the private sector, in October 2020 commissioned the Atalaya solar power plant (500 kWp) located in the Ucayali region (MINEM, 2021). As emphasized above, the lack of a legal framework to regulate small and medium-scale solar panels-based power generation systems has been preventing Peru from developing them and taking advantage of the socio-economic benefits they represent. This highlights of course the need for the Peruvian government agencies in charge of promoting their implementation and regulation to take concrete measures in this regard.

Finally, as highlighted in Section 2.1, until 2019 four auctions based on RER were held in Peru. Consequently, by January 2022, 32 renewable power plants were in operation, representing an installed capacity of 881.3 MW (GESTIÓN, 2022). With these figures, in 2022 the share of renewable sources in the Peruvian electricity mix reached 5.5%. In addition, with the start-up of four new projects, it is estimated that this year the electricity production from wind and solar power plants will grow by 0.1% and 57.6%, respectively (GESTIÓN, 2022).

### **2.3 Forecast**

To mitigate the impacts of climate change, the Peruvian Ministry of Environment (MINAM), through the Supreme Decree N° 003-2022 MINAM (DS N°003-2022 MINAM, 2022), has been promoting the use of renewable sources in the country. The goal is to reach a 20% share of non-conventional renewable sources in the Peruvian electricity matrix by 2030 (PERU ENERGIA, 2022). To achieve this goal, the governmental institutions involved are encouraged to take actions and to promote the use of RER. In the case of the Ministry of Economy and Finance (MEF), some of its responsibilities involves the evaluation of existing budgets to achieve compliance with the provisions of the Climate

Change Law Nº 30754, articles 7 and 8. In the case of MINEM, this governmental institution should prioritize, within its competencies, the design of programs for the development of new technologies such as those based on green hydrogen, for example. With this initiative, green hydrogen will be a clean energy source to be included in the Peruvian electricity matrix in the medium and long terms (DS Nº003-2022, 2022).

In terms of forecast, based on the reduction in greenhouse gas (GHG) emissions, the international consulting company Deloitte has made a projection (DELOITTE, 2021) for the Peruvian electric generation, including renewable energy sources, up to the year 2050. This projection includes two scenarios, (i) Increased Ambition and (ii) Green Development. The referred scenarios represent alternative horizons and involve, respectively, reductions in GHG emissions of 42% and 100% with respect to the amount of GHG emissions projected under the business-as-usual scenario. In the first scenario, mitigation measures and changes in the energy matrix, which maximize the potential in all sectors based on the unconditional national contributions proposed by the government, are accounted for. The second one, in turn, introduces mitigation policies and changes in the energy matrix focused at maximizing the benefits of decarbonization in a context of international support. Figure 4 summarizes the projections of electricity generation carried out accounting for both scenarios.

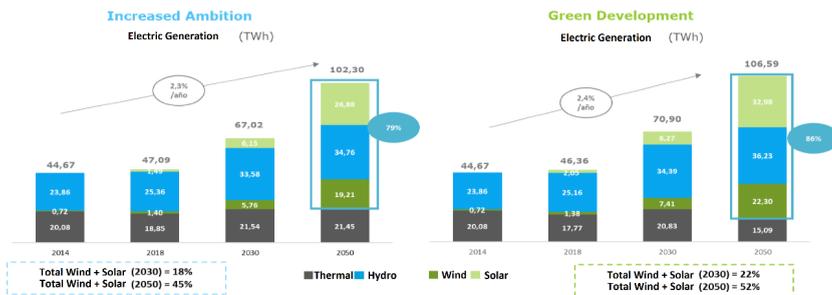


Figure 4 - Projected growth of electric generation in Peru until 2050 (adapted from DELOITTE, 2021)

As shown in Figure 4, both scenarios, Increased Ambition and Green Development, project annual electricity generation growth rates of about 2.3 to 2.4%. By 2050, thus, it is estimated that the share of renewable sources, including hydropower, in the Peruvian electricity mix will be 79% or more. In addition, both scenarios indicate that the use of non-renewable sources (thermal) to generate electricity increases until 2030 and then decreases by 2050. These decreases are of course

larger in the Green Development scenario. Finally, notice that the second scenario (Green Development) aligns better with the goal that the Peruvian government has for 2030, which involves increasing the share of non-conventional renewable sources such as wind and solar in the Peruvian electricity matrix up to 20% (DELOITTE, 2021).

### 3. POTENTIAL FOR RENEWABLE ENERGY PRODUCTION IN PERU

This section discusses the potential for renewable energy production in Peru. Notice first that, according to the Peruvian Legislative Decree N° 1002, renewable energy resources (RER) include biomass, wind, solar, geothermal, tidal energy and mini-hydraulic (whose installed capacity does not exceed 20 MW) energy. Therefore, an especial emphasis is put in this section on (mini) hydropower, wind, solar, and biomass. Before going into detail about the different RER types, it is worth noticing here that in this section the term ‘installed power’ refers to the sum of the power capacities that can be delivered at each power plant under ideal conditions. Accordingly, Figure 5 shows the temporal evolution of the installed power of RER power plants in Peru during the period 2008-2018. Notice that during this period, the installed power of RER power plants grew at an annual rate of 9.34%, representing 7.9% of the total installed power in 2018 (OSINERGMIN, 2019).

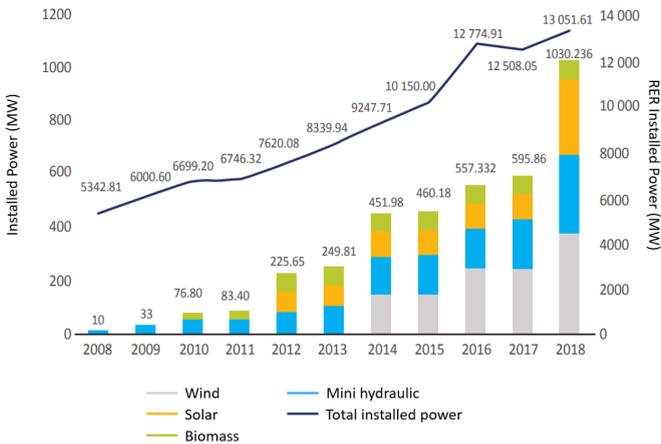


Figure 5 - Installed power evolution of RER power plants (OSINERGMIN, 2019)

### 3.1 Hydropower

The main energy resource in Peru is hydropower with a potential of 69,445 MW (MINEM, 2011). For this reason, Peru is considered a traditional hydroelectric country. Nevertheless, as indicated at the beginning of this third section, for renewable energy concepts, only mini-hydro power plants (installed capacity  $\leq 20$  MW) are accounted for. Accordingly, by 2018 a total of 25 of these mini hydroelectric plants were registered in the country, mainly located in Lima, Junín, and Cajamarca. For the referred year, the total installed power was of 298.86 MW and the electric production of 1,290.9 GWh (OSINERGMIN, 2019). The location and power capacity of the mini-hydropower plants in operation in the country by 2018 is shown in Figure 6.



Figure 6 - Location and power capacity of mini hydroelectric plants (OSINERGMIN, 2019)

According to the Hydrographic Map of Peru, the country has a total of 103 basins and 56 inter-basins belonging to three slopes, (i) Pacific, (ii) Atlantic, and (iii) Titicaca (Lake) (AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA, 2022). In 2011, the Peruvian Ministry of Energy and Mines (MINEM) commissioned Halcrow Group and OIST to elaborate the “Atlas of the hydroelectric potential of Peru”. The main objectives of this study were to evaluate the theoretical hydroelectric potential of Peru for a range of 1 to 100 MW and to promote private participation in energy generation. Thus, the referred study identified the 100 most promising hydroelectric projects, 65 of which have a technical potential of 20 MW or less. To further understand the study under discussion, it is important to define the term technical hydroelectric potential, which represents a technical-economic base measure of the resource’s potential. This concept includes the excluded technical potential and the usable one. The excluded technical potential accounts for the potential values that are within the Concession Areas for hydropower generation and the Protected Natural Areas of National Administration, Regional Administration and Buffer Zones. As previously mentioned, the usable hydroelectric potential is 69,445 MW, with the Atlantic slope accounting for most (87%) of the total (OSINERGMIN, 2019). The results of the referred study are summarized in Table 1.

Table 1 - Technical hydraulic potential of Peru (MINEM, 2011)

Slope	Total (MW)	Excluded (MW)	Usable (MW)
Pacific	11402	2671	8731
Atlantic	86971	26345	60627
Titicaca	87	0	87
Total	98460	29016	69445

### 3.2 Wind

By 2018, Peru had five wind farms, (i) Marcona, (ii) Wayra I, and (iii) Tres Hermanas in Ica, (iv) Cupisnique in La Libertad, and (v) Talara in Piura, with a total installed power of 375.46 MW (OSINERGMIN, 2019). From these wind power plants, Wayra I is the largest one in the country, featuring a total power of 132.3 MW. According to its specifications, this power plant will generate a total of 600 GWh per year, which is equivalent to the annual consumption of almost half a million Peruvian homes, and will prevent the emission of almost 288,000 tonnes of CO<sub>2</sub> into the atmosphere per year (ENEL, 2022a).

As shown in Figure 7, the greatest wind potential is found in the coastal regions of Peru, which at an average height of a wind turbine of 100 m feature an average wind speed between 6 and 12 m/s. In the highlands, the wind speed is between 6 and 9 m/s, where Cajamarca is the most outstanding region, having a wind potential similar to that associated with the coastal regions. As for the jungle, its potential is much lower than that characterizing the other two regions.

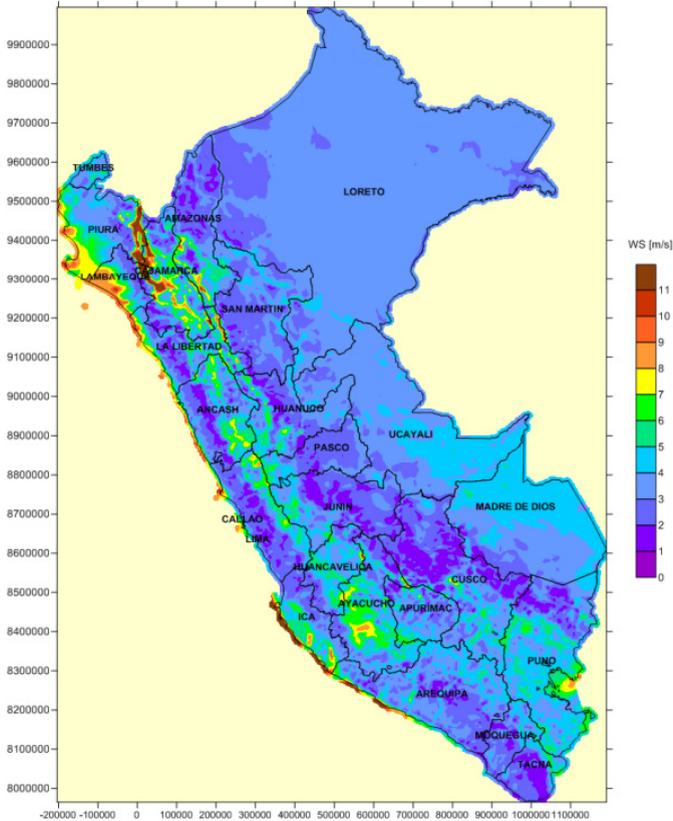


Figure 7 - Map of the average annual wind speed at 100 m height (MINEM, 2016a)

To estimate the wind potential of Peru, the Wind Atlas of Peru divides it into three categories, (i) the total wind potential, (ii) the usable wind potential, and (iii) the excluded wind potential. For the total wind potential, preferential areas were identified. This was done to allow carrying out in future detailed on-site research focused on the installation

of wind turbines. For the identification of the referred areas, the following considerations were made (MINEM, 2016a),

- Moderate to excellent power density ( $P/A > 300 \text{ W/m}^2$ ) at 100 m,
- Favourable wind frequency distribution,
- Land slope less than or equal to 20%,
- Proximity to passable access roads,
- Proximity to towns, existing medium and high voltage lines, and power substations,
- Existing wind farms, and.
- Local altitude less than 3500 meters high.

The usable wind potential in turn fulfils the above conditions and is found outside inadequate areas, such as archaeological zones, national parks, natural reserves, and recreational areas. Finally, the excluded wind potential is that which, although it fulfils the conditions of the total wind potential, is located in an unsuitable area and it is impossible to tap into it. Table 2 shows the details of the wind potential of Peru.

Table 2 - Wind power potential of Peru (MINEM, 2016a)

Region	Usable (MW)	Excluded (MW)	Total (MW)
Amazonas	129	288	417
Ancash	708	108	816
Arequipa	1020	156	1176
Cajamarca	891	282	1173
Ica	2280	3015	5295
La Libertad	921	264	1185
Lambayeque	7017	2097	9114
Lima	429	189	618
Piura	7098	1503	8601
Total	20493	7902	28395

### 3.3 Solar

Without accounting for hydropower, solar energy is the second largest RER in Peru with a potential of 25,000 MW. Peru currently has seven solar photovoltaic plants, located on the south of the country, in the regions of Arequipa (2), Moquegua (4) and Tacna (1) (OSINERG-MIN, 2019). The largest solar power plant in the country is Rubí, from

Enel Green Power Peru (ENEL, 2022b), with an installed capacity of 144.48 MW. In 2018, this power plant registered an annual production of 424.2 GWh. According to Enel, the Rubí plant can generate 440 GWh per year, equivalent to the consumption of 350,000 Peruvian homes, thus avoiding the annual release of more than 209000 tonnes of CO<sub>2</sub> (ENEL, 2022b).

One of the drawbacks of RER is their intermittency. In the case of solar energy, it relates to the decrease in solar radiation in the months of June and July (winter), which occurs due to the presence of cloudiness in the coastal regions of the country and the reduction of daylight hours per day. This aspect is highlighted Figure 8, which compares the energy production in several solar power plants during typical summer and winter months. In the case of the Rubí plant, for instance, during winter, peak energy production decreases by about 35% (Figure 8).

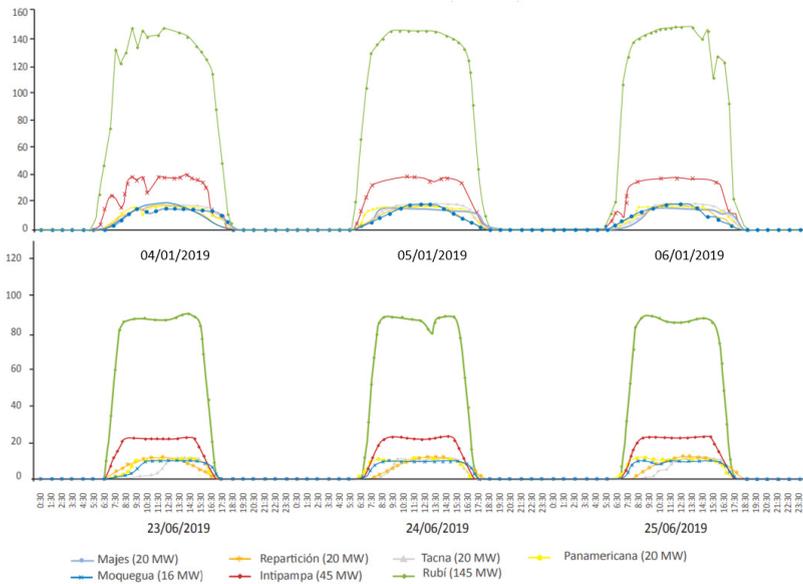


Figure 8 - Energy production [MW] in solar power plants during summer (January) (top) and winter (June) (bottom) (OSINERGMIN, 2019)

Despite the referred intermittency, Peru has an excellent availability of solar energy. This is due to fact that Peru is located in a privileged area, near the equatorial line, where, contrarily to what happens in countries such as the Nordic ones, solar radiation is relatively uniform (TAMAYO, 2011). Notice that, depending on the form that solar radiation

reaches our planet, it can be classified into three types, (i) direct radiation (reaching the earth's surface without altering its direction), (ii) diffuse radiation (reaching the earth's surface after being affected by some elements or particles present in the earth's atmosphere), and (iii) reflected radiation (reflected by the earth's surface itself). Global horizontal radiation is in turn the sum of direct and diffuse radiation. Figure 9 shows both the direct (left) and global horizontal (center) radiation that characterize Peru. From this figure, it is observed that the regions of Arequipa, Moquegua, and Tacna (southern regions of Peru) feature the highest levels of direct and global horizontal radiation. Particularly, direct radiation is in the range of 7.5 to 8.5 kWh/m<sup>2</sup>, whereas global horizontal radiation is in the interval of 6.8 to 7 kWh/m<sup>2</sup>. Figure 9 also shows the photovoltaic energy potential (right), expressed in kWh/kWp, where Wp (Watt peak) represents the theoretical power output of a photovoltaic system under standard test conditions (STC),

- Temperature of 25°C,
- Irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, and
- Air mass (AM) of 1.5.

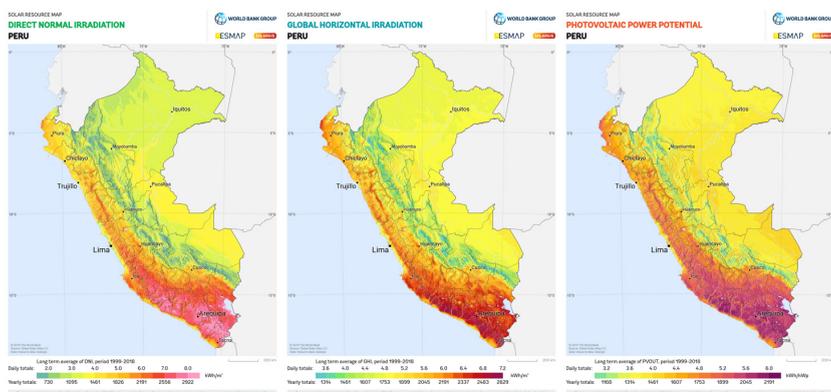


Figure 9 - Maps of direct radiation (left), global radiation (center), and photovoltaic power potential (right) (THE WORLD BANK GROUP, 2022)

### 3.4 Biomass

The term "biomass" refers to a wide range of organic matter that originates from the photosynthesis processes of plants. Through these processes, plants with chlorophyll take advantage of the sun's energy to convert both carbon dioxide and water into high-energy organic matter (OSINERGMIN, 2019). Figure 10 shows the main sources of biomass used to obtain energy.

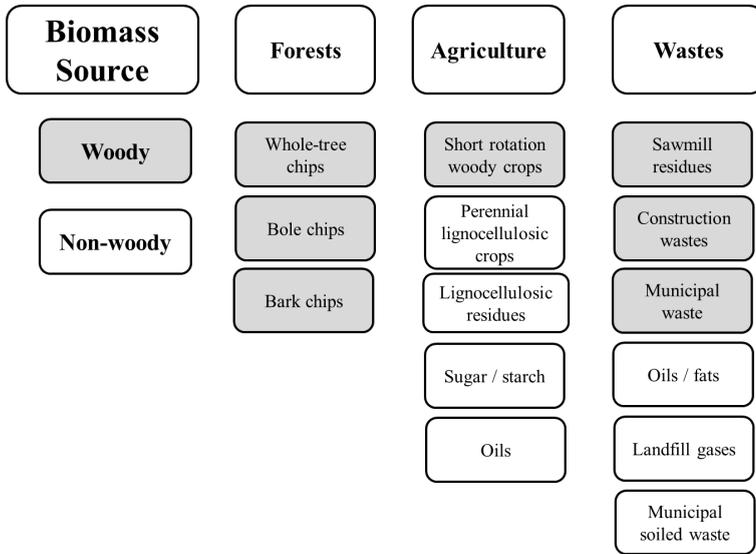


Figure 10 - Biomass sources (DAHIYA, 2020)

Peru currently has five biomass plants, (i) Paramonga, (ii) Huaycoloro, (iii) La Gringa V, and (iv) Doña Catalina, located in Lima, and (v) Maple Ethanol in Piura. In 2018, with respect to the total installed capacity, the Maple Ethanol and Paramonga biomass power plants featured the largest share with 52.9% (37.5 MW) and 32.4% (23 MW), respectively (OSINERGMIN, 2019). Peru, being an agro-industrial country, has an untapped biomass energy potential that is not currently utilized. For instance, in a previous study carried out on the availability of agricultural residues (MITIGATION MOMENTUM, 2015; OSINERGMIN, 2019), it has been determined that 13 types of crops generate enough residues (about 31 million tonnes) to produce electricity. In this sense, Figure 11 shows the distribution of biomass-related primary energy resources by type of waste. Finally, it is worth noticing that the energy potential of biomass in Peru has not been fully assessed. Indeed, what is currently available in the country comes from research carried out on behalf of private companies seeking to meet their electrical or thermal demand associated with their operations.

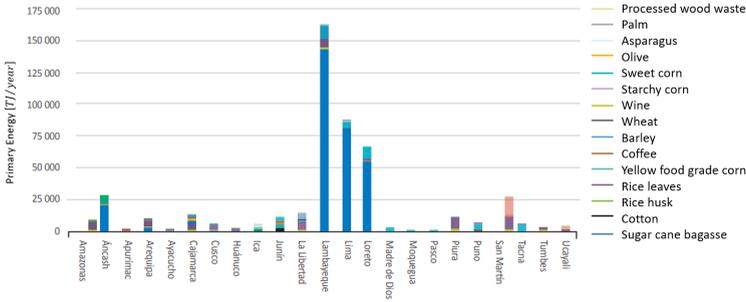


Figure 11 - Distribution of biomass-related primary energy resources (MITIGATION MOMENTUM, 2015)

### 3.5 Other renewable energy sources

Other renewable energy resources in Peru include geothermal energy, which is related to the energy contained in the Earth’s core. Since Peru is located in the Pacific Ring of Fire, near the subduction zone of the Nazca plate, below the South American plate, the country has a relatively high potential for geothermal energy (MINEM, 2012). Peru is indeed the country with the largest geothermal energy potential in South America. This potential, which compares to those characterizing countries, such as Italy and New Zealand, is mainly available in the south of the country. Several studies carried out on the subject since the 1970s confirm this aspect (TAMAYO, 2011). For instance, Figure 12 shows the number of active volcanoes per country vs the geothermal energy potential.

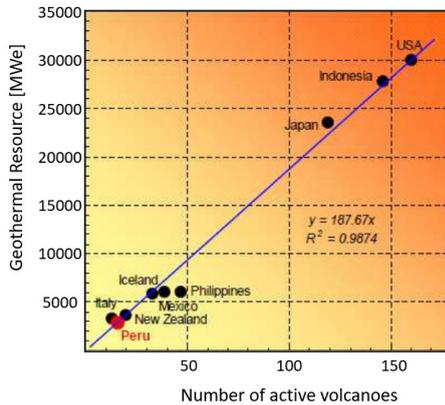


Figure 12 - Number of active volcanoes vs. Geothermal resources (TAMAYO, 2011)

In 2012, West Japan Engineering Consultants, Inc., hired by the Japan International Cooperation Agency (JICA) as part of the Technical Cooperation with the Peruvian Ministry of Energy and Mines (MINEM), developed the work “The master plan for development of geothermal energy in Peru” (MINEM, 2012). The main goal of this work was to establish the basis for the development of geothermal energy in Peru with focus on the production of both electricity and heat. The referred study concluded that Peru has abundant geothermal resources, representing a total potential of 2,860 MW. More specifically, the goal is to develop 1,000 MW of geothermal power by the year 2030 (MINEM, 2012). In this context, in 2010 the geothermal map of Peru was also updated (VARGAS and CRUZ, 2010), which allowed the identification of several hot and mineral water springs throughout the country (Figure 13). In short, the potential to produce renewable energy in Peru is relatively large. So, this potential should be utilized to fostering the clean energy transition in the country.



Figure 13 - Map of the geothermal potential in Peru (MINEM, 2016b)

## 4. GREEN HYDROGEN

Several green hydrogen related issues are discussed in this section. More specifically, the main hydrogen features in terms of physical properties and other characteristic parameters are initially highlighted. This is followed by a discussion of the role that hydrogen can play in energy transition. Finally, emphasis is placed on green hydrogen in the Peruvian context.

### 4.1 Hydrogen features

According to the Royal Society of Chemistry (RSC, 2022), hydrogen is the most abundant and lightest element in the universe. As such, it is found in the sun and most of the stars, and on planets like Earth, where largest amounts are present in form of water. From the three naturally occurring isotopes of hydrogen,  $1\text{H}$  (protium),  $2\text{H}$  (deuterium), and  $3\text{H}$  (tritium), the most abundant one is  $1\text{H}$  (99.9885%). At typical ambient conditions ( $20^\circ\text{C}$  and 1 atm), the most stable allotropic form of hydrogen is the diatomic (molecular) hydrogen ( $\text{H}_2$ ). And, since the fusion point of hydrogen is 13.99 K ( $-259.16^\circ\text{C}$ ) and its boiling point 20.271 K ( $-252.879^\circ\text{C}$ ) (HAYNES et al., 2014), at these conditions, hydrogen is in gaseous state. Therefore, in the Earth's atmosphere hydrogen is present as a gas, but in very small quantities (less than 1 ppm). Even though hydrogen gas is not available in large amounts in natural environment, it can be found in various molecules such as water, sugars, hydrocarbons, and proteins. In these molecules, the corresponding bond enthalpies (bond related energy) vary. For instance, the bond enthalpies characterizing  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  (ammonia),  $\text{CH}_4$  (methane), and  $\text{H}_2\text{O}$  (water) are equal to 435.9, 390.8, 415.5, and 462.8 kJ/mol, respectively (RSC, 2022). This means that referred forms of hydrogen contain bond energy that can be extracted and used in the applications of interest (OLIVEIRA, 2022).

Regarding other characteristic parameters of molecular hydrogen, it is worth noticing that it features a critical point of 32.938 K ( $-240.212^\circ\text{C}$ ) and 1285.8 kPa (12.69 atm), and a triple one of 13.80 K ( $-259.3467^\circ\text{C}$ ) and 7.041 kPa (0.069 atm) (HAYNES et al., 2014). In addition, at  $25^\circ\text{C}$  and 1 atm, its ratio of specific heats is equal to 1.405 and its density equal to 0.08264 kg/m<sup>3</sup>. This last density value is, respectively, about 860 and 1050 times less than those values associated with its liquid (70.99 kg/m<sup>3</sup>) and solid (86.71 kg/m<sup>3</sup>) states (SANKIR and SANKIR, 2017). In terms of energy content, hydrogen features a gross heat of combustion, which is a parameter typically 5% to 10% higher than the net heat of combustion (where water remains in the gas state), of about 141.8 MJ/kg. Notice that this value is almost three times the one associated with methane (55.5 MJ/kg), the main constituent of

natural gas (HAYNES et al., 2014). Therefore, for each kilogram of hydrogen that is oxidized (in a heat engine or fuel cell, for instance), 141.8 MJ of energy is released. Besides, since the enthalpy of vaporization of water is about 2.258 MJ/kg (HAYNES et al., 2014), it means that the oxidation of 1 kg of hydrogen produces about 63 times the amount of energy that can be obtained from condensing (using a steam turbine, for instance) 1 kg of water (OLIVEIRA, 2022). In short, the energy content per unit mass of hydrogen is relatively large.

To take full advantage of the referred energy content, hydrogen must be produced first and then transported and stored appropriately at the point of use. Notice however that these hydrogen transport and storage processes, which are directly related to each other, depend on the type and scale of the specific application accounted for (DELL et al., 2014). For transporting and distributing large amounts of hydrogen in gaseous state, as it happens when doing so in the case of natural gas, the use of pipelines seems to be the most obvious choice. For non-stationary applications such as automotive or aircraft related ones, in turn, this choice is not so obvious anymore. In this sort of applications, depending on the hydrogen storage conditions, in terms of temperature and pressure, the size, volume, and weight of the containers used for hydrogen storage purposes can vary considerably. Of course, both options involving the storage in gaseous and liquid states are feasible. Nevertheless, since the temperatures at which hydrogen is in liquid state are significantly low (between 15 and 30 K, approximately), the amount of energy required to liquefy hydrogen is relatively large (about 30% of the energy value of the hydrogen itself) (DELL et al., 2014). Therefore, there are several technical challenges that need to be overcome first before having a widespread use of hydrogen as a fuel.

## 4.2 Hydrogen and clean energy transition

According to the IEA (IEA, 2021b), in 2019, about 80% of the total energy consumed in the world (606 EJ) came from fossil fuels. Of this amount, about two-thirds was used in the transport and industry sectors (IEA, 2021c). This means that the amount of energy currently coming from fossil fuels, which is used to cover our daily needs, is huge. This also emphasizes the size of the climate change problem that needs to be faced. The big issue associated with fossil fuels is that their use release greenhouse gases such CO<sub>2</sub> that directly impact on climate change. Indeed, it has been scientifically proven that the increase in greenhouse gas emissions is responsible for long-term climate change. More specifically, the increase of CO<sub>2</sub> in the Earth's atmosphere causes global warming, which in turn affects precipitation, glaciers, weather patterns, tropical cyclone activity, and severe storms (WEATHERHEAD, 2021). In this context, increasing the share of renewable energy

sources, including green hydrogen, in the world energy mix is crucial.

Since hydrogen is not freely available in natural environment, but in combination with other elements such as oxygen (water) and carbon (fossil fuels), energy needs to be spent to extract hydrogen from these sources. Accordingly, similar to electricity, hydrogen is also a secondary form (vector or carrier) of energy that is used for storing and transporting energy (DELL et al., 2014). Unlike electricity, however, hydrogen can be both a fuel and an electricity storage, which makes hydrogen and electricity complementary and interconvertible (DELL et al., 2014). Therefore, in a decarbonized energy mix, hydrogen has the potential to become an important energy vector. For instance, using electricity coming from renewable energy sources and electrolytic processes, green hydrogen can be produced, transported, and stored for final usage. This low-carbon hydrogen can be utilized next (i) to produce electricity, using fuel cells or hydrogen-fired gas turbines, (ii) for green mobility, in cars, heavy duty and mining trucks, and in propulsion related applications, (iii) in the industry, to produce cement and steel in the cement and metallurgical industries, for instance, and (iv) in the production of synthetic fuels (COLLINS, 2022).

In this context, the share in the energy mix of fuels with very low emissions intensity, such green hydrogen, is expected to increase in the following years. For instance, Figure 14 shows, for the same long-term scenarios discussed in Figure 1, a forecast of low-carbon hydrogen supply and demand by 2030 (IEA, 2021a). From this figure it is noticed that, according to the NZE, about 18.5 EJ of low-carbon hydrogen will be produced by 2030, half of which will come from water electrolysis processes. Figure 14 also highlights that the transformation and industry sectors will be the largest consumers of the produced low-carbon hydrogen. It is worth noticing that this 18.5 EJ represents about 3% of the total energy consumed in the world (606 EJ) in 2019 (IEA, 2021b). To have a better idea of the amount of energy that this 18.5 EJ represents in practice, let's take as reference the Itaipu (hydroelectric) power plant (ITAIPU BINACIONAL, 2022a), the second largest power station in the world. This power plant, with an installed capacity of 14 GW, featured a record annual production of 0.37 EJ in 2016 (IHA, 2022b). Therefore, 18.5 EJ of low-carbon hydrogen is equivalent to about 50 ( $18.5/0.37$ ) Itaipu power plants (OLIVEIRA, 2022). That is, to produce the referred amount of 18.5 EJ, 50 hydrogen production plants, with a power production capacity equal to the Itaipu power plant, will need to be constructed and operated by 2030. This highlights the magnitude of the effort that needs to be carried out to make things happen.

Of course, major investments in research, development, and innovation will be required to lower the hydrogen production costs and to make these supply and demand predictions true. If this does not happen, as the STEPS and APS emphasize, the use of low-carbon

hydrogen and hydrogen-based fuels by 2030 will see only a small increase. Naturally, due to the availability of resources, hydrogen production related costs are expected to vary from country to country. In a hydrogen-based economy, therefore, some countries will be hydrogen importers, and some will be exporters. In this scenario, Peru has a large potential to become a hydrogen exporter country. This aspect will be further explored in the following section.

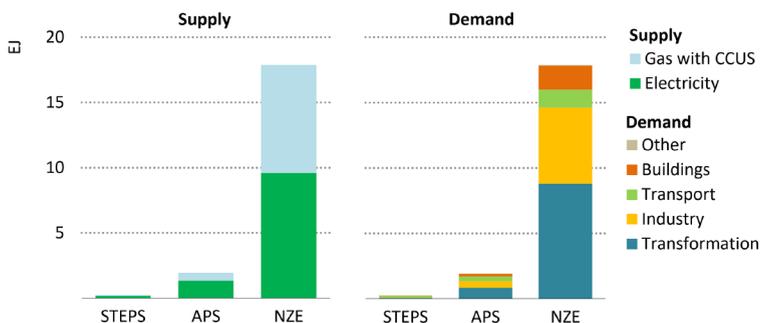


Figure 14 - Forecast of low-carbon hydrogen supply and demand by 2030 (IEA, 2021a)

### 4.3 Green hydrogen in Peru

Until a couple of years ago, almost nobody talked about green hydrogen in Peru. Indeed, two of the first initiatives on the subject date back to January 2021, that is when a R&D green hydrogen-related project was launched (ANDINA, 2021; FPCE, 2022), and February 2021, that is when the Peruvian Hydrogen Association (H2 Perú) was officially created (H2 PERÚ, 2022a). The main goal of the referred R&D project (ANDINA, 2021; FPCE, 2022) is to design, build and test an electrolytic hydrogen production plant using solar radiation as energy source to produce clean energy. In particular, different advanced photovoltaic, electrolyzer, and control related technologies are being accounted for in this R&D project (LUCAS and CELIS, 2022; ANTONIOU et al., 2022; MAS et al., 2022). H2 Perú in turn has recently (February 2022) submitted a bill to the Peruvian authorities (legislative and executive branches) (H2 PERÚ, 2022b), which proposes the design and implementation of a green hydrogen national strategy promoting innovation, development, production, and export of green hydrogen as an energy vector, fuel or as an input to industrial processes. More recently (July 2022), Mmex Resources Corporation, an American company focused on the development, financing, construction, and operation of clean fuel infrastructure projects powered by renewable energy, announced that

it will develop the first green hydrogen project in Peru (MMEX RESOURCES CORPORATION, 2022). This green hydrogen production plant is expected to produce up to 55 tonnes per day of hydrogen, using 160 MWe of renewable energy. To facilitate exports of green hydrogen and other related products to Asia and the west coast of United States, the referred plant will be located on the southern coast of Peru, near the Pacific Ocean. Of course, the Peru's mining industry relying on the use of heavy extraction and transportation equipment is also a target market for this project.

According to H2 Perú (H2 PERÚ, 2022c), the northern and southern regions of Peru have the largest potential for green hydrogen production. This is thanks to the availability of renewable energy resources in such regions (mostly wind energy in the northern and solar energy in the southern). In addition, due to their energy footprint and the type of activities performed there, the central and southern regions of Peru are the main potential consumption centers of green hydrogen. Indeed, from all Peruvian departments, Lima is the largest consumer of energy in Peru, with 38% of the total (H2 PERÚ, 2022c). Mining and manufacturing are, in turn, the main activities that make southern Peru the region with the largest potential for industrial use of green hydrogen. In this sense, first estimates of green hydrogen demand in Peru indicate amounts of 30,000 t/year by 2030, and 350,000 t/year by 2050 (H2 PERÚ, 2022d). Notice that between 20 and 30% of these amounts are associated with the mining industry.

Producing green hydrogen for domestic consumption only will not be enough to effectively transition to a hydrogen-based economy in Peru. There are so many reasons to believe so, including political, economic, and social ones. Therefore, other drivers are needed to achieve a fast transition to an energy economy in which hydrogen is a key player. One of these drivers could be the green hydrogen export. As previously indicated, Peru has a large potential to become a hydrogen exporter country. This is true because Peru has both a huge potential to produce renewable energies (about 115 GW if hydropower, solar, and wind are summed up – OSINERGMIN, 2019) and a long coastline with access to seawater. Therefore, the green hydrogen produced in Peru can be used not only for domestic consumption, but also for export to other countries. Asian countries and the west coast of United States can be some of the destinations for this green hydrogen. Finally, notice that Peru has also a large offshore wind potential (ESMAP, 2020). Therefore, the electric energy generated by Peruvian offshore wind farms can be either transported to land to produce green hydrogen there or used directly offshore to do the same. Detailed assessments are needed of course to determine the most feasible option to be implemented in practice.

## 5. FINAL REMARKS

An overview of the clean energy transition in Peru, from the perspective of green hydrogen, was provided in this work. Accordingly, the current situation of renewable energies in Peru was initially highlighted, along with their historical evolution and prospects. Next, the potential for renewable energy production in Peru was discussed, with special emphasis on hydropower, wind, solar, and biomass. Finally, green hydrogen and its potential to contribute to the clean energy transition in Peru was addressed. In the discussions carried in this this work, it has been highlighted that most of the increase in energy demand (annual growth rate ~ 7%) that occurred in Peru during the last two decades was covered by fossil fuels, natural gas more specifically. This means that CO<sub>2</sub> emissions associated with energy generation in Peru increased significantly during the last twenty years. Notice however that, since 2010 or so, the share of non-conventional renewable sources in the Peruvian energy mix progressively increased as well. For instance, in 2018, this share was about 7.2%. Although the non-conventional renewable sources related share is still small, it represents a progress because back in 2008 this share was 0%.

It has been emphasized here as well that the potential to produce renewable energy in Peru is relatively large. For instance, for hydropower, solar, and wind, this potential represents about 70, 25, and 20 GW, respectively. Nevertheless, only about 7.1, 1.1, and 1.8% of this potential, respectively, is currently being tapped. Therefore, there is a big room to keep increasing the share of non-conventional renewable energies in the Peruvian energy mix. It should be noticed here that the tomorrow's energy economy is expected to be very different from the one currently in place. In particular, because of the ongoing global decarbonizing process, human society is expected to increasingly meet its energy needs with electricity. Thus, around 40% of primary energy is expected to be converted at least twice before reaching end-users. In other words, energy is expected to travel through batteries, electrolyzers, and fuel cells undergoing conversions from electricity to heat or fuels, and back again. In this sense, low- or zero-carbon (green) hydrogen is expected to be key to providing flexibility to the energy system and helping manage the imbalances between variable energy supply and demand. In this context, Peru has a big opportunity to become a key player in the future energy economy. This comes from the fact that Peru has both a huge potential to produce renewable energies and along coastline with access to seawater, which represent the basic ingredients to generate large amounts of green hydrogen. Eventually, the green hydrogen produced in the country can be used not only for local consumption, but also for export to other countries. Asian countries and the west coast of United States can be some of the destinations for this green hydrogen.

## 6. ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported by CONCYTEC-FONDECYT (PRO-CIENCIA) (Peru), contract N° 159-2020-FONDECYT.

## REFERENCES

ANDINA, 2021. Ingenieros diseñarán planta de combustible a base de hidrógeno verde. Available in: <https://andina.pe/agencia/noticia-ingenieros-disenaran-planta-combustible-a-base-hidrogeno-verde-835369.aspx>.

ANTONIOU, A., BERASTAIN, A., HERNANDEZ, D., CELIS, C., 2022. Mathematical modelling of coupled and decoupled water electrolysis systems based on existing theoretical and experimental studies. *International Journal of Hydrogen Energy* 47:17526–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.264>.

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA, 2022. Mapa Hidrográfico del Perú. Available in: <http://www.ana.gob.pe/normatividad/7-mapa-hidrografico-del-peru-0>.

COLLINS, L., 2022. Green hydrogen + captured CO<sub>2</sub> | 'Unique and powerful' joint venture aims to produce 80,000 tonnes of aviation e-fuel annually. *Rechargenews.com*. Available in: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-captured-co2-unique-and-powerful-joint-venture-aims-to-produce-80-000-tonnes-of-aviation-e-fuel-annually/2-1-1266267>.

DAHIYA, A. (Ed.), 2020. *Bioenergy: Biomass to Biofuels and Waste to Energy*, 2nd Ed. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01067-4>.

DELL, R. M.; MOSELEY, P. T.; RAND, D. A. J. (Eds.), 2014. *Towards Sustainable Road Transport*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07556-7>.

DELOITTE, 2021. Hoja de Ruta de Transición Energética hacia un Perú con emisiones 2030-2050. Resultados Finales. <https://www.enel.pe/content/dam/enel-pe/sostenibilidad/hoja-de-ruta-de-transicion-energetica/sesiones/Deloitte%20-%20Hojas%20de%20ruta%20de%20Transici%C3%B3n%20Energ%C3%A9tica%20en%20Peru%20-Sesi%C3%B3n%203.pdf>.

ENEL (Perú) 2022a. Wayra I: la energía del viento impulsando una nueva era. Available in: <https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/wayra-i-la-primer-central-eolica-de-enel-en-peru.html>.

ENEL (Perú) 2022b. Planta Solar Rubí: la nueva era de la energía llegó al Perú. Available in: <https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/rubi-la-central-solar-de-enel-mas-grande-del-peru.html>.

ESMAP, 2020. Offshore wind technical potential in Peru. Available in: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/921091586960211327/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Peru-Map.pdf>.

EYNG (Estrategias y Negocios) 2021. H2 Perú y PUCP impulsarán hidrógeno verde en Perú. Available in: <https://eyng.pe/web/2021/10/21/h2-peru-y-pucp-impulsaran-hidrogeno-verde-en-peru/>.

FPCE, 2022. Flows, Particles, Combustion and Environment (FPCE) official website. Available in: <https://investigacion.pucp.edu.pe/grupos/fpce/>.

GESTIÓN, 2022. Energías renovables: cuatro proyectos iniciarán operación en el 2022 y hay otros cuatro en marcha. Available in: <https://gestion.pe/economia/energias-renovables-cuatro-proyectos-iniciaran-operacion-en-2022-y-hay-otros-cuatro-en-marcha-noticia/>.

HAYNES, W.M., LIDE, D.R., BRUNO, T.J. (Eds.), 2014. CRC Handbook of chemistry and physics. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, US.

H2 PERÚ, 2022a. H2 Perú official website. Available in: <https://h2.pe/> <https://www.itaipu.gov.br/>.

H2 PERÚ, 2022b. Proyecto de Ley de promoción del Hidrógeno Verde. Available in: <https://h2.pe/noticias/h2-peru-publica-un-proyecto-de-ley-de-promocion-del-hidrogeno-verde/>.

H2 PERÚ, 2022c. Potencial del Hidrógeno Verde en el Perú. Available in: [https://h2.pe/uploads/20210908\\_H2-Peru\\_Estudio-final.pdf](https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf).

H2 PERÚ, 2022d. Bases y recomendaciones para la elaboración de la Estrategia de Hidrógeno Verde en el Perú. Resumen ejecutivo. Available in: <https://h2.pe/uploads/PLAYBOOK-1.3.1.4-2.pdf>.

IEA. 2021a. World energy outlook 2021. Available in: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.

IEA. 2021b. World Energy Balances: Overview. Available in <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>.

IEA. 2021c. Key World Energy Statistics 2021. Available in <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>.

INTERACADEMY COUNCIL, 2007. Lighting the way. Available in: [https://www.interacademies.org/sites/default/files/publication/lighting\\_the\\_way.pdf](https://www.interacademies.org/sites/default/files/publication/lighting_the_way.pdf).

ITAIPU BINACIONAL, 2022a. Itaipu Binacional. Available in: <https://www.itaipu.gov.br/>.

IHA (International Hydropower Association), 2022b. Itaipu Binacional. Available in: <https://www.hydropower.org/our-members/itaipu-binacional>.

LUCAS, M.; CELIS, C., 2022. Assessment of Cooling Technologies for Solar Photovoltaic Panels Accounting for Local Solar Irradiance and Ambient Temperature Conditions. IMECE2022-90239. ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition – IMECE2022, Columbus, OH, USA.

MAS, R.; BERASTAIN, A.; ANTONIOU, A.; ANGELES, L.; VALENCIA, S.; CELIS, C., 2022. Genetic algorithms-based size optimization of directly and indirectly coupled photovoltaic-electrolyzer systems. *Energy Conversion and Management* 270:116213. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116213>.

MINAM (Ministerio del Ambiente), 2022. DS N°003-2022 MINAM, Decreto Supremo que decalra de interés nacional la emergencia climática. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2783102/DS.%20003-2022-MINAM.pdf.pdf?v=1643122381>.

MINEM (Ministerio de Energía y Minas) 2011. Atlas del potencial hidroeléctrico del Perú. <https://books.google.com.pe/books?id=0HHBnQAA-CAAJ>.

MINEM (Ministerio de Energía y Minas) 2012. The Master Plan for Development of Geothermal Energy in Peru. [https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12048542\\_01.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12048542_01.pdf).

MINEM (Ministerio de Energía y Minas) 2016a. Atlas eólico del Perú. Available in: [http://www.minem.gob.pe/\\_publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=537](http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=537).

MINEM (Ministerio de Energía y Minas) 2016b. Anuario Ejecutivo de Electricidad 2016. [http://www.minem.gob.pe/\\_publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=571](http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=571).

MINEM (Ministerio de Energía y Minas) 2019. Balance Nacional de Energía. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1875333/Balance%20Nacional%20de%20la%20Energ%C3%ADa%202019.pdf>.

MITIGATION MOMENTUM, 2015. Sustainable energy production from biomass waste in Peru - NAMA proposal. Available in: [www.mitigation-momentum.org](http://www.mitigation-momentum.org).

MSEX RESOURCES CORPORATION, 2022. Project 4: Southern Coast of Peru – Green Hydrogen Project. Available in: <https://mmexresources.com/project/southern-coast-of-peru-green-hydrogen-project/>.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A., 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67:597–611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>.

NUNEZ-PALOMINO, M., 2020, Lithium in Peru. Panoramas, University of Pittsburgh. Available in: <https://www.panoramas.pitt.edu/economy-and-development/lithium-peru>.

OLADE, 2021. Panorama Energético de América Latina y el Caribe. Available in: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0442a.pdf>.

OLIVEIRA, A. A. M., 2022. Yellow, blue ou green? O hidrogênio como combustível para processos intensivos em energia. PRH-45-ANP UFSC. Available in: [https://www.youtube.com/watch?v=tIV-amGq7E-A&ab\\_channel=PRH45ANP\\_UFSC](https://www.youtube.com/watch?v=tIV-amGq7E-A&ab_channel=PRH45ANP_UFSC).

OSINERGMIN, 2019. Energías renovables: Experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. Available in: <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/informes-publicaciones/1201115-energias-renovables-experiencia-y-perspectivas-en-la-ruta-del-peru-hacia-la-transicion-energetica>.

PERÚENERGÍA, 2022. Gobierno Proyecto elevar al 20% energía renovables no convencionales en matriz eléctrica al 2030. Available in: <https://peruenergia.com.pe/gobierno-proyecta-participacion-de-20-de-energias-renovables-no-convencionales-en-matriz-electrica-al-2030/#:~:text=Gobierno%20proyecta%20elevar%20al%202020,al%202030%20%E2%80%93%20PER%C3%9A%20ENERG%C3%8DA%202022>.

RIPPLE, W.J.; WOLF, C.; NEWSOME, T. M.; BARNARD, P.; MOOMAW, W. R., 2020. World Scientists' Warning of a Climate Emergency, *BioScience* 70:8–12, <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>.

RSC, 2022. Periodic table, Hydrogen. Available in: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen>.

SANKIR, M.; SANKIR, N. D. (Eds.), 2017. Hydrogen production technologies, John Wiley & Sons Inc. New Jersey, USA.

TAMAYO, R., 2011. Potencial de las energías renovables en el Perú. Available in: <http://www.osinerg.gob.pe/newweb/uploads/Publico/SeminarioIntEFERP/Miercoles%205.10.2011/3.%20Potencial%20de%20Energias%20Renovables%20DGE-%20Roberto%20Tamayo.pdf>.

THE WORLD BANK GROUP, 2022. Global Solar Atlas (Peru). Available in: <https://globalsolaratlas.info/download/peru>.

VARGAS, V.; CRUZ, V., 2010. Geothermal map of Peru. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. Bochum: International Geothermal Association. Available in: <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2079>.

WEATHERHEAD, B., 2021. The science everyone needs to know about climate change, in 6 charts. The Conversation. Available in: <https://theconversation.com/the-science-everyone-needs-to-know-about-climate-change-in-6-charts-170556>.

YODWONG, B.; GUILBERT, D.; PHATTANASAK, M.; KAEWMANEE, W.; HINAJE, M.; VITALE, G., 2020. Faraday's efficiency modeling of a proton exchange membrane electrolyzer based on experimental data. *Energies* 13:1–14. <https://doi.org/10.3390/en13184792>.



## 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.
- O nome do autor NÃO deve ser abreviado, e as respectivas informações de instituição, telefone 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.

