



Energia e Sustentabilidade:

desafios e soluções

Elisangela Ferruci Carolino
(Organizadora)



AYA EDITORA

2023

Elisangela Ferruci Carolino
(Organizadora)

Energia e Sustentabilidade: desafios e soluções

Ponta Grossa
2023

Direção Editorial

Prof.º Dr. Adriano Mesquita Soares

Organizadora

Prof.ª Dr.ª Elisangela Ferruci Carolino

Capa

AYA Editora©

Revisão

Os Autores

Executiva de Negócios

Ana Lucia Ribeiro Soares

Produção Editorial

AYA Editora©

Imagens de Capa

br.freepik.com

Área do Conhecimento

Engenharia

Conselho Editorial

Prof.º Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva

Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí

Prof.º Dr. Aknaton Toczec Souza

Centro Universitário Santa Amélia

Prof.ª Dr.ª Andréa Haddad Barbosa

Universidade Estadual de Londrina

Prof.ª Dr.ª Andreia Antunes da Luz

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Dr. Argemiro Midonês Bastos

Instituto Federal do Amapá

Prof.º Dr. Carlos López Noriega

Universidade São Judas Tadeu e Lab. Biomecatrônica - Poli - USP

Prof.º Me. Clécio Danilo Dias da Silva

Centro Universitário FACEX

Prof.ª Dr.ª Daiane Maria De Genaro Chirolí

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Danyelle Andrade Mota

Universidade Federal de Sergipe

Prof.ª Dr.ª Déborah Aparecida Souza dos Reis

Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof.ª Ma. Denise Pereira

Faculdade Sudoeste – FASU

Prof.ª Dr.ª Eliana Leal Ferreira Hellvig

Universidade Federal do Paraná

Prof.º Dr. Emerson Monteiro dos Santos

Universidade Federal do Amapá

Prof.º Dr. Fabio José Antonio da Silva

Universidade Estadual de Londrina

Prof.º Dr. Gilberto Zammar

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Helenadja Santos Mota

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, IF Baiano - Campus Valença

Prof.ª Dr.ª Heloísa Thaís Rodrigues de Souza

Universidade Federal de Sergipe

Prof.ª Dr.ª Ingridi Vargas Bortolaso

Universidade de Santa Cruz do Sul

Prof.ª Ma. Jaqueline Fonseca Rodrigues

Faculdade Sagrada Família

Prof.ª Dr.ª Jéssyka Maria Nunes Galvão

Faculdade Santa Helena

Prof.º Dr. João Luiz Kovaleski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.º Dr. João Paulo Roberti Junior

Universidade Federal de Roraima

Prof.º Me. Jorge Soistak

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Dr. José Enildo Elias Bezerra

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Ubajara

Prof.ª Dr.ª Karen Fernanda Bortoloti

Universidade Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Leozenir Mendes Betim

Faculdade Sagrada Família e Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais

Prof.ª Ma. Lucimara Glap

Faculdade Santana

Prof.º Dr. Luiz Flávio Arreguy Maia-Filho

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof.º Me. Luiz Henrique Domingues

Universidade Norte do Paraná

Prof.º Dr. Milson dos Santos Barbosa

Instituto de Tecnologia e Pesquisa, ITP

Prof.º Dr. Myller Augusto Santos Gomes

Universidade Estadual do Centro-Oeste

Prof.ª Dr.ª Pauline Balabuch

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Dr. Pedro Fauth Manhães Miranda

Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof.º Dr. Rafael da Silva Fernandes

Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Parauapebas

Prof.ª Dr.ª Regina Negri Pagani

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.º Dr. Ricardo dos Santos Pereira

Instituto Federal do Acre

Prof.ª Ma. Rosângela de França Bail

Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais

Prof.º Dr. Rudy de Barros Ahrens

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

Universidade Federal do Piauí

**Prof.ª Dr.ª Silvia Aparecida Medeiros
Rodrigues**

Faculdade Sagrada Família

Prof.ª Dr.ª Silvia Gaia

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Prof.ª Dr.ª Sueli de Fátima de Oliveira
Miranda Santos**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Thaisa Rodrigues

Instituto Federal de Santa Catarina

© 2023 - **AYA Editora** - O conteúdo deste Livro foi enviado pelos autores para publicação de acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição *Creative Commons* 4.0 Internacional (**CC BY 4.0**). As ilustrações e demais informações contidas nos capítulos deste Livro, bem como as opiniões nele emitidas são de inteira responsabilidade de seus autores e não representam necessariamente a opinião desta editora.

E5669 Energia e sustentabilidade: desafios e soluções [recurso eletrônico].
/ Elisangela Ferruci Carolino I (organizador). -- Ponta Grossa: Aya, 2023.
140 p.

Inclui biografia
Inclui índice
Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
ISBN: 978-65-5379-296-8
DOI: 10.47573/aya.5379.2.212

1. Sustentabilidade e meio ambiente. 2. Educação ambiental. 3.
Energia - Fontes alternativas. I. Carolino, Elisangela Ferruci. II. Título

CDD: 363.7

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Bruna Cristina Bonini - CRB 9/1347

**International Scientific Journals Publicações de
Periódicos e Editora LTDA**

AYA Editora©

CNPJ: 36.140.631/0001-53
Fone: +55 42 3086-3131
WhatsApp: +55 42 99906-0630
E-mail: contato@ayaeditora.com.br
Site: <https://ayaeditora.com.br>
Endereço: Rua João Rabello Coutinho, 557
Ponta Grossa - Paraná - Brasil
84.071-150

SUMÁRIO

Apresentação..... 9

01

Sustentabilidade e energias renováveis 10

Yuri Vinicius Souza de Jesus

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.1

02

Implantação de sistema fotovoltaico em condomínio residencial horizontal no município de Araraquara-SP.21

Marcio Odair Pazin

Antônio Pinto do Nascimento Neto

Fabiana Florian

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.2

03

Análise de viabilidade econômica para um sistema de energia fotovoltaica instalado em uma residência unifamiliar na cidade de Guaíra - PR 38

Jabez de Freitas da Silva

Emanuel Vedovetto Santos

Eduardo Vedovetto Santos

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.3

04

Cidades e a mudança climática: a importância do planejamento urbano no combate ao aquecimento global 55

Yuri Vinicius Souza de Jesus

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.4

05

Estudo luminotécnico de uma subestação de energia.67

Gabrieli Sampaio Carra

Danilo Carlos Rossetto Minhoni

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.5

06

Sistemas a eventos discretos (SED's): modelagem e projeto de sistema de controle aplicado à planta de hidrogênio verde no parque tecnológico Itaipu..... 79

Angel Ambrocio Quispe

Sandro Battistella

Tales Gottlieb Jahn

Rogério Meneghetti

Romeu Reginatto

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.6

07

Avaliação do Desempenho de Membranas Poliméricas Nafion/Quitosana em Células a Combustível tipo PEM.96

Carina Bonavigo Jakubiu

Rogério Meneghetti

Tales Gottlieb Jahn

Janine Padilha Botton

Angel Ambrocio Quispe

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.7

08

Fatores Ambientais, econômicos e gerenciais associados à falhas em motores elétricos: uma revisão sistemática..... 106

Narco Afonso Ravazzoli Maciejewski
Renata Pessi

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.8

09

O programa de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL como forma de fomento a novas soluções de sustentabilidade energética..... 120

Renato Magri

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.9

Organizadora 133

Índice Remissivo..... 134

Apresentação

Com o objetivo de fomentar o conhecimento na área de sustentabilidade energética, novas tecnologias em energias renováveis o livro **“Energia e Sustentabilidade: desafios e soluções”** apresenta aos leitores abordagens e experiências originárias de pesquisas acadêmicas. No Capítulo 1: Sustentabilidade e Energias Renováveis, abordando a expansão do uso de energias renováveis que reduz o impacto ambiental. No Capítulo 2: A Experiência de um dimensionamento na implantação de um sistema fotovoltaico em um condomínio baseado em valores estimados para a produção de energia elétrica. No Capítulo 3: Uma análise de viabilidade econômica para um sistema de energia fotovoltaica instalado em uma residência unifamiliar, demonstrando o consumo, geração investimento e tempo de retorno. No Capítulo 4: Cidades e a mudança climática- a importância do planejamento urbano no enfrentamento das mudanças climáticas. Capítulo 5: Estudo luminotécnico de uma subestação de energia: a distribuição correta da luminosidade de acordo com as normas e atendimento ao cliente. No Capítulo 6: Sistemas a eventos discretos (SED's): Um estudo sobre o projeto de controle em malha fechada para plantas de produção de hidrogênio verde (PPHV) no Parque Tecnológico Itaipu (PTI).No Capítulo 7: Avaliação do desempenho de membranas poliméricas desenvolvidas a partir da blenda de nafion e quitosana, pesquisa que contribui para o desenvolvimento de tecnologias eficientes e sustentáveis, com menor preço para a geração de energia elétrica. Capítulo 8: Fatores ambientais, econômicos e gerenciais associados à falhas em motores elétricos: abordar a eficiência energética e sustentabilidade no ambiente industrial produtivo. Capítulo 9: O Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL: aborda a importância do Programa, investimentos e inovação na eficiência da utilização de recursos energéticos.

Nesse contexto, o livro é de grande relevância, contribuindo para a divulgação e discussões dessas pesquisas sobre Energia e Sustentabilidade e o potencial de fontes renováveis, visando a busca de soluções tecnológicas para as cidades.

Prof.^a Dr.^a Elisangela Ferruci Carolino

Organizadora

Sustentabilidade e energias renováveis

Sustainability and renewable energies

Yuri Vinicius Souza de Jesus

Universidade Federal Fluminense

RESUMO

A necessidade de produção e crescimento econômico tem levado as Nações a utilizar energias intensivamente para impulsionar o processo produtivo. No entanto, essa abordagem tem sido baseada em energias sujas e não renováveis, como lenha, carvão e petróleo, resultando em poluição e aquecimento global. Como resultado de discussões e debates, surgiram reuniões e conferências para incentivar os gestores das Nações a considerarem a mudança para o uso de energias limpas e renováveis. Nesse contexto, este artigo tem como objetivo examinar a oferta e o consumo de energia renovável no mercado brasileiro, bem como seu progresso energético, e destacar exemplos de eficiência de energia limpa em todo o mundo. A metodologia adotada é bibliográfica e documental, com um estudo explicativo e descritivo. A justificativa para este estudo reside na importância do crescimento do mercado energético por meio da adoção de energias renováveis extraídas de fontes naturais e ambientalmente sustentáveis. Conclui-se que o sistema de oferta e consumo de energia já impulsionou as Nações a investir na transição de energias não renováveis para renováveis no sistema econômico e social, demonstrando a necessidade de utilizar energia de forma a contribuir para a redução do aquecimento global, a preservação da natureza e o crescimento econômico sustentável.

Palavras-chave: energias renováveis. mercado energético. Brasil.

ABSTRACT

The need for production and economic growth has driven nations to use energy intensively to fuel the production process. However, this approach has been based on dirty and non-renewable energies such as wood, coal, and oil, resulting in pollution and global warming. As a result of discussions and debates, meetings and conferences have emerged to encourage nations' leaders to consider transitioning to the use of clean and renewable energies. In this context, this article aims to examine the supply and consumption of renewable energy in the Brazilian market, as well as its energy progress, and to highlight examples of clean energy efficiency worldwide. The adopted methodology is bibliographic and documentary,

Energia e Sustentabilidade: desafios e soluções

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.1



with an explanatory and descriptive study. The rationale for this study lies in the importance of growing the energy market through the adoption of renewable energies extracted from natural and environmentally sustainable sources. It is concluded that the energy supply and consumption system has already driven nations to invest in transitioning from non-renewable to renewable energies within the economic and social system, demonstrating the need to use energy in a way that contributes to reducing global warming, preserving nature, and promoting sustainable economic growth.

Keywords: renewable energy, energy market, Brazil.

INTRODUÇÃO

A constituição dos elementos naturais no planeta por meio de seus movimentos remonta a tempos antigos, proporcionando o suporte para estudos e pesquisas que resultaram no domínio do fogo, no surgimento da roda, nas máquinas e nos equipamentos, que tinham como objetivo impulsionar a força física e facilitar o transporte (GIDENNS, 2010). Ao descobrir a força das águas, dos ventos, do sol e da terra, ao longo do tempo, foram estabelecidas conexões com a história da energia, culminando no desenvolvimento das máquinas a vapor durante a Revolução Industrial do século XVIII.

Gidenns (2010, p.164) destaca que “o pensador político norte-americano Jeremy Rifkin argumenta que as grandes transformações da história mundial ocorreram quando novas fontes de energia surgiram simultaneamente a avanços nas comunicações”. Nesse contexto, a primeira Revolução Industrial do século XVIII foi impulsionada pela combinação da energia proveniente do carvão, que promoveu mudanças nas forças produtivas da economia (BRUM, 2013).

Com o crescimento econômico e a busca incessante por lucro, o sistema capitalista passou por contínuas transformações, avanços técnicos, tecnológicos e a ascensão de velocidade e inteligência artificiais.

A chamada “Segunda Revolução Industrial”, que teve início no final do século XIX, foi caracterizada pela invenção da comunicação elétrica, começando com o telégrafo e se expandindo para o telefone, o rádio e a televisão. Esses avanços levaram ao surgimento do petróleo como principal fonte de energia e como o combustível predominante para os meios de transporte.

Atualmente, estamos à beira do que Rifkin chama de “Terceira Revolução Industrial”, na qual o desenvolvimento das comunicações em rede, representadas pelos computadores pessoais e pela internet, desempenha um papel fundamental. O potencial dessas tecnologias reside em sua convergência com fontes de energia renováveis (GIDENNS, 2010). As energias renováveis surgem como alternativas viáveis para viver de forma sustentável em relação ao sistema econômico como um todo, além da necessidade de substituir fontes de energia sujas e não renováveis por fontes limpas e renováveis, sem comprometer o crescimento econômico, mas sim fornecendo alternativas para impulsionar o crescimento, o desenvolvimento e a sustentabilidade econômica, social e ambiental simultaneamente.

Com base nesse contexto, surge a seguinte pergunta no estudo sobre energias

renováveis: como a eficiência energética das energias renováveis afeta o mercado brasileiro? Portanto, o objetivo geral deste estudo é demonstrar a eficiência e a expansão da energia renovável no mercado brasileiro, contextualizando seu desempenho na nova economia energética por meio de exemplos de casos no país e no mundo.

O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E ENERGIAS

De acordo com Letcher e Williamson (2004), a demanda de energia necessária para a sobrevivência humana evoluiu ao longo do tempo, tornando-se essencial para garantir nossa subsistência. Nas eras primitivas, a demanda de energia estava restrita ao vigor físico fornecido pelo corpo humano e à energia obtida através dos alimentos consumidos. No entanto, nos tempos modernos, a dependência energética do ser humano aumentou significativamente, principalmente devido a atividades vitais como iluminação, aquecimento, refrigeração, transporte e comunicação.

Essa crescente dependência energética da sociedade civilizada e os efeitos ambientais negativos resultantes, que contribuem para a escassez de recursos, levanta discussões sobre sustentabilidade energética. Bursztyn (2018, p.43) afirma que “sustentabilidade é comumente definida de forma abrangente, abarcando o crescimento e desenvolvimento econômico juntamente com a conservação ambiental”. Portanto, o desenvolvimento sustentável deve ser encarado como uma alternativa de longo prazo, em que a utilização de ecossistemas e recursos naturais deve satisfazer as necessidades atuais sem comprometer as necessidades e opções das gerações futuras.

Nesse contexto, a viabilidade de fontes de energia renováveis torna-se fundamental para alcançar o desenvolvimento sustentável e a continuidade de sistemas econômicos. Segundo Freire (2014) e Mantovani, Neumann e Edler (2016), as fontes de energia podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Não renováveis: são encontradas na natureza em quantidades limitadas e levam milhões de anos para se formarem. Uma vez esgotadas, suas reservas não podem ser regeneradas. Exemplos de fontes de energia não renováveis incluem combustíveis fósseis como petróleo, gás natural, carvão e a energia nuclear proveniente do urânio.

- Renováveis: são aquelas cujas fontes podem ser regeneradas em ciclos contínuos, repetindo-se em períodos relativamente curtos de tempo. Essas fontes têm a capacidade de se manterem disponíveis por longos períodos. Exemplos de fontes de energia renováveis incluem energia solar, eólica, hidrelétrica, oceânica, fotovoltaica e biocombustíveis.

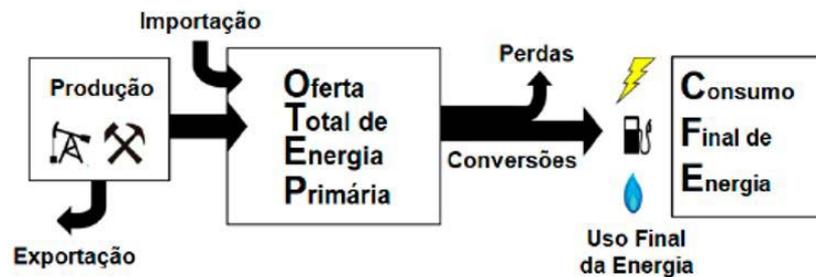
Segundo Goldemberg (2015), a maioria das fontes de energia renovável tem origem na radiação solar (como energia eólica, solar térmica, fotovoltaica e biomassa), que é inesgotável, não poluente e distribuída de forma mais equitativa pelo planeta em comparação aos combustíveis fósseis.

O fluxo de energia

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2018), a análise do fluxo de energia em uma determinada região oferece uma visão abrangente das principais fontes de

energia primária utilizadas e dos setores finais para os quais essa energia é direcionada. Donev (2017) apresentou um esquema básico do fluxo energético de uma região, ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Exemplo de fluxo energético.



Fonte: Adaptado Donev, 2017.

Os conceitos apresentados na Figura 1 são descritos por Donev (2017) e IEA(2020):

- Oferta Total de Energia Primária (OTEP) - refere-se à quantidade total de energia primária disponível em um país ou região. Isso inclui a energia produzida internamente, a energia importada e subtrai a energia exportada. A OTEP é usada para compilar os balanços energéticos e é uma medida abrangente da disponibilidade total de energia (DONEV, 2017).

- Consumo Final de Energia (CFE) - representa a energia primária e secundária utilizada por todos os setores de consumo final de um país ou região. Isso inclui os setores de uso final da energia, bem como o uso não energético. O CFE é calculado para diferentes setores, como industrial, residencial, serviços comerciais e públicos, agricultura e uso não energético. Ele fornece uma visão detalhada de como a energia é utilizada nos diferentes setores (IEA, 2020; MME, 2018).

Tanto a Oferta Total de Energia Primária quanto o Consumo Final de Energia fazem parte do fluxo energético de um país ou região. Na Figura 1, pode-se observar que a OTEP inclui a soma da energia produzida e importada pela região, subtraindo a energia exportada. Por outro lado, o CFE refere-se à energia convertida para uso final, levando em consideração as perdas durante o processo.

As energias renováveis

Desde os primórdios da humanidade, o ser humano tem buscado melhor qualidade de vida e conforto. Nesse sentido, uma das maiores descobertas da história foi o fogo, e posteriormente, no período neolítico, sua domesticação. Essa descoberta foi fundamental para o desenvolvimento humano, permitindo que as pessoas se aquecessem, se protegessem e se alimentassem de maneira mais segura, além de possibilitar a produção de novos materiais.

O fogo desempenhou um papel essencial na transformação da sociedade. Com o tempo, os seres humanos passaram a compreender e aproveitar melhor os benefícios desse elemento, descobrindo maneiras de utilizá-lo para criar produtos. Saltando na linha do tempo, chegamos ao final do século XVIII, durante a Revolução Industrial, quando o carvão se tornou o principal combustível utilizado pela sociedade. Apenas por meio da queima do carvão era possível obter seus benefícios. Nesse período, os seres humanos

aprenderam a transformar a energia liberada pela queima do carvão em movimento, levando ao desenvolvimento das primeiras máquinas a vapor.

A Revolução Industrial marcou o avanço tecnológico, o desenvolvimento de fábricas, indústrias e, especialmente, do setor de transporte. Com todo esse progresso tecnológico, a exploração dos recursos naturais se intensificou, especialmente no que diz respeito à extração e uso do carvão mineral e outros combustíveis fósseis.

Os combustíveis fósseis são originados da decomposição lenta de animais e vegetais ao longo de milhões de anos. Eles são divididos em três tipos: carvão, gás natural, petróleo e seus derivados. Como o processo de formação desses combustíveis na natureza é extremamente lento, eles são considerados recursos não renováveis.

A partir de cerca de 1830, esses combustíveis passaram a ser amplamente utilizados na geração de energia. Segundo Baird e Cann (2011, p. 293), “o calor produzido pela queima de combustíveis fósseis é utilizado para gerar vapor de alta pressão, que movimenta turbinas e, assim, produz eletricidade”. Por muitos anos, os combustíveis fósseis foram a principal fonte de energia, porém, devido ao seu uso excessivo, eles começaram a se tornar escassos e os impactos ambientais se tornaram cada vez mais evidentes.

Os combustíveis fósseis são considerados fontes de energia não renováveis devido ao seu processo de regeneração lento na natureza e ao alto teor poluente dos gases liberados durante a queima.

Ao longo dos anos, a eletricidade se tornou a força motriz do mundo, impulsionando o progresso da sociedade e possibilitando avanços tecnológicos em diversas áreas, melhorando as condições de vida da humanidade. Retroceder no desenvolvimento e reduzir o consumo de energia tornou-se praticamente impensável. Diante disso, os cientistas iniciaram a busca por recursos naturais ilimitados que gerassem energia limpa e causassem menos danos ao meio ambiente.

As fontes de energia renováveis são capazes de se regenerar naturalmente, com impactos ambientais mínimos ou quase inexistentes, seja por regeneração natural ou intervenção humana adequada (AZEVEDO, 2013). Essas fontes são uma excelente alternativa para substituir as chamadas “energias sujas” e evitar danos ao planeta.

A matriz global de geração de energia passou por mudanças significativas ao longo da história. Embora as fontes tradicionais, como carvão, gás natural, petróleo e seus derivados, ainda dominem a matriz energética mundial (*International Energy Agency* - IEA, 2021), as fontes renováveis têm ganhado cada vez mais destaque em eventos históricos, conferências e estudos sobre desenvolvimento sustentável.

De forma resumida, as fontes renováveis estudadas até o momento incluem:

- Biomassa: resíduos orgânicos de origem animal ou vegetal, que podem substituir os derivados de petróleo.
- Solar: aproveitamento da radiação solar para produção de calor ou eletricidade por meio de tecnologias térmicas e fotovoltaicas.
- Eólica: utilização da energia dos ventos para gerar eletricidade por meio de

aerogeradores.

- Hidrelétrica: aproveitamento do movimento das águas de rios para gerar energia mecânica e, posteriormente, eletricidade.

- Geotérmica: extração do calor proveniente do interior da Terra.

- Maremotriz ou oceânica: aproveitamento do movimento das águas oceânicas, como ondas, marés e correntes marinhas, para a geração de energia.

Essas fontes renováveis despertaram grande esperança, pois prometem resolver muitos dos problemas ambientais. Após a Conferência de Estocolmo, a conscientização sobre as mudanças climáticas e os danos causados ao meio ambiente impulsionou investimentos em estudos, pesquisas e tecnologias para a utilização desses recursos naturais, a fim de alcançar o desenvolvimento sustentável.

TECNOLOGIAS

Energia Solar

De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia (IEA), prevê-se um aumento de 50% na participação de fontes renováveis no período de 2019 a 2024. Dentre as fontes renováveis, a energia solar seria responsável por 60% do aumento projetado de 1200 GW de potência instalada (IEA, 2019-2024).

A expansão da energia solar tem sido significativa, como mostrado no gráfico 11, a partir de 2013. Esse crescimento é impulsionado pela implementação de usinas de pequeno e grande porte, tanto de geração distribuída quanto centralizada. A China se destaca como o país com maior crescimento nos sistemas fotovoltaicos. Nos últimos anos, o governo chinês tem buscado reduzir sua dependência do carvão, implementando políticas de incentivo e contribuindo para a redução dos custos da tecnologia solar.

Essa tecnologia tem sido uma aliada importante para os países com alta demanda energética, que precisam cumprir acordos firmados em conferências internacionais. A energia solar tem a vantagem de exigir menos estudos rigorosos para sua implantação e apresenta praticidade de investimento para consumidores de pequeno porte, como residências.

O Brasil, apesar de possuir abundância de energia solar, começou a dar maior atenção a essa fonte energética recentemente, a partir de alterações nas normas e leis entre 2012 e 2017. Segundo dados da ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), em 2021, a capacidade instalada de sistemas solares no Brasil já representava mais de 70% da potência da hidrelétrica de Itaipu, tornando o país um dos 15 com maior capacidade instalada de energia solar (ABSOLAR, 2021).

Energia Eólica

A China também desempenha um papel significativo no aumento da energia eólica em nível global, liderando as instalações em 2020 com a adição de 3 GW de capacidade,

o que representa cerca da metade do total global. De acordo com a GWEC (*Global Wind Energy Council*), é projetado que a China ultrapasse o Reino Unido no final desta década, impulsionado por subsídios governamentais voltados para o setor (GWEC, 2020).

A energia eólica pode ser dividida em duas modalidades: *onshore* (em terra) e *offshore* (no mar). A tecnologia *offshore* é amplamente utilizada na Europa, com a geração de energia em parques marítimos. Já a modalidade *onshore* é instalada em terra, utilizando aerogeradores. A principal diferença entre essas modalidades é o tamanho dos equipamentos, com as usinas marítimas permitindo turbinas de maior capacidade. Por exemplo, as maiores turbinas do Brasil têm capacidade aproximada de 4 MW, enquanto os aerogeradores do maior parque marítimo da Inglaterra têm capacidade de 8,25 MW, ou seja, o dobro da potência (IEA, 2021).

No Brasil, a energia eólica é a segunda maior fonte da matriz energética, sendo predominantemente utilizada a tecnologia *onshore*. Segundo dados da ABEEÓLICA (Associação Brasileira de Energia Eólica), o país conta com 795 parques e, em 2020, foi o terceiro maior instalador, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos (ABEEÓLICA, 2020).

Assim como a energia solar, a energia eólica desempenha um papel importante no controle do efeito estufa, uma vez que não emite gases durante a geração de energia. No entanto, a implantação de parques eólicos deve ser cuidadosamente estudada, pois pode modificar a paisagem natural e apresentar riscos para aves locais, além de possivelmente alterar rotas migratórias de algumas espécies de pássaros.

Energia da Biomassa

Estudos realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) destacam o potencial de crescimento da biomassa na produção de energia. A biomassa é considerada uma alternativa promissora para substituir os combustíveis fósseis, pois pode ser utilizada tanto para geração de energia elétrica quanto para produção de biocombustíveis.

Alguns países, como Suécia, Finlândia e Alemanha, estão investindo na geração de energia a partir da biomassa. Nessas nações, a biomassa representa de 20% a 30% da produção total de energia, um valor significativo em comparação com outros países. Em média, a biomassa representa cerca de 10% da matriz energética global, e esse número tende a aumentar nos próximos anos devido ao aumento do preço do petróleo e à crescente busca por fontes renováveis (IEA, 2021).

No Brasil, a energia proveniente da biomassa ocupa o terceiro lugar na matriz de fontes renováveis, ficando atrás apenas da energia eólica e hidrelétrica. Segundo a União Nacional de Bioenergia, a biomassa tem capacidade para suprir quase um terço da demanda de eletricidade do país.

A cana-de-açúcar é a principal fonte de biomassa no Brasil, responsável por 11 mil MW de um total de 15,32 mil MW de potência instalada. Além da cana-de-açúcar, insumos florestais como a lenha de eucalipto, resíduos sólidos urbanos e restos vegetais também contribuem para a produção de energia a partir da biomassa.

METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo utiliza a abordagem indireta para obter resultados diretos descritivos e explicativos do mercado de energias renováveis. A pesquisa bibliográfica é realizada por meio de livros, artigos e revistas que abordam a temática, fornecendo a base teórica para o estudo. Além disso, a pesquisa documental é utilizada para complementar os dados, do Balanço Energético Nacional (BEN, 2019, 2020, 2021, 2022).

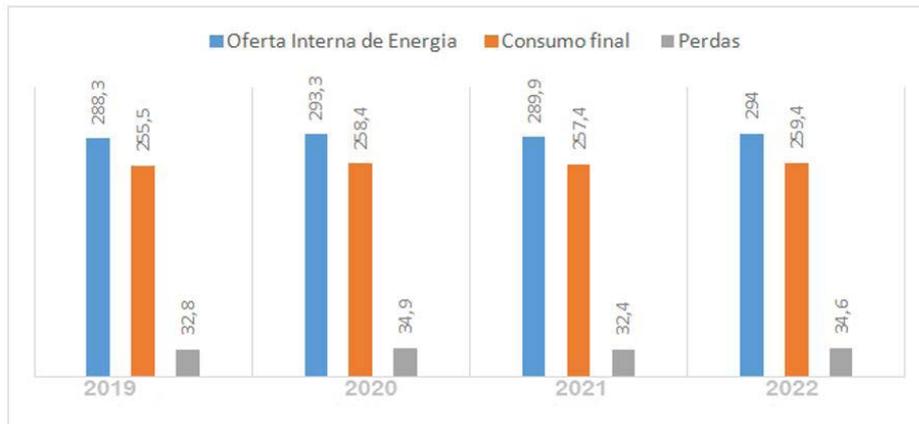
A pesquisa documental permite a obtenção de resultados descritivos diretos, fornecendo explicações construídas por meio de um estudo exploratório baseado em dados secundários qualitativos e quantitativos. Para analisar a eficiência energética no cenário brasileiro e estudar os casos de energias renováveis no país, é utilizada a estatística descritiva simples, utilizando variáveis absolutas e relativas. Os dados disponibilizados nos relatórios são processados e analisados utilizando o software Excel, que auxilia na organização e construção de tabelas, figuras e gráficos relacionados ao objetivo proposto.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Brasil tem mostrado um aumento significativo no uso de energias renováveis, impulsionado por discussões sobre desenvolvimento sustentável e a necessidade de reduzir o impacto ambiental causado pela geração de energia suja. A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992 resultou na elaboração da Agenda 21, que recomendou práticas sociais, econômicas, políticas e ambientais para preparar o mundo para os desafios do século XXI.

Os relatórios e a Agenda 21 destacaram a importância de mudar a matriz energética para fontes limpas e renováveis, visando reduzir o aquecimento global. No Brasil, a oferta interna de energia não renovável foi reduzida de 54,7% em 2021 para 53,9% em 2022, enquanto a energia renovável aumentou de 45,3% em 2020 para 46,1% em 2022, de acordo com o Balanço Energético Nacional.

Esse cenário de expansão das energias renováveis no país é impulsionado pela biomassa, energia hidrelétrica, solar, eólica, entre outras. Políticas governamentais têm contribuído para promover a geração de energia limpa. A Figura 2 ilustra a oferta interna de energia e a demanda de consumo final no Brasil, mostrando que a oferta média de energia é de 291,375 Mtep, enquanto a demanda é de 257,675 Mtep, considerando as oscilações nas perdas de transmissão de energia no país.

Figura 2 - Oferta e Consumo de Energia.

Fonte: BEN (2019, 2020, 2021, 2022).

A Figura 2 apresenta dados específicos sobre a oferta de energia e o consumo final no Brasil ao longo dos anos. Em relação à oferta de energia, houve um aumento de 1,3% entre 2019 e 2020, impulsionado pelo gás natural (6,7%) e energia eólica (26,5%). No entanto, ocorreu um decréscimo de 1,7% na oferta de energia de 2020 para 2021, devido a setores como alimentos e bebidas, metalurgia e transporte. Já em 2022, houve um aumento de 1,4% em relação ao ano anterior, principalmente devido às energias renováveis, como eólica, solar, biomassa da cana-de-açúcar e biodiesel.

No que diz respeito ao consumo final, observou-se um aumento de 1,2% de 2016 para 2020, devido aos setores de transporte, indústria e residencial. O consumo no setor de transporte foi impulsionado pelo óleo diesel e gasolina, enquanto a indústria utilizou carvão mineral e lixívia para a produção de papel e celulose. Em 2020-2021, houve uma redução de 1% no consumo final, principalmente na indústria de açúcar e metalurgia. Já em 2022, houve um aumento no consumo de veículos leves, com destaque para o etanol hidratado, que aumentou sua participação em relação à gasolina automotiva.

Essa transição para energias renováveis e redução da geração de energia suja teve impactos positivos na redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) no Brasil. O relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2021 mostrou que as emissões associadas à matriz energética brasileira atingiram 435,8 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂-eq) em 2019, com a maior parte proveniente do setor de transportes. Já em 2018, as emissões caíram para 416,1 milhões de toneladas de CO₂-eq, com a maior parte novamente vindo do setor de transportes. Esses resultados demonstram uma redução de 4,5204% nas emissões de dióxido de carbono à medida que o uso de energia renovável aumenta no país, contribuindo para a redução do aquecimento global.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar o contexto histórico da energia, desde a descoberta do fogo até as revoluções industriais, fica evidente a importância das fontes de energia para impulsionar o desenvolvimento humano. Com o avanço do capitalismo e a busca por lucro, houve uma demanda cada vez maior por fontes de energia, resultando na utilização predominante de combustíveis fósseis, que geram impactos ambientais significativos.

No entanto, o surgimento das energias renováveis trouxe uma nova perspectiva para o mercado energético, buscando suprir as necessidades de energia de forma sustentável. As energias renováveis, como a solar, eólica, biomassa e hidrelétrica, apresentam vantagens como a redução das emissões de gases de efeito estufa e a possibilidade de geração distribuída.

No mercado brasileiro, observa-se um crescimento significativo das energias renováveis nos últimos anos. Os dados do Balanço Energético Nacional revelam um aumento na participação das energias renováveis na matriz energética brasileira, principalmente impulsionado pela biomassa, energia eólica, solar e hidrelétrica. Essa transição para fontes mais limpas de energia resultou na redução das emissões de dióxido de carbono no país.

A eficiência energética das energias renováveis tem desempenhado um papel fundamental no mercado brasileiro. A busca por tecnologias mais eficientes e o incentivo à pesquisa e inovação nesse setor são essenciais para o desenvolvimento sustentável. Além disso, a eficiência energética contribui para a redução dos custos de produção e para a competitividade das fontes renováveis em relação às fontes não renováveis.

Diante desse panorama, é possível afirmar que a eficiência energética das energias renováveis afeta positivamente o mercado brasileiro, impulsionando o crescimento econômico, o desenvolvimento sustentável e a mitigação dos impactos ambientais. A transição para um sistema energético baseado em fontes renováveis é um desafio global, mas também uma oportunidade de transformação e construção de um futuro mais sustentável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Renewable Energy Market Update 2019. Paris: IEA, 2019-2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). Dados estatísticos: energia eólica no Brasil. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Dados estatísticos: energia solar fotovoltaica no Brasil. 2021.

AZEVEDO, R. L. Fontes de energia renováveis e não renováveis. In: VI Seminário Nacional de Ensino de Ciências da Saúde e do Ambiente (VI SENACS), 2013. Anais [...]. Teresina: Universidade Federal do Piauí, 2013. p. 387-394.

BAIRD, C.; CANN, M. Química Ambiental. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/362355/1233579/BEN+2018.pdf/234215ff-fb14-426f-9554-1ccec4c8e105>>. Acesso em: 13 de jun. de 2023.

BARBIERI, J. C. A questão ambiental e a sustentabilidade: Uma introdução. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1997.

BRUM, A. R. R. O papel das fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira. Revista FAE, v. 16, n. 2, p. 21-36, 2013.

DONEV, L. T. Análise da eficiência energética e da sustentabilidade em uma região com base em um sistema de indicadores. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ENERGIA DA BIOMASSA, conheça o potencial no Brasil. União Nacional da Bioenergia, 2021. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/09/28/energia-da-biomassa-conheca-opotencial-no-brasil.html>. Acesso em 13 de jun. 2023.

GIDDENS, A. As consequências da modernidade. São Paulo: Editora Unesp, 2010.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Global Wind Report 2020. [S.l.], 2020.

GOLDEMBERG, J. Energia e Meio Ambiente. São Paulo: Edusp, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Renewable Energy Market Update 2021. Paris: IEA, 2021.

LETCHER, T. M.; WILLIAMSON, D. B. UnderstandingtheEnvironment: BridgingtheDisciplinary Divides. London: Routledge, 2004.

MANTOVANI, D. A.; NEUMANN, P. S.; EDLER, J. A. Fontes de energia renováveis: uma revisão sobre os processos de conversão em biogás e energia elétrica. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 20, n. 2, p. 661-673, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Balanço Energético Nacional 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/362355/1233579/BEN+2018.pdf/234215ff-fb14-426f-9554-1ccec4c8e105>>. Acesso em: 13 de jun. de 2023.

Implantação de sistema fotovoltaico em condomínio residencial horizontal no município de Araraquara-SP

Implementation of a photovoltaic system in a horizontal residential condominium in the municipality of Araraquara

Marcio Odair Pazin

Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

Antônio Pinto do Nascimento Neto

Orientador. Docente Curso de Engenharia elétrica da Universidade de Araraquara-UNIARA. Araraquara-SP.

Fabiana Florian

Coorientador. Docente Curso de Engenharia elétrica da Universidade de Araraquara-UNIARA. Araraquara-SP.

RESUMO

Energia solar fotovoltaica é uma das fontes produtoras de energia mais econômica no momento, o seu custo de implantação esta somente acima da energia eólica devido ainda da pouca divulgação, mas vem se destacando no cenário das fontes produtoras de energia por ser a mais limpa das existentes. Com os custos da energia elétrica cada vez mais em alta os sistemas fotovoltaicos vêm se destacando nos cenários das fontes produtoras de energia mais promissoras no mundo, no Brasil principalmente devido ao alto índice solarimétrico anual. Os sistemas fotovoltaicos geram energia sem causar impacto ambiental, com baixíssima produção de resíduos, na sua cadeia produtiva. Possuem uma grande facilidade de instalação, em alguns casos pode ser montado pelo próprio cliente, adquirido no formato de *kit plug and play*. Os custos de implantação são consideravelmente baixo, frente a produção, um sistema fotovoltaico se paga com prazo extremamente curto de tempo diante da sua vida útil. A vida útil dos painéis conversores de energia solar em energia elétrica em corrente contínua variam entre 20 e 25 anos. Já os inversores utilizados para converter a energia de corrente contínua para corrente alternada na tensão compatível com a rede elétrica da concessionária que atende à unidade consumidora, um tempo de vida de aproximadamente de 10 a



12anos, essa vida varia de acordo com cada fabricante. Consumidores de energia abaixo de 75kWh se enquadram no sistema de microgeração distribuída, nesta categoria os custos de implantação são os mais acessíveis, sendo que dentre está a faixa, quanto maior for o consumo da unidade mais rápida é o retorno do valor investido na implantação O *payback* dos valores investido varia ente 18 e 84 meses, variando de acordo com o tipo do sistema instalado e o consumo do local da instalação.

Palavras-chave: energia solar. índice solarimétrico. Lei 14300. microgeração distribuída. sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy is one of the most economical sources of energy at the moment, its implementation cost is only above wind energy due to the lack of publicity, but it has been standing out in the scenario of energy sources for being the cleanest of the existing ones .With the cost of electrical energy increasingly high, photovoltaic systems have been standing out in the scenarios of the most promising energy producing sources in the world, in Brazil mainly due to the high annual solarimetric index. Photovoltaic systems generate energy without causing an environmental impact, with very low waste production in its production chain. They are very easy to install, in some cases it can be assembled by the customer, purchased as a plug and play kit. Deployment costs are considerably low, compared to production, a photovoltaic system pays for itself in an extremely short period of time compared to its useful life. The useful life of panels converting solar energy into direct current electricity varies between 20 and 25 years. As for the inverters used to convert energy from direct current to alternating current at a voltage compatible with the utility grid that serves the consumer unit, a lifetime of approximately 10 to 12 years, this life varies according to each manufacturer. Energy consumers below 75kWh fit into the distributed microgeneration system, in this category the implementation costs are the most accessible, and within this range, the greater the consumption of the unit, the faster the return on the amount invested in the implementation. *payback* of the amounts invested varies between 18 and 84 months, varying according to the type of system installed and the consumption of the installation site.

Keywords: solar energy. solarimetric index. Law 14300. distributed microgeneration, photovoltaic system.

INTRODUÇÃO

A constante busca por fontes de energias renováveis é um dos grandes desafios enfrentados pela humanidade nos últimos anos e vem ganhando muita importância com o aumento do aquecimento global. Uma das fontes de energia que vem se destacando com objetivo de mitigar problema é o aproveitamento da energia irradiada pelo sol, fonte limpa, gratuita e inesgotável.

Existem atualmente duas formas conhecidas de gerar energia elétrica aproveitando a energia irradiada pelo sol, a fotovoltaica e a heliotérmica. A fotovoltaica consiste na conversão de fótons em energia elétrica através de células de materiais semicondutores

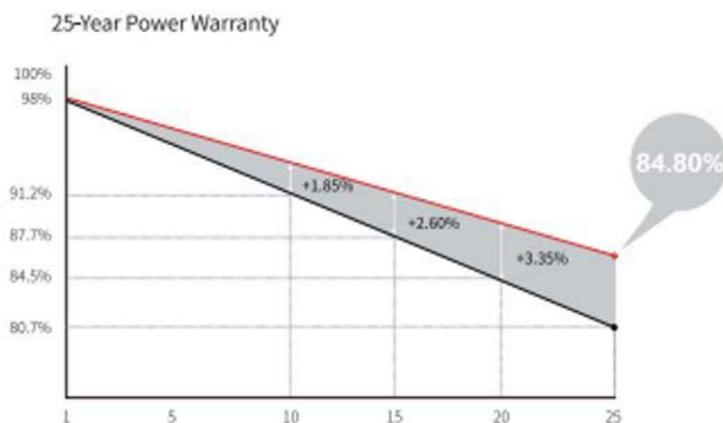
que apresenta o efeito fotovoltaico. Já a heliotérmica utiliza de lentes e espelhos para concentrar os raios solares em um ponto específico, aquecendo uma solução de salmoura ou óleo que gera vapor e movimenta uma turbina que está conectada a um gerador elétrico para produzir energia elétrica

Este trabalho apresenta a implementação de um sistema Fotovoltaico em um condomínio horizontal no município de Araraquara – SP.

A implantação do sistema fotovoltaico é muito viável devido ao retorno rápido do investimento. O retorno começa assim que o sistema fotovoltaico entra em operação (SEBRAE 2022).

Os painéis de conversão de energia solar em energia elétrica através de sistema fotovoltaico têm capacidade de produzir energia de forma permanente conforme demonstrado na figura 1 e já comprovado por 30 anos, com pequenas intervenções periódicas de limpezas (LONGI 2022).

Figura 1 - Decaimento da capacidade de geração de energia de painéis fotovoltaicos LONGI LR-72HBD 555M.



Fonte: LONGI (2022)

Os investimentos em implantação de sistema fotovoltaico representam uma pequena parcela do valor econômico investido em energia ao longo da vida útil do sistema, mesmo para pequenos consumidores, no caso do condomínio que é considerado micro gerador (ANEEL, 2006).

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico deve-se levar em consideração o consumo de energia apurado durante um ano de consumo, sendo que no caso deste trabalho será usado o intervalo de fevereiro de 2022 até março de 2023.

São utilizadas as coordenadas geográficas S=21°48'06", W48°09'21" para localização do sistema de um modo geral, estas coordenadas serão consideradas para os cálculos de apontamento e inclinação dos painéis.

Inicialmente será dimensionado o sistema fotovoltaico com o levantamento da demanda média anual de energia elétrica. Com base na demanda apurada será escolhida a potência dos painéis fotovoltaicos, para este projeto escolhemos os painéis fotovoltaicos com potência de 555W (LONGI LR5-72HBD 555M), inversores determinamos da Weg, por ser o que foi encontrado com melhor custo benefício no mercado nacional no momento da

elaboração deste trabalho, com a determinação do número de painéis necessários para produzir a quantidade de energia suficiente.

Com base nos dados de quantidades de painéis, inversores e o disposição dos equipamentos, elaboramos um projeto, apresentamos para aprovação da concessionária, após recebermos o parecer de acesso da concessionária, partimos para a montagem das estrutura metálicas necessária para fixação dos painéis, infra estrutura subterrânea e aérea para proteção de cabos de CA e CC garantindo interligação segura dos painéis fotovoltaicos aos inversores e dos inversores ao ponto de injeção de corrente nas Unidades Consumidoras (U.C.)

O sistema fotovoltaico foi dimensionado para suprir a demanda diurna do condomínio e injetar o excedente de produção na rede da concessionária local, toda vez que a demanda de consumo for menor que a geração. Com o intuito de fazer compensação de energia em horários em que o sistema fotovoltaico não estiver produzindo o suficiente para sustentar a carga.

Para dimensionamento da capacidade do sistema necessário para suprir a demanda do condomínio, tomamos como base a demanda média anual de todas as unidades consumidoras de uso comum do condomínio.

A viabilidade da implantação do sistema fotovoltaico no condomínio ocorreu devido ao alto custo dos quilowatts hora que se paga para a concessionária.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Fontes de energias renováveis

As fontes de energias renováveis são aquelas que não possuem limites de disponibilidade e provem de fontes naturais como água, vento, biomassa, sol e marés, que usadas para produzir energia limpa e sustentável.

No Brasil em 2023 se destaca como fontes de energia limpa e sustentável:

Energia Hidrelétrica: gerada nas usinas hidroelétrica proveniente da força da água gerada pela diferença de desníveis dos rios, a energia hidráulica é convertida em energia mecânica através de turbinas que por sua vez tem seu eixo ligado a um gerador, que converte em energia elétrica.

Energia Eólica: aerogeradores ou turbinas converte a força dos ventos em energia elétrica, estes são instalados em locais onde os ventos são constantes se destaca a região sul do Rio Grande do Sul e uma grande parte do nordeste brasileiro

Energia da Biomassa: utiliza material proveniente de vegetais, palha da cana de açúcar, casca de eucalipto em empresa de celuloso e papel, óleos vegetais, Casca de arroz. Através da queima destes itens em caldeiras produz vapor que é utilizado para girar turbinas que por sua vez em seu eixo ligado a um gerador convertendo a energia mecânica em elétrica

Energia Solar (fotovoltaica), é a conversão direta da luz solar em eletricidade com o auxílio de painéis composto de células de um material semicondutor que gera uma diferença de potencial.

A geração proveniente de usinas hidrelétricas representa 59,24% de toda a geração de energia gerada no Brasil, este sistema além de estar se esgotando a capacidade ele tem um agravante que é o alagamento de terras férteis e muito propícias para a produção de alimentos nas margens dos rios.

Pelo fato de a posição geográfica do Brasil ser muito favorável para receber irradiação solar, possuir legislações energéticas favoráveis, queda gradativa dos custos de implantação, facilidade de instalação, fica evidente que o futuro da energia no Brasil está fortemente ligado a geração de energia solar fotovoltaica.

No primeiro trimestre de 2023 foi registrado no Brasil que 90% da energia que abasteceu o Sistema Integrado Nacional (SIN) veio de fontes renováveis, destas uma das fontes que vem crescendo muito é o sistema fotovoltaico que tem representado 4,4% de toda a energia gerada. ONS (2023)

A geração de energia solar fotovoltaica injetado no SIN cresceu 63,7% nos últimos 12 meses. CCEE (2023)

Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia renovável, limpa e inesgotável que utiliza a radiação solar para gerar eletricidade. Baseia-se no denominado efeito fotoelétrico, através do qual determinados materiais são capazes de absorver fótons (partículas luminosas) e liberar elétrons, gerando corrente elétrica.

Para isso, se utiliza um dispositivo semicondutor denominada célula solar ou célula fotovoltaica, que pode ser de silício monocristalino, policristalino ou amorfo, ou outros materiais semicondutores de camada fina. As células de silício monocristalino são obtidas a partir de um único cristal de silício puro e alcançam a máxima eficiência, entre 18 % e 20 % em média. As células de silício policristalino são criadas em pacotes com vários cristais de forma desordenada, tendo, os custos de produção não tão elevados, apresenta uma eficiência média entre 16 % e 17,5 %. Finalmente, as células de silício amorfo têm uma rede cristalina desordenada, o que implica um pior desempenho (eficiência média entre 8 % e 9 %), o seu custo de produção é inferior comparado aos demais (PORTAL SOLAR 2023).

Radiação Solar

A disponibilidade de radiação solar, energia irradiada total que incide na superfície do planeta terra, e dependente das condições das camadas atmosféricas, da latitude do ponto de instalação, da estação do ano, hora do dia e das condições climáticas, ANEEL (2016).

Segundo Lima (2003) as influencias são definidas da seguinte forma:

1. Latitude: Conforme a latitude aumente a quantidade de raios solares que atinge a superfície do globo terrestre diminuí conforme figura 2.

2. Estações do ano: o movimento de translação da terra em volta do sol, responsável pelas estações do ano, perfaz uma órbita elíptica plana. O eixo de rotação da terra em volta de si mesma não é coincidente com o eixo da elipse, este possui uma diferença de $23^{\circ}27'$, de acordo com a figura 2. De maneira que por um período do ano fica mais exposto à radiação solar o hemisfério sul e em outro período o hemisfério norte.

Figura 2 – Movimento da terra em torno do sol e as estações do ano.



Fonte: Atlas Brasileiro solar 2ª edição Rev.1 p16 – São José do Campos 2017

1. Hora do dia: de acordo com o horário do dia o ângulo de incidência dos raios solares a superfície da terra é diferente.
2. Condições climáticas: a existência ou não de nuvens no céu interferem na incidência de raios solares que incide na superfície da terra em cada ponto.
3. Condições da atmosfera: dias nublados, poluídos ou com incidências de fumaças proveniente de queimadas (época de inverno quando o índice de queimadas é alto) alteram o índice de radiação solar, segundo Hudson Markell (1985). Este fator interfere muito pouco porque a incidência de radiação que atinge a terra é composta por radiação direta e difusa, em dias de céu claro 10% da radiação que incide sobre a terra é difusa, quanto que em dias nublados 100% da radiação é difusa.

Radiação solar no Brasil

O Brasil é um dos países que mais recebe irradiação solar em todo o mundo. Por estar localizado próximo à linha do Equador, o país recebe alta incidência de sol durante todo o dia, com pouca variação ao longo das estações do ano, em função das características de translação do planeta. Segundo Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), o país recebe, durante todo o ano, mais de 3 mil horas de brilho do sol, correspondendo a uma incidência solar diária que varia de 4.500 a 6.300 Wh/m².

O território brasileiro, como um todo, possui um importante potencial para geração de energia solar.

A região que apresenta a maior disponibilidade energética é o Nordeste, devido sua localização geográfica estar muito próxima da linha do Equador, seguidas pelo Centro-Oeste e Sudeste.

A região Norte, apesar de estar geograficamente muito bem posicionada, a radiação solar é menor devido as suas condições climáticas que reduzem a incidência de radiação solar direta.

Radiação Solar em Araraquara – SP

De acordo com Labren (2021), realizou se uma pesquisa de dados para a região onde este trabalho se desenvolveu, foi tomado como base as coordenadas geográficas S=21°48'06", W48°09'21", localizada na sede do município de Araraquara – SP.

Observa na figura 3 que o mês que mais teve incidência solar foi o de agosto e o de menor foi o de junho, ficando a média anual o valor de 5249 Wh/m² dia

Figura 3 - Irradiação Solar média mensal e anual da região de Araraquara-SP.



Fonte: Labren (2021)

Com o valor da irradiação média anual da região e o tipo de módulo definidos demos início ao projeto do sistema fotovoltaico.

Sistemas fotovoltaicos geram energia limpa e inesgotável pela conversão de energia luminosa em energia elétrica. Existem dois tipos de sistema solar fotovoltaico;

Sistema Fotovoltaico Isolado (*Off Grid*), utilizar baterias para acumular a energia produzida para ser consumida em horários que não há produção, (comumente usual em locais não atendido por rede de energia elétrica (propriedades rurais ou locais remoto).

Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede de uma concessionaria (*On Grid*), este utiliza a rede de distribuição de energia da concessionaria para injetar o excedente de energia produzido e quando não há produção a unidade consumidora absorve energia da rede

No decorrer deste projeto será utilizado o sistema fotovoltaico conectado à rede da concessionaria CPFL Paulista com o intuito de realizar a compensação de energia conforme resolução Normativa ANEEL N°1059.

Normas ANEEL

Em 17 de abril de 2012, a ANEEL publicou a Resolução Normativa 482, que De acordo com o artigo 1°, visa “estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de

compensação de energia elétrica” ANEEL (2015).

De acordo com Resolução normativa o artigo 2º define que para se enquadrar em microgeração deve ser uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize fontes de energia renovável, como a energia solar fotovoltaica, conforme regulamentação 482/12 da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Ou seja, a microgeração de energia solar é toda e qualquer sistema de energia solar fotovoltaica conectado à rede que seja menor que 75kWp:

Quando a quantidade de energia gerada for superior ao consumo da unidade consumidora esse valor será acumulado como créditos, que pode ser utilizado para abater na fatura dos próximos meses onde a produção for inferior ao consumo.

Os créditos gerados têm validade de 60 meses, dentre este período podem ser utilizados para abater na conta dos meses em que a geração for inferior a produção, ou podem ser utilizados para abater em fatura de outra unidade consumidora desde que de mesma titularidade, podendo ser CPF ou CNPJ, além disso a unidade geradora e a unidade consumidora precisam estar contidas na área de atendimento da mesma concessionária (Lei 14300/2022).

DESENVOLVIMENTO

Este trabalho tem por objetivo um estudo de caso de um sistema de geração de energia elétrica através de sistema fotovoltaico, conectado em duas unidades consumidoras interligada a rede de distribuição de energia elétrica da CPFL Paulista, com o intuito gerar energia elétrica em duas unidades consumidoras e realizar compensação em 3 UC, sendo a geração nas U.C. 4000465959 e U.C. 4000465944 e compensação nas U.C. 4000465959, U.C. 4000465944 e UC. 4000465965, as demais U C não serão utilizadas para compensação por ter um consumo inferior ao valor mínimo de consumo que é de 30kWh para os padrões monofásicos, de 50kWh para os padrões bifásicos e de 1000kWh para os padrões trifásicos (ANEEL 2012). Estas unidades monofásicas e as bifásicas, futuramente serão desligadas da rede da CPFL e interligadas entre as unidades produtoras através de cabeamento e infraestrutura interna do condomínio.

Levantamento do consumo médio anual

Apresentado na Tabela 1 o consumo mensal de cada UC, as quais foram consideradas para determinar o consumo médio anual de cada unidade consumidora.

Tabela 1 – Consumo apurado em cada unidade consumidora nos últimos 12 meses e a média totalizada mensal.

U. C.	Fev.	Mar	Abr.	Mai	Jun.	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Média anual
4000465965	428	455	427	556	515	497	423	495	529	486	530	510	488
4000864915	22	23	28	27	26	30	29	30	26	29	25	22	26
4001015811	54	43	61	55	57	71	64	79	99	100	95	84	72
4000465959	2927	2896	3504	2984	2762	3235	2956	3085	2882	3090	3007	2585	2993

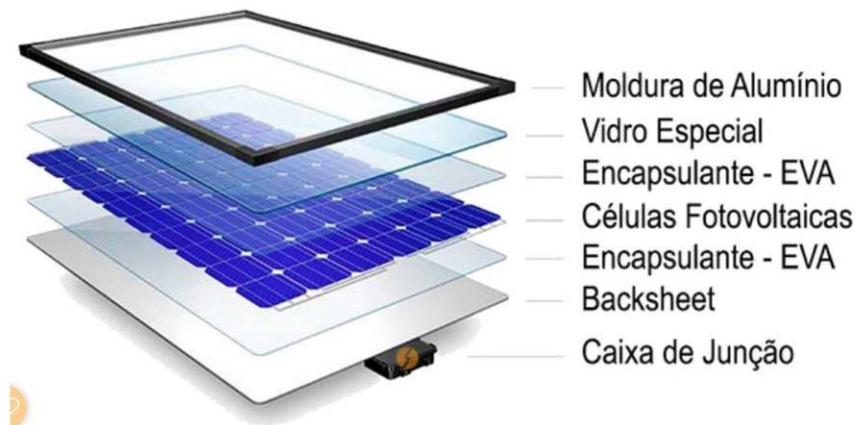
4000465944	1315	1669	2308	2025	1895	2190	2029	2134	1937	2166	2015	1746	1952
4000987112	17	17	21	20	17	19	18	17	16	17	15	13	17
4000987113	8	12	12	11	19	24	23	22	21	21	28	15	18
4001053915	35	30	32	27	24	38	44	47	42	42	40	36	36
Média Total Mensal													5603

Fonte: do autor

Painéis Fotovoltaicos

É o item básico para todo o sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica. Conforme apresentado na figura 4. O painel fotovoltaico é constituído de uma moldura de alumínio, uma camada de vidro, uma camada de encapsulante, uma camada de células fotovoltaicas, uma camada de encapsulante, uma camada de *Backsheet* e por último a caixa de junção por onde sai os cabos para interligação dos painéis (PORTAL SOLAR 2023)

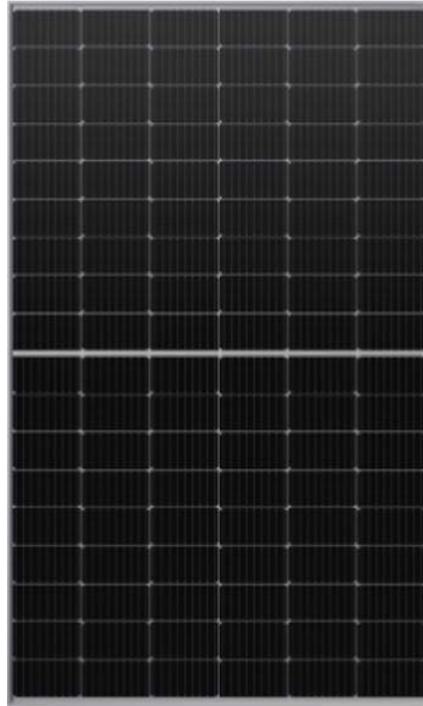
Figura 4 – Itens e sua posição na composição de um painel fotovoltaico.



Fonte: Portal Solar (2023)

As células fotovoltaicas são fabricadas a partir de fatias muito finas (185microns) de espessura de cristal de silício com pureza de 99,9999% ligadas em série e em paralelo com o objetivo de aumentar a tensão e manter o valor da corrente. A tensão de um painel fotovoltaico será o produto da tensão de cada célula pela quantidade de células que compõe o painel (PORTAL SOLAR, 2023).

Os painéis mais comercializados no momento são compostos de 36, 60 ou 72 células, com cada célula produzindo uma diferença de potencial que varia de 0,3 a 0,5 Volts (LONGI, 2022).

Figura 4 -Painel Solar Fotovoltaico Modelo LR-72HDB 555M.

Fonte: Longi (2022)

A figura 4 mostra Painel utilizado no projeto, da Longi, modelo LR5-72HDB 555M de silício monocristalino HALF-CELL, com potência nominal de 555W. A escolha por este modulo se deu devido ser distribuída no Brasil, pela WEG. As características deste painel podem ser encontradas em: https://static.longi.com/Hi_MO_5m_LR_5_72_HPH_540_560_M_35_35_and_15_G2_V16_b8597c604e.pdf.

Cálculo da potência fotovoltaica e número de painéis

Por ser um sistema trifásico, a Energia do Custo de Disponibilidade () é de 100kWh e o sistema fotovoltaico estar ligado em 2 UC, temos que pela equação 1 calculamos a Energia Mensal do Projeto (E_{MP}):

$$E_{MP} = E_M - (2 * E_{CD}) \quad (1)$$

$$E_{MP} = 5603 - (2 * 100)$$

$$E_{MP} = 5603 - 200$$

$$E_{MP} = 5403 \frac{kWh}{mês}$$

Onde:

E_{MP} = Energia Mensal do Projeto;

E_M = Energia Média Mensal;

E_{CD} = Energia de Custo de Disponibilidade (Trifásico 100kWh)

Com os dados referente a: E_{MP} temos pela equação 2 que a Energia fotovoltaica a ser compensada (E_{FV}):

$$E_{FV} = E_{MP} \quad (2)$$

$$E_{FV} = 5403 \frac{kWh}{mês}$$

Onde:

E_{FV} = Energia Fotovoltaica a ser compensada;

EC = Energia de Compensação;

Passamos a calcular a Irradiação Solar (I_{RS}) a partir de dados do sistema *sundata*, ver na seção 2.4.2, sendo o local escolhido a cidade de Araraquara-SP.

$$I_{RS} = 5,25 \frac{kWh}{mês}$$

Onde:

I_{RS} = Irradiação Solar;

KWh = kilowatts hora;

Com os dados acima, usamos a equação 3 para dimensionar a potência de pico do sistema fotovoltaico (P_{FV}).

$$P_{FV} = \frac{1000 \frac{W}{m^2} * E_{FV}}{I_{RS} * 30 * \eta_{SIS}} \quad (3)$$

Onde:

P_{FV} = Potência pico do sistema fotovoltaico(W);

E_{FV} = Energia Fotovoltaica dado em ($\frac{kWh}{mês}$);

I_{RS} = Irradiação Solar do local dado em ($\frac{kWh}{m^2 dia}$);

η_{SIS} = Eficiência do sistema fotovoltaico;

A constante 1000 é referente à $1000 \frac{W}{m^2}$, foi utilizado porque os painéis fotovoltaicos são fabricados para a condição de teste padrão (STC) de irradiância $1000 \frac{W}{m^2}$ a constante 30 corresponde a 30 dias inserido na equação 3 porque a conta de energia elétrica é mensal.

Para definir a eficiência do sistema fotovoltaico (η_{SIS}) lançamos da equação 4:

$$\begin{aligned} \eta_{SIS} &= \eta_{ar} * \eta_{ter} * \eta_{inv} \eta_{var} \\ \eta_{SIS} &= 0,95 * 0,95 * 0,9865 * 1 \\ \eta_{SIS} &= 0,88 \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

η_{ar} = Eficiência devido a poluição do ar

η_{ter} = Eficiência devido as perdas térmicas;

η_{inv} = Eficiência devido ao inversor;

η_{var} = Eficiência devido a vários fatores como (sombreamento, orientação dos módulos etc.;

Substituindo os valores na equação 5 tem-se:

$$P_{FV} = \frac{1000 \frac{W}{m^2} * E_{FV}}{I_{RS} * 30 * \eta_{SIS}}$$

$$P_{FV} = \frac{1000 * 5403}{5,25 * 30 * 0,88} \quad (5)$$

$$P_{FV} = 38.982,68W$$

De acordo com Longi (2022) o painel escolhido no sistema STC (*Standard Testing Conditions*) Condições Padrões de Teste, apresentou potência de 550Wp já no sistema NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*) apresenta potência de 411,1Wp

Com a equação 6 calculamos o número de painéis Fotovoltaicos () necessários.

$$N_{MOD} = \frac{P_{FV}}{P_{MOD}} \quad (6)$$

$$N_{MOD} = \frac{38.982,68}{550}$$

$$N_{MOD} = 70,88$$

Onde:

N_{MOD} = Número de Painéis Fotovoltaicos;

P_{FV} = Potencia Fotovoltaica;

P_{MOD} = Potência do Painel Fotovoltaico;

O número de painéis fotovoltaicos é uma grandeza física que só admite valores inteiros, portanto, arredondou se o valor para cima fazendo com que $N_{MOD} = 71$ painéis, mas por questões de estética dos locais de instalação corrigimos para $N_{MOD} = 86$. Devemos então corrigir a potência fotovoltaica real instalada no lado de CC, utilizando a equação 7.

$$P_{FV} = N_{MOD} * P_{MOD}$$

$$P_{FV} = 86 * 550 \quad (7)$$

$$P_{FV} = 47730W \text{ ou } P_{FV} = 47,73kW$$

Para a finalização dos dimensionamentos calculamos a área necessária para a instalação dos painéis, utilizando a equação 8 calculamos a área media total necessária para instalação dos 86 painéis

$$A_{TMOD} = A_{MOD} * N_{MOD}$$

$$A_{TMOD} = 2,58 * 86 \quad (8)$$

$$A_{TMOD} = 221,88m^2$$

Onde:

A_{TMOD} = Área Total dos Painéis Fotovoltaicos;

A_{MOD} = Área de um Painel Fotovoltaico;

N_{MOD} = Número de Painéis Fotovoltaicos;

No local de instalação do projeto não possuir área livre para instalação de forma continua a instalação foi dividida em três áreas de diferentes tamanhos de forma a aproveitar as regiões disponíveis passível de instalação. Sendo:

14 painéis instalados sobre o telhado para portaria utilizando uma área de 36,12m²;

36 painéis sobre o telhado do salão de festas ocupando uma área aproximada de 92,88m²;

36 painéis em estrutura metálica auto, portanto instalado em uma área grama ocupando uma área aproximada de 92,88m²;

Inversor

Inversor é o equipamento responsável por converter a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos CC Corrente Contínua em CA Corrente alternada 60Hz de acordo com a rede de distribuição da concessionária, a soma das potências dos inversores deve ser igual ou superior a potência dos painéis fotovoltaicos. Na figura 5 apresentamos imagem dos inversores

Figura - Inversor solar Weg a) Modelo SIW300H M60 L1 – b) SIW500H ST020 M2.



Fonte: Weg (2022)

Como mostrado na figura 5a inversor WEG de potência 6,0 kW, e na figura .5b inversor WEG de potência 20kW (WEG, 2022). Foi escolhido dois tamanhos diferente de inversores para atender as necessidades de áreas para instalações do sistema fotovoltaicos, sendo um sistema com 14 painéis de 550Wp (Sistema 1), um sistema com 36 painéis de 550Wp (Sistema 2.1 e Sistema 2.2) e outro sistema com 36 painéis de 550Wp com previsão para um aumento de geração quando necessário (Sistema 3)

Segundo Portal Solar (2023), recomenda que os inversores sejam subdimensionados

em até 1/3 da potência nominal do sistema fotovoltaico, com isso surge o Fator de Dimensionamento de Inversores (FDI)

Dimensionamento dos Inversor

Os inversores fotovoltaicos tem sido uma das peças que mais tem onerado o valor do kWh produzido por sistemas fotovoltaicos, visto que os custos dos painéis têm baixado e suas capacidades produtivas tem melhorado com as tecnologias novas que vem surgindo, já os inversores tem diminuído também, mas em menor escala, isso vem levando a necessidade de otimizar ao máximo o inversor.

De modo que ele não trabalhe por muito tempo com potência abaixo da nominal e nem seja sobrecarregado. Para isso usamos um inversor de menor capacidade, consequentemente de menor valor de compra.

Visto que os inversores deste projeto serão instalados em ambiente interno e em ambos os locais serem climatizados, dimensionaremos conforme FDI representando a relação entre a potência nominal do CA e a potência de pico do sistema fotovoltaico conforme a equação 9

$$FDI = \frac{P_{Nca}}{P_{FV}} \quad (9)$$

Onde:

FDI = Fator de Dimensionamento do Inversor;

P_{Nca} = Potencia Nominal em Corrente Alternada do Inversor (W);

P_{FV} = Pico do Painel Fotovoltaico (WP);

Para o Sistema 1 instalado sobre o telhado da portaria utilizaremos um inversor WEG – SIW 300H M060 L1, as características dos Inversores da WEG utilizados neste projeto podem ser encontradas em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h09/h17/WEG-SIW-inversores-string-50105878-pt.pdf>.

Fator de dimensionamento do Sistema 1

$$FDI_1 = \frac{P_{Nca}}{P_{FV}}$$

$$FDI_1 = \frac{6000Wp}{(14 * 550)}$$

$$FDI_1 = 0,78$$

Fator de dimensionamento do Sistema 2

$$FDI_2 = \frac{P_{Nca}}{P_{FV}}$$

$$FDI_2 = \frac{6000Wp}{(16 * 550)}$$

$$FDI_2 = 0,68$$

Fator de dimensionamento do Sistema 3

$$FDI_3 = \frac{P_{Nca}}{P_{FV}}$$

$$FDI_3 = \frac{20000Wp}{(52 * 550)}$$

$$FDI_3 = 0,70$$

No sistema 1, foi instalado 2 conjuntos paralelos sendo um de 7 painéis em serie no inversor, tendo uma tensão de circuito aberto de 398,4Voc/V e uma corrente de curto circuito de 13,12A.

No sistema 2, foi instalado 2 conjuntos paralelos sendo um de 8 painéis em serie no inversor, tendo uma tensão de circuito aberto de 398,4Voc/V e uma corrente de curto circuito de 13,12A.

No sistema 3 foi instalado 4 conjuntos paralelos de 11 painéis em serie em cada inversor, tendo uma tensão máxima de circuito aberto de 547,8Voc/V e uma corrente de curto circuito de 13,12A.

RESULTADOS

Apresentado na tabela 1 os valores estimados produzir de energia elétrica com a instalação do sistema fotovoltaico mensal. Para isso levou em conta a radiação solar fornecida Labren (2021) e apresentado na figura 3 e não considerando o decaimento de eficiência das células fotovoltaicas.

Tabela 2 – Calculo estimado mensal e anual de energia a ser produzido pelo sistema fotovoltaico.

Mês	Nº de Dias	Potência Instalada (kWh)	Radiação solar (kWh/m ²)	Rendimento dos inversores (98,65%)	Energia Mensal Produzida (kWh)
Janeiro	31	39,6	5,08	0,9865	6152,02
Fevereiro	28	39,6	5,60	0,9865	6125,45
Março	31	39,6	5,31	0,9865	6430,56
Abril	30	39,6	5,38	0,9865	6305,16
Mai	31	39,6	4,91	0,9865	5946,14
Junho	30	39,6	4,76	0,9865	5578,54
Julho	31	39,6	4,97	0,9865	6018,81
Agosto	31	39,6	5,72	0,9865	6927,08
Setembro	30	39,6	5,31	0,9865	6223,12
Outubro	31	39,6	5,40	0,9865	6539,55
Novembro	30	39,6	5,25	0,9865	6152,80
Dezembro	31	39,6	5,30	0,9865	6418,45
Total Anual	365	39,6	5,25	0,9865	74.847,19

Fonte: do autor

A tabela 2 apresenta a produção anual do sistema fotovoltaico projetado neste estudo, que será de aproximadamente 74,85MWh/Ano, de acordo com dados do índice solarimétrico para a região de Araraquara – SP, obtido no site da Labren (2021). Por serem

dados naturais a radiação solar sofre variações que reflete na geração.

CONSIDERAÇÃO FINAIS

Este trabalho propôs um estudo de caso de dimensionamento de sistema fotovoltaico para suprir a demanda de energia elétrica das áreas comum de um condomínio residencial na cidade de Araraquara-SP.

De acordo com a lei 14.300 as contas de energia elétrica não serão zeradas apesar da compensação. O sistema fotovoltaico está interligado ao SIN por 2 UC Trifásica, por isso deverá pagar taxa referente a 100kWh por UC por uso dos sistemas de distribuição por parte do micro gerador

O capital investido na implantação do projeto foi de R\$203.031,82, pela conversão oficial do dia 15/05/2023 (1 dólar = 5,07 reais) o custo foi de US \$40.045,72.

Sendo o preço médio do kWh pago pelo condomínio para a CPFL é de R\$0,92, correspondendo a US \$ 0,18 centavos de dólar o quilowatt /hora.

O valor do kWh produzido está previsto em US \$ 0,02 para os próximos 25 anos, portanto uma previsão de economia imediata logo no primeiro mês de 89%.

Com a entrada em operação do sistema fotovoltaico poderá ser comparado os valores reais gerados com os dados de cálculos para a implantação do projeto.

Para se ter uma real análise dos dados, é necessário acompanhar a produção do sistema por um ano realizando a comparação mês a mês para compatibilizar os dados do sistema calculado com o sistema implantado.

Melhorias poderão ser realizadas a partir deste estudo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Rio de Janeiro, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 482: Condições Gerais Para o Acesso de Micro e Minigeração Distribuída. Rio de Janeiro, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 687: Altera a Resolução Normativa n° 482. Rio de Janeiro, 2015.

ANEEL. - Atlas Energia Solar. Disponível em: <https://cenariosolar.editorabrasilenergia.com.br/wp-content/uploads/sites/8/2020/11/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_compressed.pdf>

CEPEL. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

GOV.BR - Brasil é referência no campo da energia limpa e renovável. Disponível em:< <https://>

www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/10/brasil-e-referencia-no-campo-da-energia-limpa-e-renovavel> Acesso em: 01 jun. 2023.

LONGI – Disponível em:< https://static.longi.com/L_Gi_LE_PM_T_PMD_059_F120_LR_5_72_HBD_535_555_M_35_30_15_G2_V16_PT_dea0b85a51.pdf>. Acesso em 01 junho 2023.

LABREN – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia. Disponível em:< https://labren.ccst.inpe.br/atlas2/SP_inc.html>. Acesso em: 02 mai. 2023.

PORTAL SOLAR – Passo a Passo da Fabricação de Pannel Solar. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-pannel-solar.html>>. Acesso em: 1 junho 2023.

SEBRAE - Por que investir em energia solar no seu negócio em 2022 Disponível em: < <https://www.sebrae-sc.com.br/blog/por-que-investir-em-energia-solar-no-seu-negocio-em-2022>>. Acesso em: 10 mai. 2023.

WEG - SIW Solar Inverter WEG. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h09/h17/WEG-SIW-inversores-string-50105878-pt.pdf>>. Acesso em 17 maio 2023.

Análise de viabilidade econômica para um sistema de energia fotovoltaica instalado em uma residência unifamiliar na cidade de Guaíra - PR

Economic feasibility analysis for a photovoltaic energy system installed in a single-family residence in Guaíra, Paraná

Jabez de Freitas da Silva

Engenheiro Civil, Universidade Paranaense - UNIPAR

Emanuel Vedovetto Santos

Engenheiro Eletricista, Universidade Estadual de Maringá - UEM

Eduardo Vedovetto Santos

Engenheiro Civil, Universidade Estadual de Maringá - UEM

RESUMO

Considerando que o Brasil apresenta uma boa incidência solar ao longo do ano, o país possui grande potencial no uso da energia solar fotovoltaica. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade econômica do sistema *On-Grid*, já instalado em uma residência unifamiliar através do comparativo de custo de energia antes e após a instalação. Foi realizado o levantamento de consumo de energia antes e após a instalação do sistema, considerando-se a utilização de compensação de crédito de energia e o investimento realizado. Através do estudo de *Payback* verifica-se que o sistema se paga em 5,56 anos, caracterizando-se como um investimento de médio prazo.

Palavras-chave: energia solar. microgeração. sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

Considering its solar incidence throughout the year, Brazil has great potential to use photovoltaic solar energy. The aim of this study is to propose an analysis of the *On-Grid* system's economic viability already installed in dwellings. A case study that proves that implementing these systems in single-family homes is feasible. Using the *Payback* analysis, the system pays itself in 5.56 years, resulting in good profitability after this period.

Energia e Sustentabilidade: desafios e soluções

DOI: 10.47573/aya.5379.2.212.3



Keywords: solar energy. microgeneration. photovoltaic system.

INTRODUÇÃO

O constante crescimento da população mundial vem gerando impactos negativos, tais como a escassez dos recursos naturais (NAZARENO, 2018). É por isso que devemos pensar em algumas formas sustentáveis para não prejudicar o planeta, uma delas é a geração de energia elétrica através da irradiação solar (ALVES, 2019).

A energia elétrica tem um papel de extrema importância para a sustentabilidade, pois, é através dessa geração de energia limpa e sustentável que teremos um futuro que não seja energeticamente afetado. A geração da energia solar não leva apenas a economia no imóvel instalado, mas, também, aborda questões ambientais (PINHEIRO, 2009).

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica ABSOLAR (2019) a Matriz Elétrica Brasileira soma 60,9% da energia gerada pelo país através da Geração Hídrica e, apenas 1,3% através da geração de Energia Fotovoltaica. Estudos preveem que até 2050 se terá um cenário totalmente diferente do presente, estima-se que, a Matriz Elétrica Brasileira em 2050 seja de 38% resultante da geração de Energia Fotovoltaica e de 33% de geração Hídrica.

Apesar da baixa porcentagem de geração, o Brasil possui um alto índice diário de radiação solar, podendo chegar a mais de 5kWh/m² por dia em algumas regiões (ANEEL, 2005).

Portanto, o presente trabalho visa verificar a viabilidade econômica de um sistema de energia fotovoltaica instalado em uma residência unifamiliar. Será analisado o consumo atual (pós instalação) e anterior ao sistema, bem como, o investimento e a compensação de crédito.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistema fotovoltaico

O sistema teve origem no ano de 1839, quando o Físico Francês Alexandre Edmond Becquerel fez a descoberta do efeito fotovoltaico, porém, foi somente no ano de 1883 que Charles Fritts criou a primeira célula fotovoltaica. Em 1954 o Engenheiro Russell Shoemaker Ohl anuncia a primeira célula fotovoltaica em uma reunião da Academia Nacional de Ciências nos Estados Unidos e, desde essa época, vem se tornando um sistema de energia renovável cada vez mais utilizado no mundo (SANTIAGO, 2019).

Esse sistema de geração de energia elétrica tem como vantagens, a rápida instalação, a baixa manutenção, a característica modular e o elevado grau de confiabilidade (RÜTHER, 2004).

Nesse sistema, o módulo fotovoltaico utiliza a captação da luz solar, onde o mesmo produz energia passando por um inversor solar que irá converter a energia gerada em energia elétrica (ALVES, 2019).

A carga de energia solar no Brasil alcança os 4.932 megawatts de potência instaladas em 2020, tal potência tem capacidade para atender até 6,1 milhões de brasileiros (ANEEL, 2020).

A determinação de consumo antes da instalação do sistema fotovoltaico é realizada através do consumo de energia da residência antes da instalação do sistema, que será baseado na média de consumo dos doze meses anteriores ao funcionamento do sistema.

O resultado do cálculo da média mensal de consumo, em kWh, é a somatória do consumo de cada mês em estudo, dividido pela quantidade de meses. No entanto, desconta-se o custo de disponibilidade da concessionária. Existem três tipos de taxas do custo da disponibilidade do sistema elétrico, como sendo: o padrão monofásico, o padrão bifásico e o padrão trifásico. Portanto, o padrão monofásico é aquele em que o consumidor paga uma taxa mínima equivalente a 30 kWh. O bifásico, com custo de disponibilidade pago corresponde a 50 kWh e, o padrão trifásico, possui uma taxa mínima, igual a 100 kWh (ANEEL, 2018). Neste caso, o estudo é realizado no sistema bifásico.

Após a instalação do sistema fotovoltaico, a determinação de consumo de energia da residência após a instalação do sistema, será baseada nas faturas de energia e será calculado uma média entre os meses de consumo e a geração de energia do sistema instalado.

Componentes do sistema

Inversor

Conforme referenciado abaixo na Figura 1, o inversor é um equipamento eletrônico que recebe a energia dos painéis solares em corrente contínua (CC) e converte para corrente alternada (CA) para o uso da residência. Esse equipamento tem um sistema de segurança, monitorando todo o circuito. Também, é o responsável pela otimização da energia (ROVERSI, 2019).

Figura 1 - Inversores.



Fonte: Boreal Solar. (2019)

Módulo fotovoltaico

Esse dispositivo tem a essencial função de converter energia luminosa (fótons) em energia elétrica utilizando o sistema fotovoltaico. A composição dessa placa se dá, através de materiais semicondutores que absorvem a luz do sol gerando energia elétrica

pelo sistema fotovoltaico (REBELO, 2019).

A sua montagem é feita em camadas, desde a caixa de junção, fundo protetor, película encapsulante, células fotovoltaicas, outra camada de película encapsulante, vidro especial e, por fim, uma moldura que normalmente é de alumínio ao redor da placa (ENERSOLAR,2019). Portanto, os módulos podem ser observados na Figura 2.

Figura 2 - Módulo fotovoltaico.



Fonte ArchDaily Brasil. (2019)

Medidor bidirecional

Consiste no medidor eletrônico de energia elétrica capaz de medir energia em ambos os sentidos de fluxo e dotado de registradores independentes para cada sentido de fluxo. Esse equipamento também realiza a compensação com a concessionária. O medidor ilustrado na Figura 5, é fornecido e instalado pela concessionária local (COPEL, 2021).

Figura 5 - Medidor bidirecional.



Fonte: Elysia. (2020)

String box ou caixa de conexão

Equipamento que tem como função proteger o sistema na parte de corrente contínua (CC). O sistema deve possuir dispositivo de manobra e, seccionamento e proteção contra sobrecorrente, bem como, protetor contra surtos de corrente (DPS) (SCHUEDA, 2018),

conforme demonstra a Figura 6.

Figura 6 - String box.



Fonte: Intelbras. (2018)

Sistemas

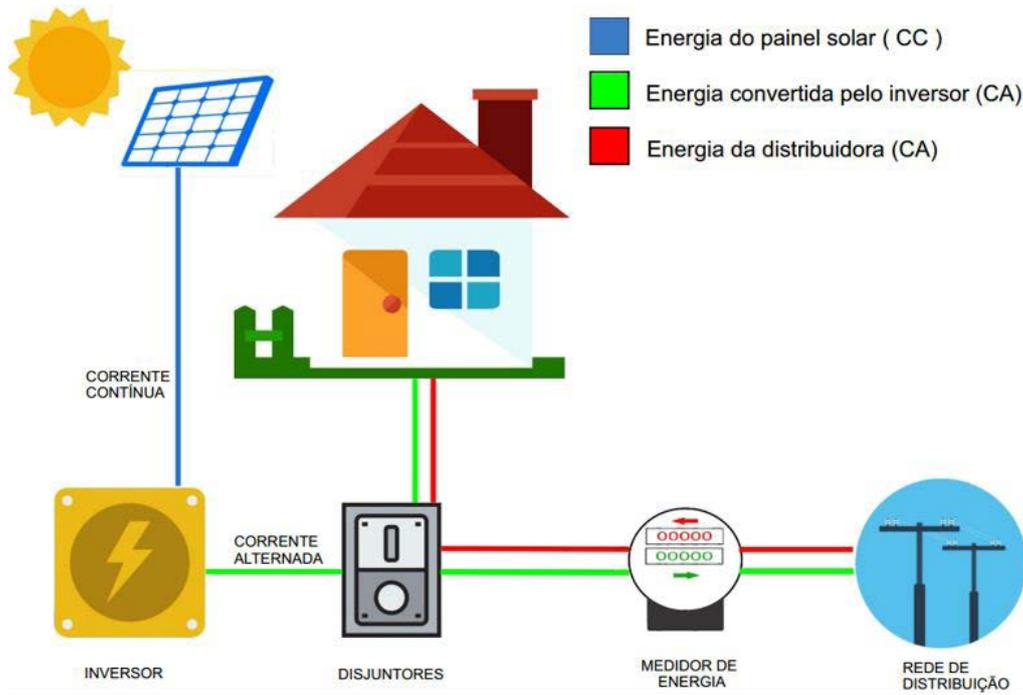
O método tradicional de produção de eletricidade é centralizado, longe dos pontos de consumos, ocasionando perdas ao longo do sistema de distribuição, acarretando em um aumento dos custos de distribuição. Quando falamos em energia fotovoltaica, pensamos na energia que está sendo produzida perto do ponto de consumo, tornando a tecnologia mais diversificada usada para produzir eletricidade (RODRIGUES, 2002).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em: sistemas isolados (*OFFGRID*) e sistemas conectados à rede (*ON GRID*). É importante considerar que os sistemas que não estão integrados à rede, possuem baterias que armazenam a energia produzida. Não é necessário em sistemas integrados, pois, o excesso de energia gerada nessas situações pode ser transmitido para a rede da concessionária ou enviado para outro local que está registrado no mesmo nome (CHUCO, 2007).

On-Grid

O referido sistema também pode ser chamado de *grid-tie*. Esse sistema está sincronizado com a rede de distribuição de energia elétrica, ou seja, na falta de energia da rede de distribuição, o sistema automaticamente se desliga por questão de segurança (SANTOS, 2019).

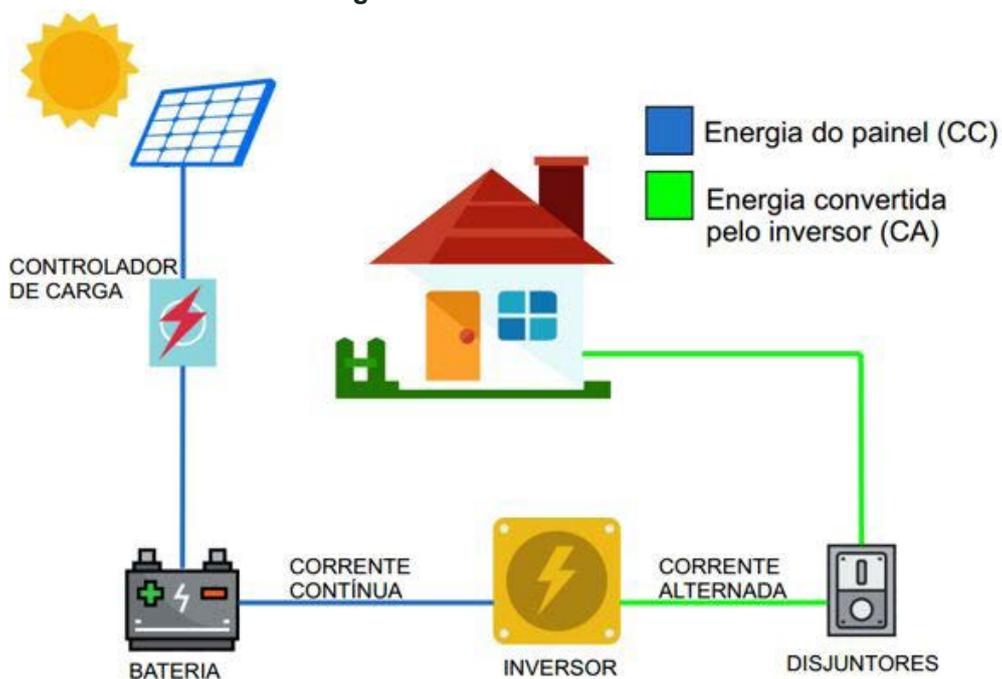
Conforme ANEEL (2018) a produção de energia gerada em excesso pelo sistema da residência é enviada para a rede pública, gerando crédito com a concessionária, possibilitando com que o cliente possa obter descontos em faturas futuras. Portanto, a Figura 7 representa o sistema *on-grid*.

Figura 7 - Sistema *On-Grid*.

Fonte: EnergyTec. (2021)

Off-Grid

Nesse sistema a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é armazenada em um banco de baterias para uso posterior. O sistema *off-grid* não possui conexão com a rede pública e, a energia produzida, é enviada para o banco de baterias onde fica armazenada para o uso da residência. Muito utilizado em lugares remotos e onde não se tem uma dependência da rede da concessionária, por exemplo: em ilhas, torres e áreas rurais (OLIVEIRA, 2019). Sendo assim, a Figura 8 representa o sistema *off-grid*.

Figura 8 - Sistema *Off-Grid*.

Fonte: EnergyTec. (S/D)

Normas

A NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão, estabelece parâmetros adequados para que haja um funcionamento seguro das instalações elétricas de baixa tensão. É a principal norma utilizada para instalações públicas, prediais e comerciais, pois, a mesma visa garantir o funcionamento correto e a conservação dos bens.

A NBR 16690:2019 – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto, estabelece os requisitos para o projeto de instalações fotovoltaicas, incluindo os condutores, dispositivos de proteção, de manobra e de aterramento.

A NBR 16274:2014 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — dispõe os requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho, na qual descreve as informações e documentações mínimas exigidas para um sistema fotovoltaico conectado à rede. A mesma também contém critérios de inspeção, que tendem a avaliar a segurança do sistema instalado e o correto uso do mesmo.

A NBR 5419-1:2015 – prevê a proteção contra descargas atmosféricas, na qual visa manter protegida a estrutura contra descargas atmosféricas, porém, é necessário que essa estrutura esteja envolvida por uma blindagem de ótima condução elétrica e aterrada de acordo com o especificado em norma.

A NR 10 – dispõe acerca da segurança em instalações e serviços em eletricidade, possui como objetivo a proteção do trabalhador que lida com energia elétrica. A mesma estabelece condições mínimas de segurança em todas as atividades executadas pelo trabalhador.

A NR-35, refere-se ao trabalho em altura, estabelecendo os requisitos mínimos para proteção do trabalhador na obra, considerando trabalho de altura em até 2 metros acima do piso.

O sistema de compensação de energia tem seu modo de faturamento estabelecido no art. 7º da Resolução Normativa nº 482/2012, os procedimentos adotados quando a geração está instalada no mesmo local de consumo são:

- A energia injetada em determinado posto tarifário (ponta, fora de ponta ou intermediário), se houver, deve ser utilizada para compensar a energia consumida nesse mesmo posto;
- Se houver excedente, os créditos de energia ativa devem ser utilizados para compensar o consumo em outro posto horário, se houver, na mesma unidade consumidora e no mesmo ciclo de faturamento;
- O valor a ser faturado é a diferença positiva entre a energia consumida e a injetada, considerando-se também eventuais créditos de meses anteriores, sendo que, caso esse valor seja inferior ao custo de disponibilidade, para o caso de consumidores do Grupo B (baixa tensão), será cobrado o custo de disponibilidade;
- Utiliza-se a tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição

– TUSD referentes à Copel Distribuição S.A na compensação do sistema.

Trabalhos realizados

Segundo Vieira (2019) que fez um estudo referente ao Custo e viabilidade da implantação de sistema fotovoltaico “*on-grid*” em uma escola municipal no oeste do Paraná, com o objetivo de demonstrar a viabilidade da instalação de um sistema fotovoltaico *on-grid* em uma escola com gasto médio mensal de R\$ 2.971,86 de energia, e um gasto anual de R\$ 35.622,29 com energia. O sistema implantado na escola teve um custo de R\$ 130.000,00, com uma variação de 3 a 4 anos para o retorno do investimento. Após 10 anos da implantação do sistema a escola terá uma economia de R\$ 389.805,40, valor já descontando o custo investido no início da instalação.

Segundo Ferreira (2020) que fez um estudo sobre Viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico *on-grid* em uma residência unifamiliar na cidade de Guaíra – PR com consumo médio mensal de até 400 kWh. Esse estudo foi realizado de acordo com o consumo de energia elétrica de residência unifamiliar. O Sistema *on-grid* teve um custo de R\$ 15.500,00. Obteve-se um prazo médio de 5 a 6 anos para retorno do investimento inicial. Tendo por fim o estudo que é realmente viável a instalação de sistema fotovoltaico na residência.

METODOLOGIA

Local da residência

O estudo será realizado em uma residência localizada na cidade de Guaíra, situada no Estado do Paraná. A Figura 9 apresenta o local da residência.

Figura 9 - Imagem de satélite da residência.



Fonte: Google Earth. (2019)

Características da residência

A residência é de característica unifamiliar, com acomodações no padrão médio atendendo uma família de quatro pessoas, sendo duas crianças e dois adultos. A residência

contém uma cozinha, uma sala de estar, três quartos, dois banheiros, uma lavanderia e uma garagem.

Características do sistema instalado

Na residência estudada foi instalado os seguintes equipamentos no sistema *On-Grid* conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Componentes instalados na residência em estudo.

Quantidade	Item	Modelo
1	Inversor	BEDINSOLAR BSKW 220V 2MPPT
10	Módulo	BEDINSOLAR 390W
1	Proteção	STRINGBOX 2E/25 500V
1	Estrutura	Perfil 3,2m, terminal final, terminal intermediário, emenda / junção, suportes, cabo preto 6mm 1,8kw, cabo vermelho 600 1,8kv e conectores MC4 1000v

Fonte: Autor. (2021)

A Figura 10 mostra a instalação dos equipamentos, no estudo em questão, a string box, o inversor e o quadro de proteções, respectivamente.

Figura 10 - Sistema instalado na residência em estudo.



Fonte: Autor. (2021)

Na Figura 11 observa-se parte da instalação dos módulos fotovoltaicos sobre a telha de concreto.

Figura 11 - Módulos BEDINSOLAR 390W instalados na residência.



Fonte: Autor. (2021)

Na Figura 12 observa-se, o quadro medidor instalado para geração distribuída *on-grid*.

Figura 12 - Medidor bidirecional, instalado no padrão de energia da residência.



Fonte: Autor. (2021)

Procedimento de calculo

Utilizando a Equação 1 podemos calcular o Custo mensal de energia com sistema e sem sistema:

$$CM = CONM \times \text{Valor do kWh} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

CM = Custo Mensal

CONM = Consumo Mensal

O Valor do kWh encontra-se na fatura de energia da residência, podendo haver variações mensais.

Pela Equação 2 obteremos o resultado do Gasto anual que a residência terá, com o sistema e sem o sistema através da média de custo mensal dos meses a serem analisados.

$$GA = MC \times 12 \text{ meses} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

MC = Média de custo mensal

GA = Gasto Anual

Com a Equação 3 podemos calcular o Custo mensal de energia com sistema:

$$CMS = DISP \times \text{Valor do kWh} + CRM \times (TUSD+TE) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

CMS = Custo Mensal com o sistema

DISP = Consumo mínimo a ser pago, 50 KWh

CRM = crédito utilizado no mês

TUSD = Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição

TE = tarifas de Energia

Pela Equação 4 obteremos o resultado do Gasto anual que a residência terá, com o sistema e sem o sistema através da média de custo mensal dos meses a serem analisados.

$$\text{GAS} = \text{CMS} \times 12 \text{ meses} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

CMS = Custo Mensal com o sistema

GAS = Gasto Anual com sistema

Para o sistema de crédito, o custo mensal com o sistema - CMS é chamado de custo mensal - próprio. Isso se dá para que se possa diferenciar o custo do local de instalação e o de local de transferência de crédito. A economia transferida é calculada na Equação 5.

$$\text{ET} = \text{saldo} \times [\text{Valor do kWh} - (\text{TUSD} + \text{TE})] \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

ET = Economia transferida

TUSD = Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição

TE = tarifas de Energia

O gasto anual com sistema - GAS para o sistema de crédito é dado pela diferença do custo mensal - próprio e da economia transferida.

Pela Equação 6 obteremos o resultado da economia anual creditada, que é aquela resultante da energia transferida a concessionária.

$$\text{EAC} = \text{GA} - \text{GAS} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

EAC = Economia anual creditada

GA = Gasto Anual

GAS = Gasto Anual com sistema

Pela Equação 7 teremos a Economia anual Direta, que é aquela resultante do consumo direto do sistema fotovoltaico.

$$\text{EAD} = (\text{MCONM} - \text{MCONMS}) \times 12 \times \text{Valor do kWh} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

EAD = Economia anual Direta

MCONM = média de consumo mensal, sem sistema

MCONMS = média de consumo mensal, com sistema

GAS = Gasto Anual com sistema

A economia anual total - EAT é a soma entre a economia anual creditada e a economia anual direta.

Da Equação 8 obtemos o resultado do *payback* simples, ou seja, o tempo de retorno que a residência terá de economia.

$$P = VI / EAT \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

P = Payback simples,

VI = Valor Inicial do investimento

EAT = Economia anual total

Tem-se tempo de retorno de curto prazo para até 2 anos, médio prazo de 3 a 10 anos e longo prazo para mais de 10 anos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram construídos através do demonstrativo de consumo e geração da unidade consumidora em estudo. O Quadro 2 apresenta os dados extraídos da residência, onde observa-se que o levantamento dos dados se referem do mês de agosto de 2020 até o mês de agosto de 2021. As colunas mostram o saldo anterior, a energia injetada, que é a soma do crédito utilizado na energia ativa, acrescido da energia produzida de saldo (saldo mês). A Energia ativa, refere-se a energia consumida da concessionária, acrescida da disponibilidade da mesma. O Crédito utilizado no mês, equivale ao valor da geração mensal, subtraído o valor da energia disponibilizada pela concessionária. O Saldo do mês, equivale a energia gerada, porém não utilizada.

Quadro 2 - Dados gerais da residência.

Referência	Saldo Anterior	Energia Injetada	Energia Ativa	Credito Utilizado no Mês	Saldo Mês	Saldo Final
	TP	TP	TP	TP	TP	TP
08/2021	358	328	259	209	119	477
07/2021	302	225	219	169	56	358
06/2021	194	270	212	162	108	302
05/2021	0	328	184	134	194	194
04/2021	0	0	386	0	0	0
03/2021	0	0	324	0	0	0
02/2021	0	0	293	0	0	0
01/2021	0	0	396	0	0	0
12/2020	0	0	324	0	0	0
11/2020	0	0	379	0	0	0
10/2020	0	0	317	0	0	0
09/2020	0	0	311	0	0	0
08/2020	0	0	282	0	0	0

Fonte: Autor. (2021)

O Quadro 3 demonstra o cálculo referente ao consumo da residência antes da instalação do sistema. O cálculo se deu através da somatória de 9 meses anteriores a instalação do sistema.

Ao final da tabela, observa-se a tarifa, que consiste no valor cobrado pela concessionária para a disponibilização da energia, esse valor é multiplicado pelo consumo mensal, do qual resulta na fatura do mês.

Tem-se uma média de consumo mensal de 335 kWh. É possível determinar uma média de custo mensal, que, na residência em questão era de R\$ 281,12, sendo assim, é possível determinar um gasto anual de R\$ 3.373,44.

Quadro 3 - Dados extraídos anteriormente a instalação do sistema.

Referência	Energia Ativa	Custo mensal
04/2021	386 kWh	R\$ 324,24
03/2021	324 kWh	R\$ 272,16
02/2021	293 kWh	R\$ 246,12
01/2021	396 kWh	R\$ 332,64
12/2020	324 kWh	R\$ 272,16
11/2020	379 kWh	R\$ 318,36
10/2020	317 kWh	R\$ 266,28
09/2020	311 kWh	R\$ 261,24
08/2020	282 kWh	R\$ 236,88
Tarifa		R\$ 0,84
Média de custo Mensal		R\$ 281,12
Gasto anual		R\$ 3.373,44
Média de consumo mensal		335 kWh

Fonte: Autor. (2021)

O Quadro 4 mostra o cálculo após a instalação do sistema na residência sem a utilização do saldo do mês em forma de crédito. A mesma fornece dados como a tarifa, que é o valor cobrado pela concessionária, O Custo TUSD, que é a tarifa de uso do sistema de distribuição e o custo TE, ou seja, a tarifa de energia consumida na residência.

Quadro 4 - Dados após a instalação do sistema, sem utilizar o saldo.

Referência	Energia Ativa	Credito Utilizado no Mês	Energia a pagar	Custo mensal
08/2021	259 kWh	209 kWh	50 kWh	R\$ 171,38
07/2021	219 kWh	169 kWh	50 kWh	R\$ 146,58
06/2021	212 kWh	162 kWh	50 kWh	R\$ 142,24
05/2021	184 kWh	134 kWh	50 kWh	R\$ 124,88
TARIFA	R\$ 0,84	Média custo com sistema		R\$ 146,27
Custo TUSD	R\$ 0,36			
Custo TE	R\$ 0,26	Gasto anual com sistema		R\$ 1.165,38
TUSD + TE	R\$ 0,62	Economia anual creditada		R\$ 1.618,20
Média de consumo com sistema	219 kWh	Economia anual direta		R\$ 1.165,38
Diferença entre consumo	116,17 kWh	Economia anual total		R\$ 2.783,58
diferença de consumo - mensal	R\$ 97,12	Investimento		R\$ 17.200,00
diferença de consumo - anual	R\$ 1.165,38	Tempo de retorno		6,18 anos

Fonte: Autor. (2021)

O Quadro 5 apresenta, em resumo, os principais dados determinados sem a utilização do saldo. Pode-se observar como existem mudanças no custo mensal sem o sistema e com o sistema. O gasto anual com o sistema é 52% do valor dos gastos sem o sistema. Com base nesses dados, o cliente terá uma economia anual de R\$ 2.783,58. Com as economias calculadas e o investimento do sistema, o cliente terá um tempo de retorno em média de 6,18 anos, desde que seu consumo e geração se mantenham nas mesmas condições.

Quadro 5 - Tabela resumo sem credito.

Dados	Sem o sistema	Com o sistema
Custo médio mensal	R\$ 281,12	R\$ 146,27
Gasto anual	R\$ 3.373,44	R\$ 1.755,24
Economia anual total		R\$ 2.783,58
Investimento		R\$ 17.200,00
Tempo de retorno		6,18 anos

Fonte: Autor. (2021)

No Quadro 6 é possível observar o cálculo após a instalação do sistema na residência com a utilização do saldo do mês em forma de crédito, resultando em uma economia transferida.

Quadro 6 - Dados após a instalação do sistema, utilizando o saldo.

Referência	Energia Ativa	Credito Utilizado no Mês	Saldo Mês	Energia a pagar	Custo mensal - próprio	Economia transferida	Custo total mensal
08/2021	259 kWh	209 kWh	119 kWh	50 kWh	R\$ 171,38	R\$ 25,704	R\$ 145,68
07/2021	219 kWh	169 kWh	56 kWh	50 kWh	R\$ 146,58	R\$ 12,096	R\$ 134,48
06/2021	212 kWh	162 kWh	108 kWh	50 kWh	R\$ 142,24	R\$ 23,328	R\$ 118,91
05/2021	184 kWh	134 kWh	194 kWh	50 kWh	R\$ 124,88	R\$ 41,904	R\$ 82,98
Tarifa				R\$ 0,84	Média custo		R\$ 120,51
Custo TUSD				R\$ 0,36	Gasto anual		R\$1446,10
Custo TE				R\$ 0,26	Economia anual creditada		R\$1927,30
TUSD + TE				R\$ 0,62	Economia anual direta		R\$1165,40
Média de consumo				219 kWh	Economia anual total		R\$ 3092,70
Diferença entre consumo				116,17 kWh	Investimento		R\$17.200,00
diferença de consumo - mensal				R\$ 97,12	Tempo de retorno		5,56 anos
diferença de consumo - anual				R\$ 1165,40			

Fonte: Autor. (2021)

O Quadro 7 apresenta, em resumo, os principais dados determinados com a utilização do saldo. O gasto anual com o sistema e utilização do crédito é aproximadamente 42% do valor dos gastos sem o sistema. Com base nesses dados, o cliente terá uma economia anual de R\$ 3.092,68. Com as economias calculadas e o investimento do sistema, o cliente terá um tempo de retorno em média de 5,56 anos, desde que seu consumo e geração se mantenham nas mesmas condições.

Quadro 7 - Tabela resumo com credito.

Dados	Sem o sistema	Com o sistema
Custo médio mensal	R\$ 281,12	R\$ 120,51
Gasto anual	R\$ 3.373,44	R\$ 1.446,14
Economia anual total	R\$ 3.092,68	
Investimento	R\$ 17.200,00	
Tempo de retorno	5,56 anos	

Fonte: Autor. (2021)

No Quadro 8 compara-se o sistema sem e com a utilização do saldo de energia. Percebe-se que a economia anual com a utilização do saldo é maior, sendo aproximadamente 11,1% superior a economia sem o saldo. A diferença no tempo de retorno chega a ultrapassar meio ano com a sua utilização.

Quadro 8 - Tabela resumo.

Dados	Sem o saldo	Com o saldo
Custo médio mensal	R\$ 146,27	R\$ 120,51
Gasto anual	R\$ 1.755,24	R\$ 1.446,14
Economia anual total	R\$ 2.783,58	R\$ 3.092,68
Investimento	R\$ 17.200,00	R\$ 17.200,00
Tempo de retorno	6,18 anos	5,56 anos

Fonte: Autor. (2021)

Independente da utilização ou não do saldo, o investimento se caracteriza como de médio prazo, tendo tempo de retorno entre 3 e 10 anos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi elaborado um estudo do desenvolvimento de um sistema de microgeração distribuída, do qual foi instalado em uma residência localizada no município de Guaíra, no Estado do Paraná.

O investimento realizado para implantação do sistema, foi de aproximadamente R\$ 17.200,00 (dezessete mil e duzentos reais) e, o tempo de retorno, é de aproximadamente 5 anos e 5 meses, portanto, se dá por investimento de médio prazo, apresentando-se de forma viável. Observa-se que os fatores que podem melhorar o tempo de retorno sobre o capital de investimento, incluem o aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos e inversores, mas é natural que após a instalação do sistema o proprietário tenda a elevar o consumo inconscientemente mesmo sem adquirir nenhum equipamento novo.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Avaliação do Impacto do Acesso aos Dados Solarimétricos Provenientes de Empreendimentos em Operação. Brasília, Distrito Federal, 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/19438144/8_Eduardo_Miklos_ABSOLAR.pdf/7c8d7123-3ebd-463a-d26a-f9e-f9034921f> Acesso em 03 abril 2021.

Agência Nacional De Energia Elétrica - ANEEL. ANEEL ultrapassa em mais de 800 MW a meta de expansão da geração em 2020. Brasília, Distrito Federal, 2020. Disponível em: <<https://www.google.com/search?q=aneel&oq=aneel&aqs=chrome.69i57j0l3j69i60l3.1764j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>>. Acesso em 06 abril 2021.

Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil, 2ª Edição. Brasília, Distrito Federal, 2005. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/atlas2005.zip>>. Acesso em 22 junho 2021.

Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL. Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica - Resolução Normativa nº 414/2010. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/15201072/ren2010414+-+Texto+Atualizado+Compacto+%28rev+823+2018%29/b8ad993e-d34a-1b5d-20da-5a912c9ee89f>> Acesso em 22 abril 2021.

Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL. Geração Distribuída. Brasília, Distrito Federal, 2018. Disponível em https://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaV-JWF5E/content/geracao-distribuida-introduc-1/656827?inheritRedirect=false. Acesso em 28 abril 2021.

Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional – PRODIST - Resolução Normativa nº 482/2012. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_idDocumento=38561&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp> Acesso em 22 abril 2021.

ALVES, Marliana de Oliveira Lage. Energia Solar: Estudo Da Geração De Energia Elétrica Através Dos Sistemas Fotovoltaicos On-Grid E Off-Grid. João Monlevade, Minas Gerais, 2019.

BOREAL SOLAR. Como funcionam e quais os tipos de inversor solar. Maringá, Paraná, 2019. Disponível em <<http://borealsolar.com.br/blog/2019/05/02/como-funcionam-e-quais-os-tipos-de-inversor-solar/>>. Acesso em 07 abril 2021.

CHUCO, Braulio. Otimização de operação em sistema isolado fotovoltaico utilizando técnicas de inteligência artificial. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, 2007.

CANELA, André Luiz. Desenvolvimento E Execução De Um Controlador De Carga Para Um Sistema Fotovoltaico Autônomo. Florianópolis, Santa Catarina, 2019

Companhia Paranaense De Energia – NTC 905200. Acesso De Micro E Minigeração Distribuída Ao Sistema Da Copel (Com Compensação De Energia). 2014. Disponível em: < [https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/E00A539C1F08DF2003257F69004DF8BC/\\$FILE/NTC%20905200%20Acesso%20de%20Micro%20e%20Minigera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%A-Dda.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/E00A539C1F08DF2003257F69004DF8BC/$FILE/NTC%20905200%20Acesso%20de%20Micro%20e%20Minigera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%A-Dda.pdf)>. Acesso em 05 abril 2021.

EnergyTec Energia Solar. Sistema GRID-TIE Conectado à rede. Disponível em: <<http://www.energytecsolar.com.br/Sistema-GRID-TIE/>> Acesso em 10 abril 2021.

EnergyTec Energia Solar. Sistema OFF-GRID. Disponível em: <<http://www.energytecsolar.com.br/Sistema-OFF-GRID/>> Acesso em 10 abril 2021.

EnerSolar Usinas Fotovoltaicas. Como funciona a captação de energia solar. Disponível em: <<https://www.enersolar.eng.br/noticias/como-funciona-a-captacao-de-energia-solar/>> Acesso em 11 julho 2021.

FARIAS, Hérciles Eduardo Oliveira. Análise Técnica Do Impacto Do Uso De Baterias Em Sistemas Conectados À Rede Aplicado Em Diferentes Classes De Consumo. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2018.

FERREIRA, Messias Vinicius Borges. Viabilidade Econômica De Um Sistema Fotovoltaico On Grid Em Uma Residência Unifamiliar Na Cidade De Guaíra-Pr Com Consumo Médio Mensal De Até 400 Kw. Guaíra, Paraná, 2020.

GOOGLE EARTH. Mapas. 2019. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-24.10800625,-54.26212407,283.36765773a,300.16743397d,35y,0h,0t,0r>> Acesso em 19 abril 2021.

Intelbras. Quadro elétrico para proteção e manobra de gerador fotovoltaico. Disponível em: <<https://www.intelbras.com/pt-br/quadro-eletrico-para-protecao-e-manobra-de-gerador-fotovoltaico-string-box-esb-1106>> Acesso em 06 abril 2021.

NAZARENO, Maria Cristina de Meira. O impacto populacional sobre o crescimento econômico dos brios. Mariana, Minas Gerais, 2018.

OLIVIERA, Rafael Pedrosa. Bancada Didática Para Sistema Fotovoltaico Off-Grid. Ouro Preto, Minas Gerais, 2019.

PINHEIRO, Ana Paula Zanoli. Energia e Sustentabilidade. Uberaba, Minas Gerais, 2009.

REBELO, Diego Vecchio Couldrey. Análise De Viabilidade E Dimensionamento De Um Estacionamento Solar Fotovoltaico Para O Campus Da Ufsc Em Joinville. Joinville, Santa Catarina, 2019.

RODRIGUES, Carlos Roberto Cervantes. Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ROVERSI, Karoline. Análise Do Fator De Dimensionamento Do Inversor Em Um Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede De Uma Instituição De Ensino. Araranguá, Santa Catarina, 2019.

RÜTHER, Ricardo. Edifícios solares fotovoltaicos. Florianópolis, Santa Catarina, 2004.

SANTIAGO, João Vitor Assad. O mercado emergente de energia solar fotovoltaica no Brasil entre 2012 e 2018: avanços, desafios e perspectivas. Ribeirão Preto, São Paulo, 2019.

SANTOS, Rayon Alves. Estudos De Caso E Comparação Da Viabilidade Econômica Para A Implementação De Um Sistema Fotovoltaico On-Grid E Off-Grid. Lages, Santa Catarina, 2019.

SCHUEDA, Diogo Ehlke. Procedimentos Para A Instalação De Um Sistema Fotovoltaico De Microgeração Distribuída Em Uma Residência – Estudo De Caso. Curitiba, Paraná, 2018.

VIEIRA, Rafael Antonio. Custo e viabilidade da implantação de sistema fotovoltaico “on grid” em uma escola municipal no oeste do Paraná. Guaíra, Paraná, 2019.

WORUBY, Mauro Sérgio. Sistema de Energia Solar Residencial. Ponta Grossa, Paraná, 2018.

Cidades e a mudança climática: a importância do planejamento urbano no combate ao aquecimento global

Cities and climate change: the importance of urban planning in combating global warming

Yuri Vinicius Souza de Jesus

Universidade Federal Fluminense

RESUMO

A humanidade tem testemunhado mudanças causadas pela intervenção humana, destacando-se a mudança climática e a urbanização global. O papel do planejamento urbano no enfrentamento das mudanças climáticas nas cidades. Portanto, a pergunta tema que rege este estudo é: De que forma o planejamento urbano pode contribuir para combater o aquecimento global e mitigar os efeitos das mudanças climáticas nas cidades? O objetivo é investigar o papel do planejamento urbano no enfrentamento das questões climáticas, buscando entender como as estratégias e políticas urbanas podem ser efetivamente implementadas para promover a sustentabilidade e a resiliência das cidades. Será realizada uma revisão bibliográfica abrangente, baseada em artigos científicos, livros, relatórios de organizações internacionais e documentos administrativos. Conclui-se que o planejamento urbano sustentável desempenha um papel fundamental no combate às mudanças climáticas. A adoção de diretrizes que promovem um desenvolvimento urbano mais compacto e uma mobilidade urbana focada em transporte coletivo e ativo pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A implementação de políticas que priorizam a reciclagem e a redução do desperdício também contribuem para a diminuição da quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários. O planejamento urbano sustentável é essencial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e construir cidades resilientes e preparadas para o futuro.

Palavras-chave: mudança climática. sustentabilidade. planejamento urbano.



ABSTRACT

Humanity has witnessed significant changes caused by human intervention, with climate change and global urbanization standing out. The role of urban planning in addressing climate change in cities is of paramount importance. Hence, the guiding question of this study is: In what ways can urban planning contribute to combating global warming and mitigating the effects of climate change in cities? The objective is to investigate the role of urban planning in addressing climate-related issues, seeking to understand how urban strategies and policies can be effectively implemented to promote the sustainability and resilience of cities. A comprehensive literature review will be conducted, drawing from scientific articles, books, reports from international organizations, and administrative documents. It is concluded that sustainable urban planning plays a crucial role in combating climate change. The adoption of guidelines promoting more compact urban development and urban mobility focused on collective and active transportation can reduce greenhouse gas emissions. The implementation of policies prioritizing recycling and waste reduction also contributes to reducing the amount of waste sent to landfills. Sustainable urban planning is essential to address the challenges of climate change and to build resilient cities prepared for the future.

Keywords: climate change, sustainability, urban planning.

INTRODUÇÃO

Ao longo do último século, a humanidade testemunhou transformações radicais causadas, direta ou indiretamente, pela intervenção humana. Entre essas mudanças, destacam-se duas de grande relevância: a mudança climática e a urbanização global. Ambos os fenômenos estão intrinsecamente interligados.

No início do século XX, somente cerca de 10% da população mundial vivia em áreas urbanas. Hoje, essa proporção ultrapassa 50%. Simultaneamente, durante o século passado, a concentração de dióxido de carbono (CO₂), o principal gás de efeito estufa, aumentou em cerca de 1/3 em comparação com o século anterior. Estima-se que a temperatura média global tenha aumentado cerca de 0,7° C, e projeções indicam que poderá subir até 5° C ao longo do atual século, de acordo com relatórios do IPCC.

Essas mudanças climáticas têm resultado em uma série de impactos significativos, como o aumento da frequência de eventos climáticos extremos, tais como inundações, secas, surtos de epidemias, elevação do nível do mar e crises na produção de alimentos. Infelizmente, esses efeitos prejudicam desproporcionalmente as regiões mais pobres do mundo.

A literatura especializada consensualmente reconhece que a principal causa das alterações climáticas em curso é o aumento das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). A nível global, aproximadamente 14% dessas emissões são provenientes da agricultura e 17% das mudanças no uso do solo e silvicultura. No entanto, a esmagadora maioria, cerca de 70%, é gerada por atividades predominantemente urbanas, como energia (26%), indústria (19%), transportes (13%) e construção (8%). Isso coloca as cidades no centro do processo de mudança climática, sob duas perspectivas principais: o impacto das cidades nas mudanças climáticas e o impacto das mudanças climáticas nas cidades.

Diante desses problemas, surge uma pergunta de pesquisa: De que forma o planejamento urbano pode contribuir para combater o aquecimento global e mitigar os efeitos das mudanças climáticas nas cidades? Com o intuito de responder a essa pergunta, esta pesquisa tem como objetivo investigar o papel do planejamento urbano no enfrentamento dessas questões, buscando compreender como estratégias e políticas urbanas podem ser efetivamente implementadas para promover a sustentabilidade e a resiliência das cidades.

Para alcançar o objetivo proposto, a metodologia adotada nesta pesquisa será realizada uma revisão bibliográfica abrangente, baseada em artigos científicos, livros, relatório de organizações internacionais e documentos administrativos. Através dessa revisão bibliográfica, será possível obter uma visão ampla das diferentes abordagens e experiências no planejamento urbano em relação às questões climáticas.

AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A mudança climática é a dimensão mais urgente, grave e profunda da crise ambiental enfrentada no século XXI. Sua urgência reside no pouco tempo que resta para estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em níveis aceitáveis. A gravidade da mudança climática se manifesta através do aumento significativo da desertificação, da crise de recursos hídricos e da perda da biodiversidade. Além disso, causa danos severos à infraestrutura existente, resultando em grandes prejuízos para as atividades econômicas e impactando de forma mais severa as populações mais vulneráveis do planeta. Essa crise é profunda, pois não pode ser resolvida somente por soluções tecnológicas. É necessário buscar fontes de energia renováveis, mas isso implica no fim de uma civilização baseada em combustíveis fósseis e no desafio de lidar com grandes volumes de capital imobilizado nessas fontes (GIDDENS; VIANNA, 2010).

Segundo Moura (2005), a Terra sempre passou por alterações climáticas constantes, com ciclos milenares de aquecimento e glaciação causados por fenômenos naturais. No entanto, desde a Revolução Industrial, o planeta enfrenta uma nova realidade: a mudança de temperatura provocada pela poluição humana. Esse problema começou a ser percebido nos microclimas, com o aumento da temperatura nos grandes centros urbanos, e posteriormente afetou o macroclima, com as mudanças climáticas globais, o efeito estufa potencializado e seus desdobramentos mais relevantes, como o degelo, a expansão térmica das águas dos mares e oceanos e o aumento do nível do mar e da transgressão marinha nas zonas costeiras.

Siebert (2013) destaca que uma parcela significativa das causas antropogênicas das mudanças climáticas globais é atribuída às emissões de gases de efeito estufa, sendo que cerca de 80% dessas emissões são provenientes das áreas urbanas. O aquecimento global é resultado do acúmulo excessivo desses gases, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), entre outros com menor incidência. Esses gases absorvem a radiação infravermelha, aumentando a temperatura do ar e gerando maior formação e retenção de vapor de água. O resultado é o aumento de nuvens, que também absorvem a radiação infravermelha, agindo de forma similar a uma estufa, elevando ainda mais a temperatura média global e interferindo no equilíbrio energético do planeta (LABOURIAU, 1998).

Nessa perspectiva, quatro fatores são responsáveis pelas mudanças climáticas: a expansão térmica dos oceanos, o derretimento dos glaciares de montanha, o derretimento das calotas polares nos extremos da Terra e o aumento do nível atual do oceano. Moura (2005) argumenta que o derretimento das calotas polares, que resulta no aumento do nível dos oceanos e em inundações, é um fenômeno de retroalimentação positiva. Quando o gelo derrete, a reflexão da radiação diminui, e a água escura do oceano absorve mais calor, acelerando o processo de derretimento. Além disso, o gelo liberado durante o derretimento libera uma quantidade significativa de carbono na atmosfera, contribuindo ainda mais para o efeito estufa.

Em decorrência da concentração de gases e do aumento do efeito estufa, estima-se que o planeta tenha aquecido, em média, 0,85°C durante o período de 1880 a 2012. Além disso, cada década posterior tem sido mais quente do que a anterior, em comparação com qualquer período desde 1850. Essas mudanças climáticas globais e seus impactos ambientais são ônus que se estendem por gerações, resultado de questões ambientais não resolvidas desde a intensificação do modelo industrial e da urbanização. Além das transformações já destacadas e das mudanças em curso, a contínua emissão de gases de efeito estufa causará ainda mais aquecimento e alterações em todos os componentes do sistema climático (IPCC, 2014).

As mudanças climáticas nas zonas costeiras podem aumentar os riscos para as cidades de três maneiras: através do aumento do nível dos oceanos, devido ao derretimento de glaciares; das tempestades, causadas por precipitações mais fortes ou prolongadas; e por mudanças que aumentam o fluxo dos rios, resultantes da impermeabilização do solo. Portanto, o aumento da temperatura leva a mudanças climáticas, como o derretimento do gelo nos polos, alterações nas correntes marítimas e o aumento do nível dos oceanos (UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME, 2011).

Durante o século XX, foram registradas mudanças eustáticas com um aumento médio global do nível do oceano de aproximadamente 19 centímetros, e os modelos climáticos projetam a possibilidade de um aumento médio de cerca de 82 centímetros até o final do século XXI (UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME, 2011). Mesmo nos cenários mais otimistas, com ações de mitigação das mudanças climáticas, a eustasia continuaria a ocorrer, afetando cidades litorâneas devido à transgressão marinha. As zonas costeiras abrigam cerca de dois terços da população mundial e concentram a maior parte das metrópoles contemporâneas (MORAES, 2007). Esse amplo espaço de interação humana é palco de complexas relações entre o homem e o meio ambiente, impactando a dinâmica ambiental.

As cidades costeiras buscam estratégias de desenvolvimento econômico, frequentemente ligadas ao turismo imobiliário. O crescimento urbano nesses municípios ocorre devido à urbanização, ao turismo e à atividade de construção civil, que, em conjunto, impulsionam a transformação, alterando o uso do solo e expandindo o território, gerando polarização de empregos e investimentos. Entretanto, esses processos também reproduzem a valorização do espaço, resultando em desafios relacionados ao planejamento urbano.

Para Souza e Rodrigues (2004), o planejamento urbano é uma atividade que visa ao futuro, uma forma de prever a evolução de fenômenos ou processos e tomar medidas

preventivas contra problemas e dificuldades, ou ainda aproveitar seus possíveis benefícios. A integração das políticas ambientais com os avanços na política urbana nas últimas décadas é considerada um dos grandes avanços na gestão territorial do Brasil (POLLETE; BARROS, 2012).

No contexto das mudanças climáticas e elevação do nível do mar, algumas capitais litorâneas do Brasil já incorporaram em seus planos diretores diretrizes e estratégias, como os municípios de Florianópolis (SC), Rio de Janeiro (RJ), Salvador (BA), Recife (PE) e Santos (SP). Essas iniciativas visam enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e buscar soluções que garantam a sustentabilidade e resiliência dessas cidades costeiras.

Impactos climáticos causados por resíduos sólidos

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo na geração de resíduos sólidos, o que está diretamente ligado a diversos fatores, como o crescimento populacional, o consumo excessivo, mudanças nos hábitos e estilo de vida, além da menor durabilidade dos produtos devido ao ciclo de vida reduzido. Essas tendências têm levado a um padrão de vida insustentável para a humanidade. Esse aumento no consumo demanda cada vez mais recursos naturais para a produção, o que pode ameaçar várias espécies e levar à sua extinção.

Como resultado desse sistema consumista, o descarte inadequado dos resíduos tem se tornado uma grande preocupação. No entanto, após vinte anos de tramitação, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei nº. 12.305/10. Essa lei é considerada moderna, pois introduz conceitos inovadores, como a responsabilidade compartilhada pelo ciclo dos produtos e a logística reversa. Seus objetivos incluem a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento adequado dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

No entanto, os dados da Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABRELPE, 2021) mostram que esses objetivos ainda estão longe de serem alcançados. No ano de 2020, foram geradas 82.477,300 toneladas de resíduos no Brasil, o que significa que cada habitante produziu 390 kg de resíduos durante o ano, uma média de 1,07 kg por dia. Esses números são alarmantes e exigem um esforço conjunto da sociedade e do poder público para mitigar o impacto ambiental causado por esses resíduos.

A coleta seletiva é uma das estratégias da PNRS, e é responsabilidade do poder público viabilizar sua implantação nos municípios. Através da coleta seletiva, é possível reduzir a quantidade de resíduos enviados aos aterros sanitários, desviando materiais recicláveis. Embora 74,4% dos municípios brasileiros contem com iniciativas de coleta seletiva, ainda existem destinações inadequadas, com 40% dos resíduos coletados em 2020 sendo enviados para aterros controlados e lixões. Essa má gestão dos resíduos sólidos causa prejuízos à saúde de 77,5 milhões de pessoas e resulta em altos custos para tratamentos de saúde e mitigação da contaminação ambiental, gerando diversos problemas decorrentes da poluição causada pelos resíduos.

A disposição inadequada de resíduos causa diversos impactos ambientais, incluindo a geração de chorume, um líquido tóxico produzido pela infiltração da água e pela decomposição dos compostos presentes no lixo. Além disso, a decomposição de resíduos orgânicos é uma das principais fontes de emissão de metano, um gás de efeito estufa que contribui significativamente para o aquecimento global e as mudanças climáticas (LIMA, 2009).

A URBANIZAÇÃO E OS IMPACTOS CLIMÁTICOS

As cidades são a maior criação humana e têm sido constantemente alvos de desejos, desafios, oportunidades e sonhos (LEITE, 2012). O que as diferencia dos sistemas naturais é sua dinâmica social e econômica (ABIKO E MORAES, 2009). No entanto, a sobrevivência da sociedade sempre dependeu de equilibrar as variáveis de população, recursos naturais e meio ambiente (ROGERS, 1997). Mota (1999) conceitua o ambiente urbano como uma interação entre dois sistemas: o natural, que inclui solo, vegetação, água e fauna, e o antrópico, resultante das ações e atividades humanas.

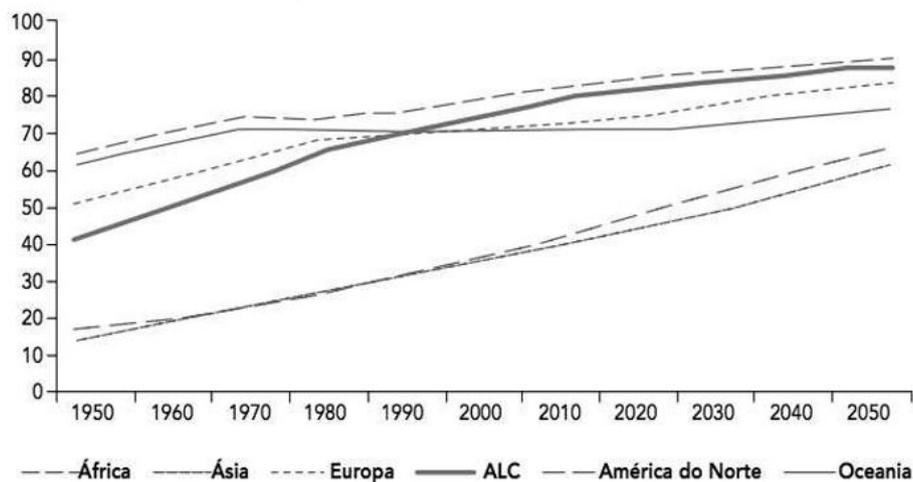
Os primeiros assentamentos humanos permanentes surgiram há aproximadamente cinco mil anos, e cerca de dois mil e quinhentos anos depois, as cidades-estados foram consolidadas. Nessas localidades, os efeitos da urbanização nas paisagens tornaram-se mais evidentes, com a intensificação das intervenções nos processos e fluxos naturais. Isso inclui a alteração de cursos de rios, a eliminação de ecossistemas nativos e a degradação do solo devido à erosão e à salinização causada pela irrigação (HERZOG, 2014). Assim, mesmo antes da revolução industrial, já era possível notar variações nos climas locais decorrentes dessas mudanças no uso do solo (ROGERS, 1997).

Contudo, foi apenas no século XVIII que o processo de urbanização moderno, caracterizado por uma significativa concentração populacional e densidade, teve início. Esse fenômeno foi desencadeado pela Revolução Industrial, que começou na Europa e depois se espalhou para o resto do mundo (HERZOG, 2014). Em 1900, apenas um décimo da população mundial vivia em áreas urbanas, mas atualmente, pela primeira vez na história, essa proporção atingiu 50%. No Brasil, o processo de urbanização ganhou força principalmente no século XX, impulsionado por diversos fatores, incluindo migração e industrialização dos principais centros.

Figura 1 - Representação do crescimento urbano ao longo das décadas.

Fonte: Cidades Sustentáveis, Cidades Inteligentes (2012, p.28).

Ao longo das últimas seis décadas, a urbanização em todo o mundo experimentou um crescimento acelerado e significativo. A proporção da população vivendo em áreas urbanas aumentou de 29% em 1950 para 51% em 2010 (BID, 2015). As cidades sempre foram vistas como centros de oportunidades e berços da civilização, muitas vezes desempenhando um papel de destaque em termos políticos e econômicos. No entanto, elas também passaram a carregar cada vez mais elementos negativos, como a degradação do ambiente natural, a desigualdade social e o congestionamento causado pelo excesso de automóveis.

Figura 2 - Evolução E Estimativa Da População Urbana (%) Por Regiões Do Mundo, Considerando De 1950 A 2050.

Fonte: ONU (2008)

Com o surgimento desses problemas associados à urbanização, a questão da mudança climática global ganhou espaço nas agendas urbanas a partir da década de 1980, e as implicações desse fenômeno nos centros urbanos passaram a ser reconhecidas pela comunidade internacional. Ferreira (2012) destaca que a sustentabilidade é uma questão fundamental nos tempos atuais e se aplica a todas as cidades, principalmente em relação aos seus processos sociais e econômicos.

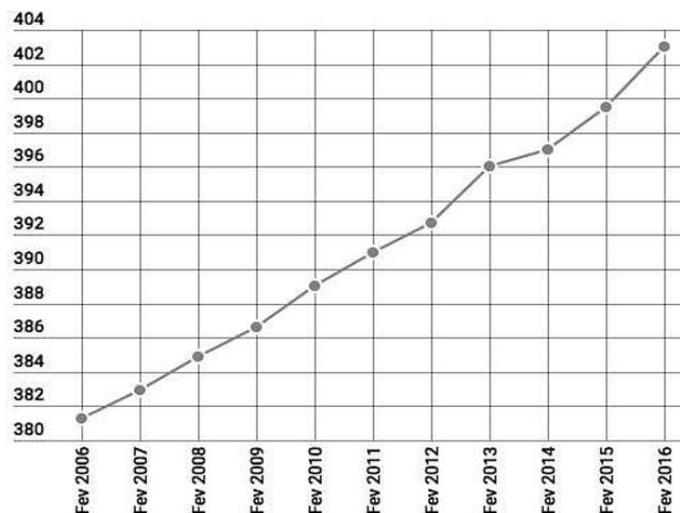
De acordo com o autor:

Pelo seu fenomenal impacto sobre a natureza, a cidade é uma questão de sustentabilidade em si. Por isso, soluções pontuais de construções ecológicas são importantes, mas ainda terão pouco impacto sobre a sustentabilidade urbana enquanto não afetarem a estrutura sistêmica de funcionamento do urbano. Fica claro que, em compensação, são problemas graves de sustentabilidade urbana questões como impermeabilização do solo, deslocamentos e erosão da terra, espraiamento urbano que gera a necessidade de ampliar sempre mais a rede de infraestrutura, falta de comércio e de empregos nos novos bairros, que obriga a deslocamentos desnecessários, insuficiência de sistemas de transporte de massa, repetição infundável de casas, ruas que não são mais ruas. (FERREIRA, 2012, p.32).

Conforme o Relatório Mundial das Cidades (2016) elaborado pela ONU-HABITAT, os padrões de desenvolvimento urbano atual divergem significativamente dos observados há duas décadas, evidenciando o acelerado processo de urbanização ocorrido nos últimos anos. O relatório reconhece que, embora alguns problemas como assentamentos informais e acesso a serviços básicos persistam ao longo dessas duas décadas, outros foram agravados, a exemplo do aumento de 70% nas emissões de CO₂ (ONU, 2016), principal gás responsável pelo efeito estufa.

A ONU-Habitat também alerta para a insustentabilidade do modelo atual de urbanização, tornando imperativo estabelecer novos padrões para enfrentar os desafios urbanos. A forma como as cidades se desenvolveu ao longo do tempo contribuiu consideravelmente para as questões climáticas, tornando crucial que seu crescimento e desenvolvimento sejam parte da solução. Nesse sentido, é de suma importância concentrar esforços em políticas urbanas adequadas que busquem um desenvolvimento mais sustentável, com infraestrutura eficiente e medidas para reduzir as emissões.

Figura 3 - Gráfico representando o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera nos últimos 10 anos.



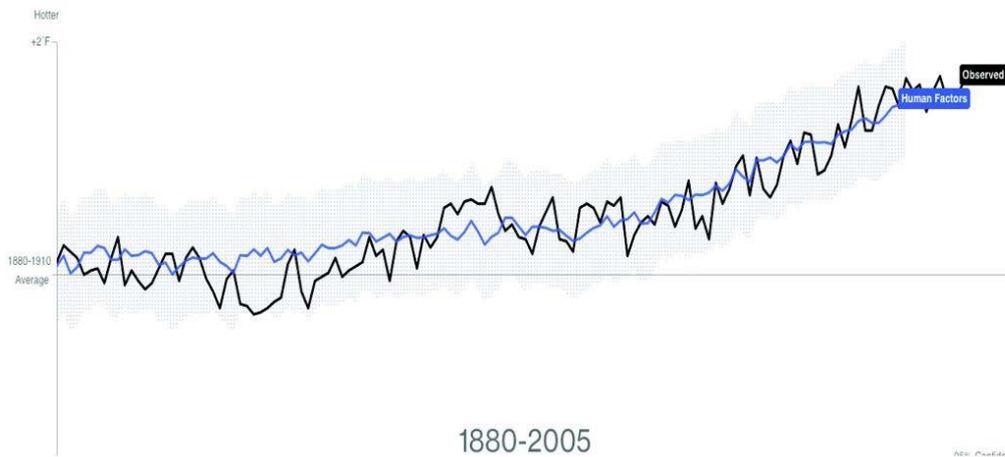
Fonte: WRI Brasil (2016).

Segundo o centro de estudos urbanos LSE Cities (*London School of Economics and Political Science*, 2014), as atividades de planejamento, gestão e governança urbana devem desempenhar um papel central nas políticas de redução das emissões de gases do efeito estufa, visando proteger as populações diante de eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas, como enchentes, tempestades e ondas de calor. Além disso, o LSE Cities aponta que a principal fonte de emissões de gases do efeito estufa nas cidades provém do uso de energia, seja na produção industrial, transporte ou nos edifícios (aquecimento,

resfriamento, iluminação e aparelhos elétricos).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas classificou o ano como o mais quente da história, com temperaturas recordes em várias partes do mundo. A organização filantrópica *Bloomberg*, no mesmo ano, produziu gráficos intitulados “*What’s warming the world*” (“O que está aquecendo o mundo”, em tradução livre), que demonstram medidas desde 1880 até 2005 para evidenciar os fatores que contribuíram para o aumento das temperaturas, reafirmando que a ação humana foi a principal responsável.

Figura 4 - Infográfico demonstrando que a causa do aumento da temperatura global está relacionada com fatores humanos.



Fonte: Bloomberg Philanthropies (2015).

Essa constatação foi apresentada no mesmo ano da realização da Conferência do Clima em Paris, a COP21, na qual países chegaram a um acordo para estabelecer metas de longo prazo com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global em menos de 2°C, com esforços para limitá-lo a 1,5°C (WRI, 2016). A participação e comprometimento dos governos municipais também foram evidenciados nesse contexto. A urgência de um acordo climático já havia sido destacada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU, que demonstrou, por meio de um estudo, que, se as emissões de gases continuassem no ritmo atual, a temperatura média global poderia subir de 3,7 a 4,8 graus até o ano 2100, em comparação com as temperaturas da era pré-industrial.

Embora as cidades sejam grandes centros econômicos e sociais, seu espaço físico ocupado é relativamente pequeno. Estimativas apontam que as cidades ocupam cerca de 2% da superfície terrestre (O’ MEARA, 1999). No entanto, essa ocupação muitas vezes é dispersa, resultando em ineficiência energética, aumento de custos de infraestrutura e maior dependência de deslocamentos motorizados. Além disso, essa forma de urbanização consome mais recursos naturais e áreas verdes. De acordo com Portes (2013), a maneira como a urbanização ocorreu nos últimos anos tem um impacto considerável no clima urbano:

O urbanismo atual das cidades é considerado disperso e gera problemas ambientais, face ao espalhamento da malha urbana sobre a paisagem natural, eliminando florestas, se apropriando dos recursos naturais, aumentando a demanda por consumo e energia, produzindo resíduos em excesso como resultados do modelo de consumo. A dispersão urbana exige intenso uso de veículos para transporte de mercadorias e pessoas (em âmbito local, urbano, regional, nacional e internacional) que acarreta na poluição do ar através da emissão de gás e s provenientes de combustíveis fósseis nos diversos meios e redes de transporte, bem como da

impermeabilização do solo de correntes da pavimentação excessiva, que além de exercer sérios danos ao ciclo hidrológico, proporciona enchentes face à deficitária infraestrutura urbana, bem como impacta o clima urbano de forma considerável. (PORTES, 2013, p.23)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, diante das crescentes mudanças climáticas que enfrentamos atualmente, o papel do planejamento urbano no enfrentamento das questões climáticas é indispensável. Por meio de estratégias e políticas urbanas efetivamente integradas, é possível promover a sustentabilidade e a resiliência das cidades.

Um dos fatores que contribuem para o aquecimento global é o descarte inadequado de resíduos sólidos, resultado do crescimento urbano acelerado e do consumo desenfreado. Essa situação agrava os impactos climáticos e representa um desafio significativo para as cidades ao redor do mundo.

A urbanização desordenada também tem consequências negativas, como o aumento das temperaturas no microclima urbano e a demanda crescente por energia para resfriamento, intensificando ainda mais o impacto climático.

Para mitigar esses problemas, é fundamental adotar o planejamento urbano sustentável. Isso inclui diretrizes que promovem o desenvolvimento urbano compacto, a mobilidade urbana focada no transporte coletivo e ativo, bem como políticas de reciclagem e redução do desperdício.

Fica claro, portanto, que as cidades devem compreender a importância de um planejamento urbano planejado com a sustentabilidade ambiental. Ao adotar medidas concretas e integradas, podem se tornar líderes na luta contra o aquecimento global, oferecendo qualidade de vida aos seus habitantes e se preparando para enfrentar os desafios climáticos que estão por vir. O planejamento urbano sustentável é a chave para construir cidades resilientes e preparadas para um futuro mais seguro e saudável para as gerações futuras.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Renewable Energy Market Update 2019. Paris: IEA, 2019-2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). Dados estatísticos: energia eólica no Brasil. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Dados estatísticos: energia solar fotovoltaica no Brasil. 2021.

AZEVEDO, R. L. Fontes de energia renováveis e não renováveis. In: VI Seminário Nacional de Ensino de Ciências da Saúde e do Ambiente (VI SENACS), 2013. Anais [...]. Teresina: Universidade Federal do Piauí, 2013. p. 387-394.

BAIRD, C.; CANN, M. Química Ambiental. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/362355/1233579/BEN+2018.pdf/234215ff-fb14-426f-9554-1ccec4c8e105>>. Acesso em: 13 de jun. de 2023.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID). Perspectivas macroeconômicas da América Latina: políticas para o crescimento inclusivo e sustentável. 2015. Disponível em: <<https://publications.iadb.org/publications/portuguese/document/Perspectivas-Macroecon-ficas-da-Am-rica-Latina-Pol-ticas-para-o-Crescimento-Inclusivo-e-Sustent-vel.pdf>>. Acesso em: 10 de julho de 2023

BARBIERI, J. C. A questão ambiental e a sustentabilidade: Uma introdução. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1997.

BRUM, A. R. R. O papel das fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira. Revista FAE, v. 16, n. 2, p. 21-36, 2013.

DONEV, L. T. Análise da eficiência energética e da sustentabilidade em uma região com base em um sistema de indicadores. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ENERGIA DA BIOMASSA, conheça o potencial no Brasil. União Nacional da Bioenergia, 2021. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/09/28/energia-da-biomassa-conheca-opotencial-no-brasil.html>. Acesso em 13 de jun. 2023.

FERREIRA, L. Urbanização e o desafio da sustentabilidade. Revista InterTema, Campo Mourão, n. 15, p. 146-153, jun. 2012. Disponível em: <<http://revistas.uem.br/index.php/InterTema/article/view/14192>>. Acesso em: 10 de julho de 2023

GIDDENS, A.; VIANNA, L. Aquecimento global: a difícil trama da ação coletiva. Tempo Social, v. 22, n. 1, p. 169-190, 2010.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Global Wind Report 2020. [S.l.], 2020.

GOLDEMBERG, J. Energia e Meio Ambiente. São Paulo: Edusp, 2015.

HERZOG, T.; MONTE-MÓR, R.L.M.; LOURENÇO, R.W. Ciência, tecnologia e inovação para a sustentabilidade urbana no Brasil. Rio de Janeiro: Garamond, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Renewable Energy Market Update 2021. Paris: IEA, 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2014.

LABOURIAU, M. L. Modificações do clima e tendências climáticas em regiões tropicais. Revista Brasileira de Climatologia, v. 3, n. 3, p. 25-38, 1998.

LEITE, R.C. Beyond Modernist Masters: Contemporary Architecture in Brazil. New York: Princeton Architectural Press, 2012.

LETCHER, T. M.; WILLIAMSON, D. B. *Understanding the Environment: Bridging the Disciplinary Divides*. London: Routledge, 2004.

LIMA, G.A.F. Management of urban solid wastes in Brazil. *Waste Management & Research*. v. 27, n. 1, p. 3-9, 2009.

MORAES, J. M. A. *Geografia: pequena história crítica*. 20. ed. São Paulo: Hucitec, 2007.

MOTA, S. A. Cidade e revolução urbana: uma revisão crítica do “novo paradigma”. IN: *Anais do Seminário Cidade e Revolução Urbana*. Belo Horizonte, UFMG, 1999.

MOURA, R. S. Terra, clima e o homem. *Ciência hoje*, v. 38, n. 227, p. 26-29, 2005.

O'MEARA, M. Cidades sustentáveis. Nota técnica, Brasília, 1999. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set13.pdf> Acesso em: 10 de julho de 2023

ONU-Habitat. *Relatório mundial das cidades: melhorar a governança urbana*. 2016. Disponível em: <<https://unhabitat.org/relatorio-mundial-das-cidades-melhorar-a-governanca-urbana>. > Acesso em: 10 de julho de 2023

POLLETE, M. J.; BARROS, P. P. C. A. O estatuto da cidade e as políticas ambientais do município de São Paulo. In: *SEMINÁRIO INTERNACIONAL: URBANIZAÇÃO, DESIGUALDADES E MEIO AMBIENTE*, 2012.

PORTES, R. A. Impacto da urbanização no clima urbano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 28, n.2, p. 179-188, jun. 2013. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=155224740009>>. Acesso em: 10 de julho de 2023

ROGERS, P. *The Annotated Arch: A Crash Course in the History of Architecture*. Kansas City: Andrews McMeel Publishing, 1997.

SIEBERT, L. Mudanças climáticas: desafios e soluções. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, n. 4, p. 833-847, 2013.

SOUZA, M. L. P. R.; RODRIGUES, A. B. Planejamento urbano municipal: um jogo de estratégias políticas entre cidade formal e informal. In: SOUZA, M. L. P. R. (Org.). *Atores, territórios e desenvolvimento socioespacial*. Rio de Janeiro: Consequência, 2004.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME. *Cities and Climate Change: Policy Directions*. Nairobi: United Nations, 2011.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). *COP21: Acordo de Paris*. 2016. Disponível em: <<https://www.wri.org.br/pt-br/cop21-acordo-de-paris/>. > Acesso em: 10 de julho de 2023

Estudo luminotécnico de uma subestação de energia

Lighting technical study of a power substation

Gabrieli Sampaio Carra

Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP

Danilo Carlos Rosseto Minhoni

Orientador. Me. Docente do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

RESUMO

O estudo luminotécnico tem como intuito distribuir corretamente a luminosidade no ambiente, atendendo as necessidades impostas pelo cliente e que estejam de acordo com as normas brasileiras de instalações elétricas de baixa tensão. Este projeto apresenta o estudo luminotécnico de uma subestação de energia externa, visando uma melhor iluminação do pátio energizado, equipamentos e seus respectivos painéis. Um dos principais pontos fundamentais de iluminação são os equipamentos, devido as suas manutenções. Será apresentado um estudo apropriado para a subestação de energia com projetos e *softwares* utilizados.

Palavras-chave: energia. iluminação. luminotécnico. subestação.

ABSTRACT

The luminotechnical study aims to correctly distribute the luminosity in the environment, meeting the needs imposed by the client and that are in accordance with the Brazilian standards for low voltage electrical installations. This project presents the lighting study of an external power substation, aiming at better lighting of the energized courtyard, equipment and their respective panels. One of the main fundamental points of lighting is the equipment due to its maintenance. An appropriate study for the power substation will be presented with projects, studies and software used.

Keywords: energy. lighting. luminotechnician. substation.



INTRODUÇÃO

Segundo Ferreira (2018), ao se utilizar um ambiente, é extremamente necessária uma iluminação adequada, seja para integridade física ou mental.

Segundo Vitoria, Lemos, Cardoso e Giaculi (2018), a iluminação, usada de forma inadequada e exagerada, é responsável por grande uma grande parte do consumo de energia elétrica. Calcula-se que para a geração de luz, cerca de 17% da energia consumida pelo país, é destinada para essa utilização. Rosal, Jesus e Loureiro (2018), comentam que existe uma diversidade de atitudes humanas que causam o desperdício e uso inapropriado de energia elétrica, como por exemplo, computadores ligados sem uso, luzes acessas em ambientes que não estejam sendo utilizados, ar condicionado em locais abertos, entre outras formas.

Por conta disso, é indispensável um estudo luminotécnico para definir quais os melhores pontos, evitando uma sobrecarga de locais desnecessários e atendendo da melhor forma os padrões de exigidos pelo cliente.

A iluminação é um item crítico para uma subestação de energia elétrica, visto que, acidentes, manutenções corretivas e preventivas podem ocorrer a qualquer momento, com ou sem aviso prévio, sendo durante o dia ou à noite. A fim de atender todos os movimentos necessários para sanar qualquer problema ou efetuar manobras de equipamentos, como por exemplo, abertura ou fechamento de chaves seccionadoras, acionamentos de disjuntores de alta, média ou baixa tensão, e entre outros.

Outro ponto de importância que se deve ter uma iluminação adequada, é onde trafejará a chamada subestação (SE) móvel, que é nada mais é do que uma subestação em cima de uma carreta, utilizada de forma temporária.

Para este trabalho será realizada uma pesquisa bibliográfica e um estudo de caso em uma subestação de energia no município de TATUÍ-SP.

Sendo assim, este estudo terá como propósito, abordar a importância de adequar corretamente a iluminação de uma SE (Subestação de Energia Elétrica) e projetá-la, seguindo todas as exigências do cliente proprietário da subestação de energia, através de softwares como o AutoCAD® e SIMONLIGHTING LuxSIMON 10.

Serão utilizados os *softwares* AutoCAD® (versão 2023), SIMONLIGHTING LuxSIMON 10 e Microsoft Word (versão 2307).

O estudo será dividido em 6 etapas, sendo elas:

1. Estudo preliminar (Definição de pontos);
2. Preparação para lançamento no software;
3. Coleta de Resultados;
4. Validação de resultados;
5. Dimensionamento dos circuitos de alimentação (Memorial de cálculo);
6. Aprovação dos resultados.

Será utilizado como base inicial para esse estudo, o projeto da obra da SE Tatuí 02, “SE-TAT02-EM-A1-2202 – Planta Final” e após a última etapa, serão emitidos dois documentos, o projeto “SE-TAT02-EM-A1-2206 – Iluminação do Pátio – Planta e Detalhes” e o memorial de cálculo “SE-TAT02-MD-A4-2201 – Memorial de Cálculo – Iluminação do Pátio”

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O que é uma subestação de energia?

As subestações de energia são conjuntas de equipamentos que realizam a transformação da tensão e corrente elétrica para atender às necessidades de transmissão, distribuição e consumo de energia. Existem diferentes tipos de subestações, cada uma com sua função específica:

1. Subestações elevatórias: instaladas junto às usinas geradoras, elevam a tensão da energia elétrica para que seja transmitida aos centros de consumo de forma mais eficiente, reduzindo as perdas durante o transporte.

2. Subestações de distribuidoras: reduzem a tensão para o “nível primário de distribuição”, padronizado em valores iguais ou superiores a 2,3 kV. Essas subestações concentram grandes cargas e fornecem energia para as subestações de subtransmissão, que estão mais próximas dos pontos de consumo.

3. Subestações rebaixadoras: localizadas próximas às cidades, reduzem a tensão para um nível adequado para atender à população. Os consumidores finais recebem energia em baixa tensão (110 a 440 V) devido a essas subestações.

4. Subestações de consumidores: grandes consumidores, como indústrias, centros comerciais, hospitais e supermercados, que possuem uma potência instalada igual ou superior a 75 kW, recebem energia em média tensão diretamente das estações de subtransmissão ou da rede da concessionária local. Esses consumidores precisam ter suas próprias subestações transformadoras para adaptar a energia para suas necessidades específicas. (GUIMARÃES, 2020)

Ao projetar uma subestação de energia para grandes consumidores, é necessário levar em consideração diversos aspectos técnicos e regulatórios para garantir a segurança e eficiência do fornecimento de energia. (GUIMARÃES, 2020)

O que é uma subestação de energia externa?

As subestações de energia externas são instaladas em áreas abertas ou no exterior de indústrias, ficando expostas às condições climáticas. Por não estarem protegidas em cabines, essas subestações requerem equipamentos com proteções adequadas contra os efeitos do clima, como chuva, sol, vento, raios e poluição, que podem causar danos e desgaste nos componentes.

Devido a essas necessidades de proteção e manutenção mais frequente, as

subestações externas geralmente envolvem custos mais elevados de instalação, o que deve ser cuidadosamente considerado no projeto. Essas subestações podem ser terrestres, com transformadores instalados em bases de concreto no solo e proteções elevadas, ou aéreas, com transformadores fixados em torres, postes, coberturas de edifícios ou plataformas elevadas. (GUIMARÃES, 2020)

Figura 1 – Subestação de energia externa.



Fonte: Autor (2023)

Manutenções da subestação de energia

A manutenção de subestações de energia é crucial para evitar acidentes elétricos, interrupções no fornecimento de energia e garantir a continuidade de serviços essenciais.

É recomendado que empresas com subestações próprias tenham um plano de manutenção que englobe abordagens preventivas, preditivas e corretivas. (FILTROIL, 2023)

A manutenção preventiva visa manter os equipamentos em boas condições para prevenir defeitos, enquanto a manutenção preditiva é realizada quando problemas previstos estão próximos de ocorrer. (FILTROIL, 2023)

Já a manutenção corretiva é feita para consertar falhas e, quando não é programada, ocorre de forma emergencial, resultando na interrupção do fornecimento de energia. (FILTROIL, 2023)

As subestações de energia desempenham um papel crucial em diversos setores, desde concessionárias até hospitais, e é essencial que elas operem de forma contínua e segura. Falhas em uma subestação podem resultar em grandes prejuízos para as empresas e até mesmo em perdas de vidas, considerando a importância vital dessas instalações em hospitais.

Realizar a manutenção regular das subestações, mesmo antes de apresentarem sinais de falhas, é fundamental para minimizar os riscos e evitar danos maiores. Quanto mais cedo um problema for identificado, menor será o risco de paradas não programadas, os custos de manutenção serão menores e haverá menos riscos para os usuários. A manutenção preventiva é essencial para garantir o funcionamento adequado das subestações e prevenir potenciais problemas antes que eles se tornem mais graves.

Estudo luminotécnico: o que é e qual a sua importância?

Para garantir ambientes bem iluminados e de acordo com as preferências do cliente, é essencial realizar um estudo e projeto luminotécnico personalizado. Tanto o excesso quanto a falta de iluminação adequada podem causar desconforto e comprometer os detalhes projetados nos espaços. Portanto, é importante analisar a função de cada ambiente e determinar a quantidade de luz necessária para criar um ambiente visualmente confortável e funcional. (NAVARRO, 2020)

O projeto luminotécnico é desenvolvido por profissionais especializados em iluminação, chamados *lighting designers*, que possuem conhecimentos técnicos sobre medições do ambiente, cores das paredes, tipos de piso, potência e tonalidade das fontes de luz, além de saber escolher a luminária mais adequada para cada área (interna ou externa) e considerar a funcionalidade dos espaços. Esses especialistas costumam ser engenheiros eletricitas ou civis, arquitetos ou designers de interiores com especialização em iluminação. (NAVARRO, 2020)

Um bom estudo luminotécnico visa otimizar o aproveitamento dos espaços e selecionar as luminárias mais eficientes. Investir em serviços e profissionais especializados nessa área pode resultar em economia de energia a longo prazo, reduzindo os gastos mensais com eletricidade. (NAVARRO, 2020)

No caso de estudo da subestação de energia podemos citar o seguinte exemplo: um disjuntor apresentou anomalias durante o período noturno e só é possível fazer manutenção no próximo dia, com a manobra de chaves seccionadoras é possível que o equipamento fique desenergizado o tempo que for necessário, possibilitando a manutenção do equipamento com total segurança. Para que tanto as manobras nas chaves, quanto à manutenção no disjuntor possa ocorrer a noite, faz-se necessários pontos de iluminação estrategicamente posicionados, de maneira que sempre os painéis de manobras e operações, estejam iluminados.

Por isso é tão importante realizar o estudo luminotécnico dos ambientes desejáveis.

DESENVOLVIMENTO

Estudo preliminar (definição de pontos)

Esta seção apresenta um breve resumo do estudo de caso para uma iluminação correta de uma subestação de energia. Para este, serão utilizados: planta final da subestação, memorial de cálculo, projetores de LED (modelo ANDRUS - tecnowatt com potência de 200W) e resultados obtidos no software LuxSIMON 10.

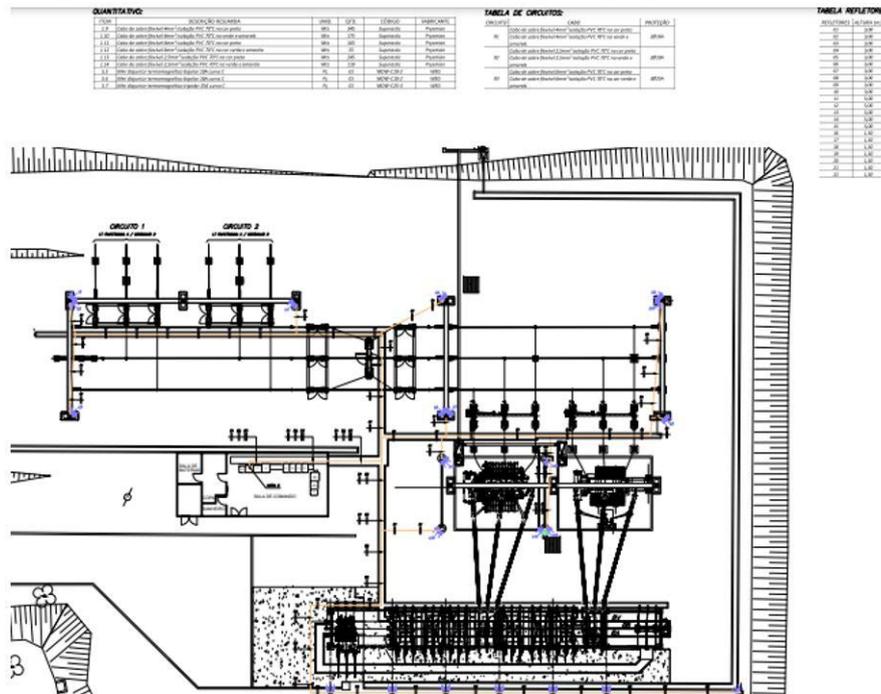
A figura 2, apresenta a planta final da subestação de energia com os projetores definidos, no caso, SE Tatuí 02. Foi feito o estudo preliminar de definição de quais os pontos para se instalar os projetores, assim que definido, é enviado para o cliente realizar uma pré-avaliação de iluminação.

O projeto de planta é realizado no software AutoCAD®, com as medidas, dimensões

e equipamentos em seus respectivos lugares, sendo o mais exato e preciso, para se representar a realidade em campo.

Para se definir os pontos, utiliza-se os critérios exigidos pelo cliente, buscando sempre iluminar os equipamentos e seus respectivos painéis, para que seja possível realizar manutenções e verificações sem que o operador seja prejudicado. Também deve-se deixar uma boa iluminação para o caminho destinado para SE Móvel, além de iluminação de pátio. Resumidamente, é extremamente necessário deixar a subestação de modo geral com uma boa iluminação, principalmente nos pontos críticos mencionados acima.

Figura 2 - Planta final da subestação com os projetores definidos.



O projetor de LED que será utilizado é o modelo ANDRUS - tecnowatt com potência de 200W (figura 3).

Figura 3 - Projetor LED, modelo ANDRUS, fabricante tecnowatt (200W)



Fonte: Tecnowatt (2023)

Preparação para lançamento no software

Após alocar os projetores, utilizou-se o software SIMONLIGHTING LuxSIMON 10 para realizar os estudos e coletar os resultados de iluminação.

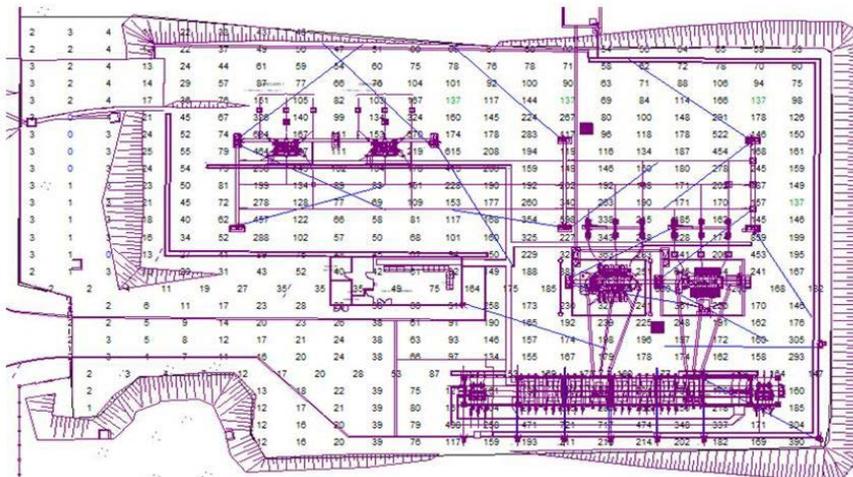
Nesta etapa, a planta será adaptada para utilização no software. Os pontos são traçados com linhas para que se tenha uma base de direcionamento da iluminação dos projetores, como pode ser observado nas figuras 4, 5 e 6 (linhas azuis). Assim ao configurar no sistema, o mesmo irá apresentar a quantidade de lux na aérea projetada (figura 4), as curvas isométricas (figura 5) e um resultado em 2D (figura 6).

RESULTADOS

Coleta de resultados

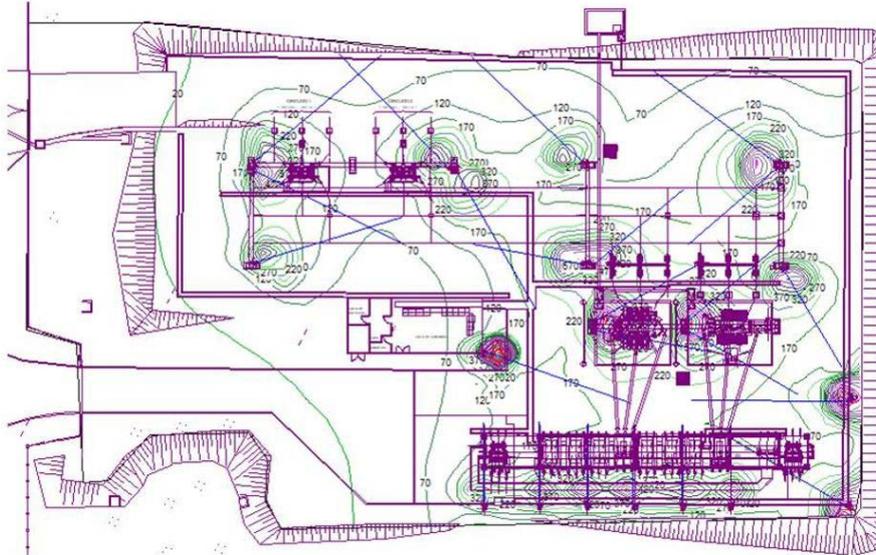
Na figura 4, está sendo apresentando o resultado obtido pelo software em formato de números, ou seja, a quantidade de lux refletida por cada projetor, analisando toda a área estudada. Quanto maior o número de lux, maior será a iluminação. Quanto menor o número ou com 0(zero) lux, menor será a luminância.

Figura 4 – Resultado em formato de números (lux)



Fonte: (Autor, 2023)

O resultado em formato de curvas isométricas, apresentado na figura 5, é um complemento dos números de lux (figura 4), visto apenas de uma outra forma ou para se utilizar em outros meios, ambos estão interligados. É a distribuição de intensidade de iluminação. No caso deste estudo, foi definido que acima de 20 lux deveria ser exibida as curvas no resultado, por isso, alguns locais estão vagos, ou seja, sem representação de curvas.

Figura 5 – Resultado em formato de curvas isométricas.

Fonte: Autor (2023)

Por último é apresentado o resultado em formato 2D do estudo, ou em outras palavras, uma renderização 2D. Pode-se observar na figura 6, uma escala de cores que facilita na leitura da imagem apresentada. Se o ponto for mais claro, significa que tem uma maior iluminação, já os locais mais escuros, uma baixa iluminação.

Figura 6 – Resultado em formato de renderização 2D

Fonte: Autor (2023)

Validação de resultados

A parte crítica da iluminação da subestação, são os painéis de equipamentos, que precisam estar bem iluminados. Se analisar os resultados e a baixa intensidade de luz, for em locais que não sejam críticos e os pontos que necessitam de uma iluminação maior estiverem com alta luminância, considera-se como resultados bons.

Dimensionamento dos circuitos de alimentação (memorial de cálculo)

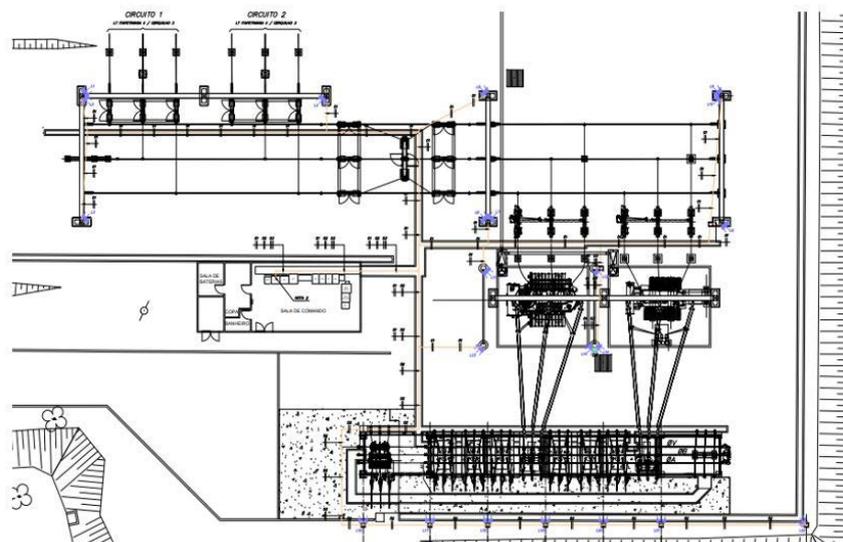
Para fazer o memorial de cálculo utilizou-se o *software Microsoft Word*, onde será calculado quais cabos utilizar (condutor adotado) e qual a proteção adequada (disjuntores), levando em consideração a temperatura da instalação, qual o local da instalação (no caso será ambiente), qual a isolação do cabo e qual o fator de queda de tensão, atendendo sempre aos padrões da norma NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão (2004), resultando assim na corrente que irá passar no circuito de iluminação.

Aprovação dos resultados

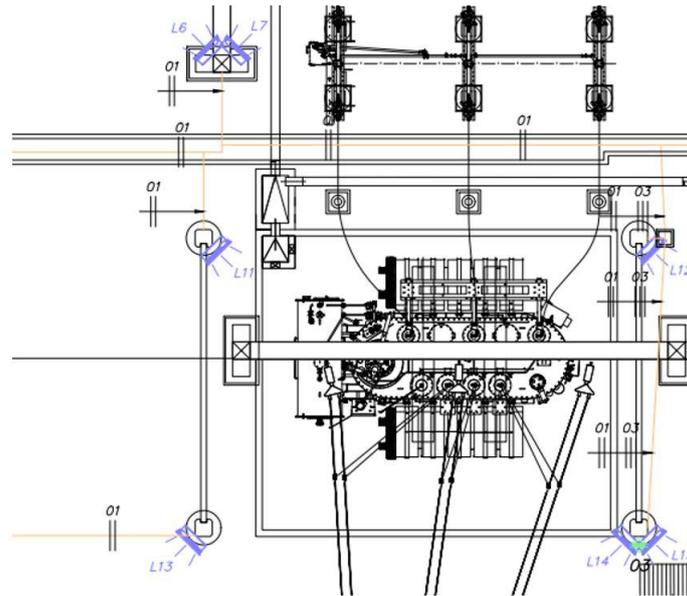
Com todos os estudos, resultados e memorial de cálculo prontos, realiza-se o envio para o cliente pode avaliar se o projeto foi aprovado ou não. Ficando a critério dele, colocar mais ou não pontos de iluminação. Caso, o cliente solicite alguma alteração, todo o processo é refeito novamente, até que se fique de acordo com o solicitado.

A partir do estudo preliminar do projeto, é elaborado o projeto de iluminação (figura 7) e este apresentará todos os projetores, o percurso de todo o circuito de iluminação, identificação da altura de cada projetor instalado (tabela 1) e qual a quantidade de cabos utilizados para a execução.

Figura 7 – Projeto de iluminação (SE-TAT02-EM-A1-2206 – Iluminação do Pátio – Planta e Detalhes)



Fonte: Autor (2023)

Figura 8 – Ilustração com detalhe dos projetores e tomada trifásica.

Fonte: Autor (2023)

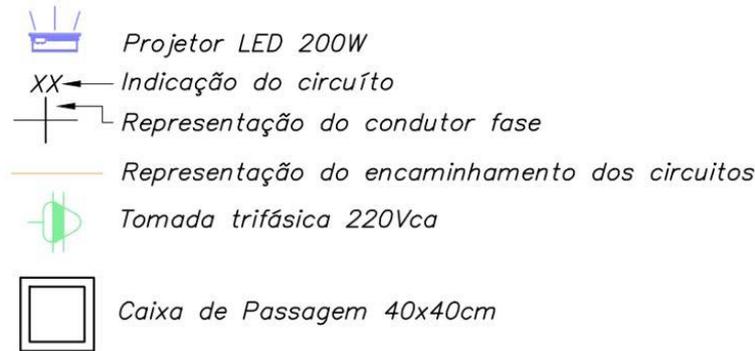
Para quantificar materiais e inserir os projetores no software de cálculo é necessário saber qual a altura de cada um deles, assim como pode ser visto na tabela 1, além de se verificar onde será instalado, podendo ser no pórtico, na parede da casa de comando, em suportes fabricados especificamente para os projetores, e entre outros.

Tabela 1 – Altura dos projetores.

REFLETORES	ALTURA (m)
01	3,00
02	3,00
03	3,00
04	3,00
05	3,00
06	3,00
07	3,00
08	3,00
09	3,00
10	3,00
11	3,00
12	3,00
13	3,00
14	1,50
15	1,50
16	1,50
17	1,50
18	1,50
19	1,50
20	1,50
21	1,50
22	1,50
23	3,00
24	3,00

Fonte: Autor (2023)

Na planta de iluminação (figura 7) também é apresentado uma legenda das representações, assim como mostra a figura 9, para que se tenha um melhor entendimento do projeto.

Figura 9 – Legenda do projeto da planta de iluminação.

Fonte: Autor (2023)

Além das legendas, também é elaborado uma lista de materiais com as suas respectivas quantidades necessárias para a execução, assim como mostra o quadro 1. Nela, soma-se quantos metros de cada cabo serão utilizados, quais os disjuntores que deverão ser instalados para a proteção de cada circuito calculado.

Quadro 1 – Lista de materiais.

ITEM	DESCRIÇÃO RESUMIDA	UNID.	QTD.	CÓDIGO	FABRICANTE
1.09	Cabo de Cobre Flexível 4mm ² isolamento PVC 70°C na cor preto	Mts	245	Superastic	Prysmian
1.10	Cabo de Cobre Flexível 4mm ² isolamento PVC 70°C na cor verde e amarelo	Mts	110	Superastic	Prysmian
1.11	Cabo de Cobre Flexível 6mm ² isolamento PVC 70°C na cor preto	Mts	510	Superastic	Prysmian
1.12	Cabo de Cobre Flexível 6mm ² isolamento PVC 70°C na cor verde e amarelo	Mts	230	Superastic	Prysmian
5.06	Mini Disjuntor termonagnético bipolar 16A curva C	Pç	02	MDW-C16-2	WEG
5.07	Mini Disjuntor termonagnético tripolar 25A curva C	Pç	01	MDW-C25-3	WEG

Fonte: Autor (2023)

Para facilitar na execução da montagem dos projetores, também é feita uma planilha com os circuitos e seus respectivos cabos e proteção (disjuntor), ilustrada no quadro 2.

Quadro 2 – Tabela de circuitos.

CIRCUITO	CABO	PROTEÇÃO
01	Cabo de cobre flexível 6mm ² isolamento PVC 70°C na cor preto	2Ø16A
	Cabo de cobre flexível 6mm ² isolamento PVC 70°C na verde e amarelo	
02	Cabo de cobre flexível 4mm ² isolamento PVC 70°C na cor preto	2Ø16A
	Cabo de cobre flexível 4mm ² isolamento PVC 70°C na verde e amarelo	
03	Cabo de cobre flexível 6mm ² isolamento PVC 70°C na cor preto	3Ø25A
	Cabo de cobre flexível 6mm ² isolamento PVC 70°C na cor verde e amarelo	

Fonte: (Autor, 2023)

Além de todo esse processo, é elaborado os detalhes específicos de cada projetor. Por exemplo, se ele for instalado em um suporte, deve-se projetar com altura correta do suporte, parafusos, cabos de aterramento, conectores de aterramento, e entre outros materiais. Da mesma forma acontece se for instalado em um pórtico. Resumidamente, para cada projetor instalado é feito um detalhe de montagem, visando sempre ser o mais semelhante possível do real.

Por fim, todos os documentos gerados e projetados, são enviados para o cliente. O mesmo deve avaliar e considerar a aprovação quando estiver tudo de acordo com o solicitado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como intuito, demonstrar como é realizado, neste caso, os projetos, plantas, resultados e cálculos para uma iluminação adequada de uma subestação, considerando pontos críticos e exigências do cliente.

É um processo trabalhoso e que demanda tempo e atenção, mas com o avanço da tecnologia, que está sempre inovando a cada dia, em breve, se terá um software ou um processo que possa ser mais ágil e rápido.

Cada empresa realiza um método de estudo, que atenda às suas necessidades, ou seja, não existe uma regra do que é certo ou errado, qual método é melhor que outro, tudo sempre irá depender das exigências do cliente e de como se oferece o serviço contratado.

REFERÊNCIAS

ABNT. Instalações elétricas de baixa tensão - NBR5410 de 09/2004. 2008 . Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/23327/nbr5410-instalacoes-eletricas-de-baixa-tensao>. Acessado em: 16 abr. 2023.

FERREIRA, Lorena. Estudo da iluminação artificial em ambientes hospitalares: projeto luminotécnico do hospital municipal de Paulo Afonso. 2018. Disponível em: <https://portal.ifba.edu.br/paulo-afonso/cursos/engenharia-eletrica/TCC-EE/ano-2018/tcc-lorenna-da-silva-ferreira-2018-2.pdf/view>. Acessado em: 16 abr. 2023.

FILTROIL, Manutenção em Subestações. Manutenção de subestações. 2023. Disponível em: <https://www.filtroil.ind.br/servicos/manutencao-em-subestacoes/> acessado em: 26 maio 2023.

GUIMARÃES, Professor Pablo. Subestação de energia: tudo sobre projeto, instalação e manutenção. 2020. Disponível em: <https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/subestacao-de-energia-tudo-sobre-projeto-instalacao-e-manutencao>. Acessado em: 26 maio 2023.

NAVARRO, Marco. A importância de um estudo luminotécnico. 2020. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/import%C3%A2ncia-de-um-estudo-luminot%C3%A9cnico-marco-navarro>. Acessado em: 26 maio 2023.

ROSAL, H.J.D.; JESUS, G.V.; LOUREIRO, G.E. Análise da eficiência energética da universidade do estado do Pará (UEPA- CAMPUS VIII, MARABÁ). Maceió, Alagoas. 2018. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_266_526_35398.pdf. Acessado em: 16 abr. 2023.

TECNOWATT, Iluminação. Projetor LED modelo ANDRUS. 2023. Disponível em: <https://tecnowatt.com.br/portfolioitems/andrus/?portfolioCats=35%2C36%2C47%2C37#>. Acessado em: 19 abr. 2023.

VITÓRIA, D.; LEMOS, J.; CARDOSO, B.; GIACULI, C. Avaliação da eficiência energética do sistema de iluminação de uma fundação hospitalar no centro oeste de Minas Gerais. Maceió, Alagoas. 2018. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_266_526_36046.pdf. Acessado em: 16 abr. 2023.

Sistemas a eventos discretos (SED's): modelagem e projeto de sistema de controle aplicado à planta de hidrogênio verde no parque tecnológico Itaipu

Discrete event systems (DES): modelling and design of a control system applied to the green hydrogen plant in the Itaipu technological park

Angel Ambrocio Quispe

*Parque Tecnológico Itaipu – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0010220909879065>*

Sandro Battistella

*Universidade Estadual do Oeste de Paraná
<http://lattes.cnpq.br/5487197769616594>*

Tales Gottlieb Jahn

*Parque Tecnológico Itaipu – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8717850453192062>*

Rogério Meneghetti

*Itaipu Binacional
<http://lattes.cnpq.br/7875804125642832>*

Romeu Reginatto

*Universidade Estadual do Oeste de Paraná
<http://lattes.cnpq.br/9166033914580991>*

RESUMO

O estudo propõe o projeto de controle em malha fechada para plantas de produção de hidrogênio verde (PPHV) no Parque Tecnológico Itaipu (PTI). A Teoria de Controle Supervisório (TCS) é aplicada ao controle dos subsistemas individuais da PPHV, enquanto o funcionamento global é implementado por meio do controle sequencial de operação para o funcionamento global da planta. Para a modelagem do comportamento livre dos subsistemas e suas especificações de intertravamento e segurança, empregou-se uma linguagem regular em forma de autômatos. Os supervisores, responsáveis pelo controle são obtidos através do método de síntese



da TCS. O controle sequencial de produção de H₂ é baseado em conhecimento experimental traduzido em um fluxograma. Ambas as abordagens de controle são implementadas em controladores lógicos programáveis (CLP's), e são testadas em uma bancada laboratorial que representa todos os equipamentos da PPHV. Os resultados demonstram a sistematização, flexibilidade e eficiência do projeto do sistema de controle para a PPHV. Além disso, a abordagem permite a estruturação e comprovação do controle em uma bancada laboratorial.

Palavras-chave: planta de hidrogênio verde. sistemas a eventos discretos. autômatos. controle supervisão. controlador lógico programável.

ABSTRACT

The study proposes a closed-loop control project for green hydrogen production plants (GHP) at the Itaipu Technological Park (PTI). Supervisory Control Theory (SCT) is applied to control individual subsystems of GHP, while overall operation is achieved through sequential control. Regular language automata are used for modeling subsystems' behavior, interlocking, and safety specifications. SCT synthesis yields supervisors responsible for control. The sequential H₂ production control is based on experimental knowledge translated into a flowchart. Both control approaches are implemented in programmable logic controllers (PLCs) and tested on a lab bench representing all GHP equipment. The results demonstrate systematic, flexible, and efficient control system design for GHP, with a structured and validated approach on the lab bench.

Keywords: green hydrogen plant. discrete event systems. automata. supervisory control. programmable logic controller.

INTRODUÇÃO

O mundo busca metas ambiciosas de descarbonização para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 90-95% até 2050, seguindo o acordo de Paris (IRENA, 2021). O hidrogênio (H₂) de fontes renováveis, como hídrica, eólica, solar e geotérmica, desempenha um papel crucial nessa transição, fornecendo energia e calor em diversos setores. Tecnologias de H₂, como turbinas a gás e células a combustível, complementam fontes renováveis e substituem combustíveis fósseis. Além disso, o H₂ pode ser armazenado sazonalmente em sistemas de geração de energia renovável, garantindo confiabilidade como eletricidade despachável. Esse avanço impulsiona inovações tecnológicas rumo a um futuro energético sustentável e ecologicamente responsável (IRENA, 2020).

Plantas automatizadas, com uma PPHV, abrange máquinas, equipamentos, dispositivos de segurança e sistemas de computador que controlam o processo (GROOVER, 2002). Um dos tipos de PPHV é a eletrolise alcalina da água, que normalmente é formada por várias unidades de processamento, incluindo o sistema de alimentação de energia, osmose reversa, geração de gás, purificações de gás e armazenamento. Estas em geral são geralmente organizadas por agrupamentos lógicos que seguem um arranjo de linha

de produção típico da indústria manufatureira (IRENA, 2020). A automação é amplamente empregada nessas plantas para otimizar o desempenho nos processos, permitindo o monitoramento contínuo e melhorando a disponibilidade, segurança, e qualidade do produto (IDC-TECHNOLOGIES, 2012).

A PPHV exibe um comportamento de natureza híbrida, envolvendo dinâmicas contínuas, como medição de pressão, temperatura e vazão e dinâmicas discretas, dirigidas por eventos, como estado do nível, tomada de decisões, controle de operação e descrição do comportamento de um sensor. Dessa forma, a teoria de sistemas de eventos discretos (SED's) são amplamente aplicadas na indústria e sistemas de controle como um formalismo matemático para modelar e analisar o comportamento dinâmico discreto. Exemplos de SED's incluem: Sistema de patrulha multirobô (LIMA *et al.*, 2022); Controle multioperador de enxames de robôs (MIYAUCHI *et al.*, 2022); Navegação autônoma de múltiplos robôs (GALINDO *et al.*, 2022); Sistema de neurônios assíncronos (CHEN, *et al.*, 2022).

O trabalho propôs um projeto de sistema de controle em malha fechada para uma PPHV do PTI, utilizando a abordagem orientada a eventos e a TCS para modelar formalmente o comportamento discreto. O controle lógico dos subsistemas da planta foi abordado usando a TCS, enquanto a abordagem do controle sequencial foi baseada no conhecimento experimental de operação devido ao alto custo computacional da abordagem da TCS. Enquanto, o primeiro é responsável por comandar a sequência de eventos de alto nível em todo o sistema (planta), o segundo garante o funcionamento correto e seguro dos subsistemas individuais. O controle sequencial de operação atua em nível superior ao controle lógico dos subsistemas.

A aplicação da TCS envolve a modelagem dos diferentes subsistemas, utilizando modelos baseados em autômatos para representar a dinâmica discreta em malha aberta. Além disso, é importante considerar as especificações de funcionamento, intertravamento e segurança. A partir desses modelos, garantindo o comportamento desejado conforme as especificações (CASSANDRAS E LAFORTUNE, 2008). A abordagem adotada segue padrões similares a trabalhos anteriores, utilizando a arquitetura proposta por Queiroz e Cury (2002) para integrar os modelos formais desenvolvidos na etapa de modelagem e síntese ao sistema de controle da planta.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, a PPHV foi utilizada como objeto de estudo, e a abordagem aplicada foi a TCS.

Planta de Hidrogênio

Em 2011, Itaipu Binacional, Eletrobras, e PTI firmaram um convênio com o objetivo de estudar o ciclo de vida do H₂, abrangendo as etapas de produção purificação, compressão e armazenamento, controle de qualidade e utilização em células a combustível (ESPINOLA *et al.*, 2017). Em 2014, foi instalada a PPHV de eletrolises alcalina da água na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. Essa planta tem a capacidade nominal de produção de 10Nm³/h e potência nominal de 60 kW (PTI, 2020).

A PPHV do PTI possui um sistema automatizado centralizado em um controlador lógico programável (CLP) composto por elementos dinamicamente interligados. Esse controlador contém um programa de instruções e controle do sistema, que operam com base em entradas provenientes de sensores (temperatura, pressão, nível, etc.) e fornece saídas que correspondem a comandos e sinais enviados aos atuadores (eletroválvulas). Além disso, o sistema possui dois níveis de controle: O controle lógico dos subsistemas tem como função garantir o funcionamento coerente e seguro de cada subsistema e o controle sequencial, responsável pela execução contínua e segura do ciclo de produção de H₂ em toda a planta. Os subsistemas operam de forma independente em relação ao controle sequencial de operação.

Unidades de processamento

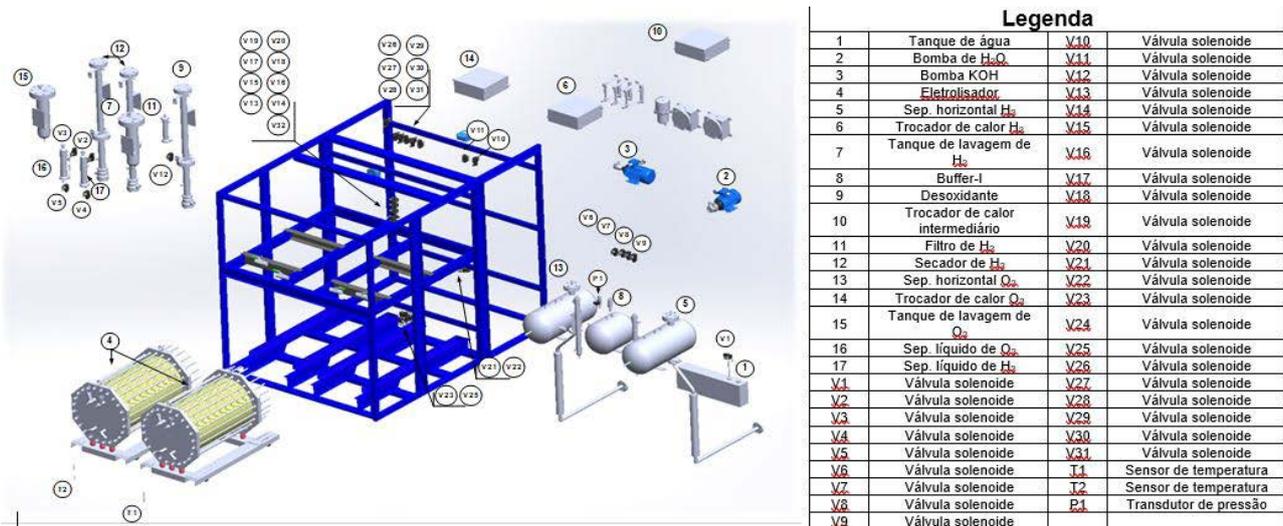
A PPHV de PTI é dividida em unidades de processamento: produção, purificação, refrigeração, compressor e armazenamento. A unidade de produção é o estágio onde o H₂ é produzido usando água desmineralizada, eletrólito de hidróxido de potássio e energia elétrica. A unidade de purificação remove impurezas como água saturada, eletrólito e oxigênio (O₂). A unidade de compressor e armazenamento comprime e armazena o H₂ para uso. A unidade de refrigeração mantém a temperatura operacional constante para melhorar o desempenho da planta.

Subsistemas da PPHV

Um subsistema é um componente físico específico que conta com sensores e atuadores e estão localizados dentro das unidades de processamento, tais como o tanque de água, tanque de lavagem de H₂, separador líquido de H₂, filtro de H₂, entre outros. A Figura 1 ilustra a distribuição dos subsistemas em suas respectivas unidades de processamento, onde as linhas pretas representam o fluxo de matéria e as linhas vermelhas indicam o fluxo de energia.

A linha de produção de H₂ é representada a partir da saída do eletrolisador no estado (7) até o estado (16), enquanto a linha de O₂ vai do estado (3) até o estado (6). A produção de H₂ é iniciada pela passagem de correntes elétricas contínuas no eletrolisador (20). A produção de H₂ se inicia quando circula corrente elétrica contínua nos eletrolisadores (20) provenientes dos retificadores AC/DC, provocando assim uma reação eletroquímica da quebra da molécula de água e gerando bolhas gasosas de H₂ e O₂, e calor.

Figura 2 - Vista expandida dos subsistemas e dispositivos da PPHV.



Fonte: Ambrocio (2020)

Teoria de Controle Supervisório

A TCS é um método formal para síntese de controladores ótimos não bloqueantes em SED's. Essa abordagem utiliza modelos formais de sistemas de controle usando a teoria de autômatos e linguagens, permitindo uma síntese automatizada de supervisores que atendam às especificações de controle a menos restrita possível, garantindo o correto funcionamento dos sistemas (RAMADGE E WONHAM, 1989). Os supervisores projetados pela TCS são minimamente restritivos e não bloqueantes, o que significa que eles desabilitam o menor número possível de eventos, evitando sequências indesejadas de eventos e assegurando um comportamento seguro em malha-fechada (CASSANDRAS E LAFORTUNE, 2008).

A TCS propõe uma clara estrutura entre a planta (sistema a ser controlado) e o supervisor (agente controlador) (RAMADGE E WONHAM, 1989; QUEIROZ, 2004). A planta gera eventos espontâneos e assíncronos, classificados como controláveis ou não controláveis. Eventos classificados em controláveis têm inibição externa (supervisor), enquanto não controláveis não podem ser evitados. As especificações impõem restrições ao comportamento espontâneo da planta, definindo sequências de eventos a serem impedidas para garantir o comportamento desejado em malha-fechada. O supervisor observa a planta, habilita e desabilita eventos controláveis, garantindo vias possíveis e evitando sequências indesejáveis. O teste de controlabilidade é a condição necessária e suficiente para a existência de um supervisor não bloqueante que satisfaça as especificações desejadas para a planta (SIVARAMAN, RAMKRISHMA E MAHARANA, 2011).

Supervisor Monolítico

O controle de SED's com a TCS é considerado monolítico quando apenas um supervisor S é usado para restringir o comportamento geral de uma única planta G (Figura 3), que também é global (RAMADGE E WONHAM, 1989).

O procedimento de modelagem da planta e especificações junto com o processo de

síntese do supervisor monolítico pode ser resumido em três passos:



Fonte: Ramadge & Wonham (1989)

- Passo 1: Identificar o sistema (planta) que deseja modelar, definir o alfabeto (símbolos) de eventos, classificar os eventos em controláveis e não controláveis, construir os modelos de autômatos da planta G_i ($i=1, \dots, n$) e obtenção de um único modelo G_s ($G_s=G_1||\dots||G_n$) através do produto síncrono dos vários modelos da planta.
- Passo 2: Identificar as restrições para os comportamentos indesejados do sistema, construir os modelos de autômatos das especificações de controle do sistema E_j ($j=1, \dots, m$), obter o modelo da especificação global E_s ($E_s=E_1||\dots||E_m$) composto pelo produto síncrono das especificações individuais, obter a linguagem alvo K_s ($K_s=G_s||E_s$) pelo produto síncrono entre a planta G_s e a especificação E_s , e realizar o teste de controlabilidade.
- Passo 3: Síntese do supervisor ótimo não bloqueante S_s ($S_s: L_m(S_s/G_s) = \text{SupC}(G_s, K_s)$).

A minimização do supervisor é vital para reduzir o número de estados e transições (WONHAM E CAI, 2010). Isso é crucial para viabilizar a implementação da estrutura de controle supervisorio em um microcontrolador ou computador industrial. O total de estados impacta a quantidade de variáveis necessárias tornando a otimização fundamental para a eficiência e o sucesso do projeto.

Arquitetura de implementação

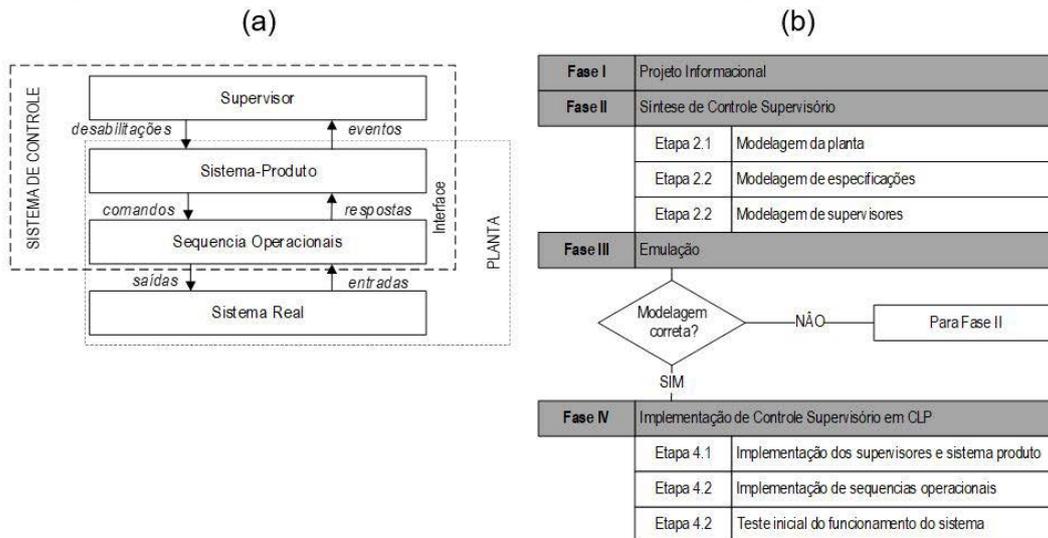
A arquitetura de implementação converte os modelos utilizados na fase de modelagem e sínteses dos supervisores para sua efetiva implementação em um CLP, buscando estruturar a execução do supervisor monolítico em uma linguagem de CLP. O desenvolvimento e implementação seguem a abordagem proposta por Queiroz e Cury (2022), como mostrado na Figura 4 - a.

O supervisor S_s , localizado no nível superior da arquitetura, tem a função de executar comandos permitidos pela planta G_s e receber respostas das sequências operacionais. As sequências operacionais atuam como uma interface entre a solução de controle proposta e o sistema físico real. O supervisor é atualizado sempre que comandos são enviados ou respostas são recebidas, habilitando ou desabilitando eventos controláveis. Os sinais de entrada do sistema real estão associados a eventos não controláveis, enquanto os comandos enviados para a planta estão relacionados a eventos controláveis.

Metodologia de Projeto de controle

O trabalho utiliza a metodologia do projeto do sistema de controle baseado na TCS, seguindo as quatro primeiras etapas da abordagem proposta por Portilla *et al.* (2014), apresentado na Figura 4 - b. A metodologia abrange: Projeto informacional; Síntese de controle supervísório; Emulação envolvendo a modelagem da planta, especificações e a síntese dos supervisores com base na TCS; Implementação culminando na geração automática de código para transcrever os modelos de TCS para a linguagem do CLP. O monitoramento via SCADA não é incluído nessa abordagem.

Figura 4 – Arquitetura de implementação (a), Metodologia de implantação(b).



RESULTADO E DISCUSSÕES

Modelagem dos Subistemas e Controle Sequencial

Cada subsistema da planta é independente dos demais em termos de funcionamento lógico, permitindo que eles sejam modelados separadamente usando a abordagem monolítica da TCS para projetar e implementar as malhas de controle. O controle global da produção de H_2 é realizado pelo controle lógico sequencial da planta, operando em um nível de abstração diferente dos subsistemas internos. Devido à complexidade dos modelos e ao grande número de dispositivos envolvidos, a TCS não aborda o controle sequencial. Para contornar essa limitação, o trabalho desenvolveu um fluxograma descrevendo o funcionamento sequencial da planta.

Controle Supervísório das unidades da PPHV.

Cada subsistema é modelado por um autômato G_s , resultante do produto síncrono dos autômatos G_i individuais que representam os dispositivos ou elementos do subsistema. Especificações E_j são utilizados para descrever as restrições no comportamento livre de cada G_i . Em seguida, é criada uma especificação global E_s para que cada subsistema por meio do produto síncrono das especificações E_i . O supervisor monolítico S_s do subsistema é calculado usando as linguagens alvo K_s , obtida a partir do produto síncrono da planta G_s

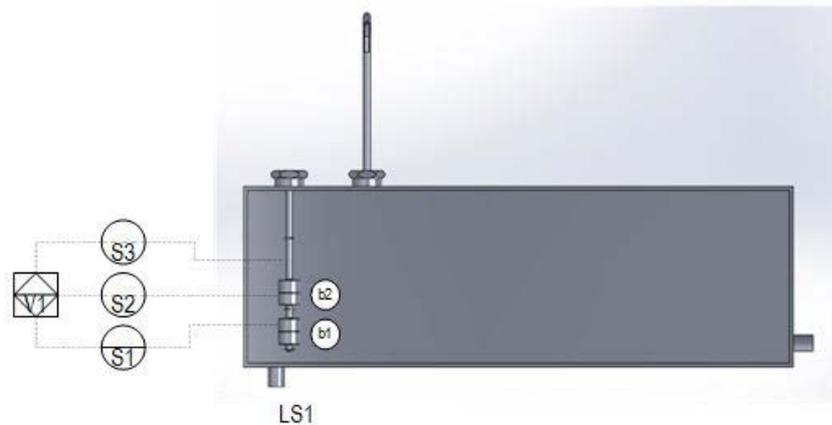
com a especificações Es do subsistema em questão.

A seguir, apresenta-se o processo de modelagem da planta, especificação e síntese do supervisor monolítico do subsistema do tanque de água.

- Tanque de água

O tanque da unidade de produção é composto por dois componentes essenciais: o sensor de nível (LS1) e a válvula solenoide (V1). Sua função é armazenar água residual dos processos, misturando-a com água destilada de alimentação e, posteriormente, bombeá-la para os eletrolisadores. A Figura 5 apresenta o interior do tanque, com o sensor de nível e a válvula solenoide em destaque.

Figura 5 – Vista interna do tanque de água com sensor de nível.



Fonte: Ambrocio (2020)

O funcionamento do sistema é dividido em etapas. Inicialmente, o tanque armazena água residual até o nível S3 da boia b2 e a válvula V1 permanece desligada. Quando a água residual é bombeada para os eletrolisadores, o nível de água diminui e a boia b2 se move para o nível S2. Nesse ponto, a válvula solenoide V1 é ativada, iniciando o carregamento de água destilada no tanque até a boia b2 atingir novamente o nível S3. Se o nível de água cair ainda mais, onde a boia b1 alcança o nível S1, o sistema entra no modo alarme. A Tabela 1 contém os eventos usados para modelar esse subsistema.

Tabela 1 – Eventos do tanque de água.

Evento	Descrição	Controlável
<u>S1</u> 1 in ¹	Interruptor de nível <u>S1</u>	não
<u>S2</u> 1 in	Interruptor de nível <u>S2</u>	não
<u>S3</u> 1 in	Interruptor de nível <u>S3</u>	não
<u>alar</u> 0 in	Desativar alarme	não
<u>alar</u> 1 in	Ativar alarme	não
<u>L</u> <u>V1</u> Co	Ligar válvula <u>V1</u>	sim
<u>D</u> <u>V1</u> Co	Desligar válvula <u>V1</u>	sim

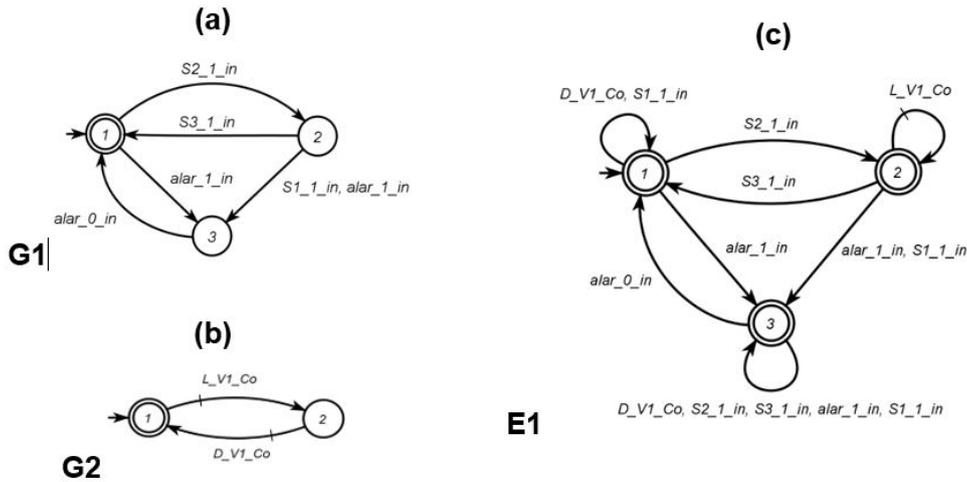
Fonte: Ambrocio (2020)

O autômato G1 (Figura 6 – a) é o modelo representativo do tanque de água. O estado 1 indica um nível alto de água no tanque, o estado 2 representa um nível baixo e o estado 3 indica um nível muito baixo.

O autômato G2 (Figura 6 – b) representa o modelo do comportamento da válvula

solenóide V1. O estado 1 representa a válvula solenóide V1 fechada, e o estado 2, a válvula solenóide V1 aberta.

Figura 6 - Modelo do tanque de água (a), Modelo da válvula solenóide V1 (b), Especificação E1 do tanque de água e a válvula V1 (c).



A especificação E1 (Figura 6 – c) descreve o funcionamento desejado do tanque de água. Nessa especificação, sempre que o nível de solução do tanque estiver alto, a válvula V1 é desligada. Por outro lado, se o nível da solução for baixo, a válvula V1 é ligada. Quando o nível da solução atinge um valor muito baixo, a válvula V1 é desligada e o alarme é ativado.

Síntese dos supervisores para os subsistemas da PPHV

O procedimento utilizado nas seções 3.1.1 foi repetido para modelar os demais subsistemas e suas especificações. Foram criados 26 modelos de dispositivos, 9 especificações de controle e 9 supervisores, como mostrado na Tabela 2. A partir do modelo Gs e das especificações Es, a linguagem alvo Ks é obtida. O supervisor Ss foi gerado usando a linguagem alvo através da síntese da TCS.

Para realizar a síntese dos supervisores monolíticos, utilizamos a ferramenta de modelagem para SED's chamada Supremica. Essa ferramenta oferece recursos para a modelagem formal, análise, verificação e síntese de supervisores (AKENSON *et al.*, 2006). Além disso, é possível realizar o teste de controlabilidade das especificações através dessa ferramenta.

Tabela 2 – Resultado da síntese dos supervisores monolíticos.

Subsistemas	Dispositivos	Produto Sincrono das Dispositivos	Especificações	Produto Sincrono das Especificações	Linguagem Alvo	Supervisor Monolítico	Supervisor Monolítico Reduzido			
		$G_s = G_1 \dots G_n$		$E_s = E_1 \dots E_n$				$K_s = G E$	$S_s = \text{SupC}(G_s, K_s)$	$\text{Min}(S_s = \text{SupC}(G_s, K_s))$
		Q		Q				Q	Q	
Tanque de água	G1, G2	6	E1	3	6	6	6			
Tanque de lavagem de H ₂	G3, G4	4	E2	2	4	4	4			
Separador líquido de H ₂	G5, G6	4	E3	2	4	4	4			
Filtro de H ₂	G7, G8	4	E4	2	4	4	4			
Tanque de lavagem de O ₂	G9, G10	4	E5	2	4	4	4			
Separador líquido de O ₂	G11, G12	4	E6	2	4	4	4			
Tanques separadores de O ₂ e H ₂	G13, G14, G15, G16, G17, G18, G19, G20	576	E7	10	1632	1632	1016			
Refrigeração	G21, G22, G23, G24	16	E8	2	16	16	16			
Compressor	G25, G26	4	E9	2	4	4	4			
TOTAL	-	622	-	27	1678	1678	1062			

Fonte: Ambrocio (2020)

A Tabela 2 resume o processo de modelagem e sínteses empregados nos 9 subsistemas. A coluna “Dispositivos” mostra o número de componentes modelados individualmente em cada subsistema, enquanto a próxima coluna representa o número de estados do autômato G_s resultante de produto síncrono desses autômatos individuais. Nas colunas seguintes, são apresentados o número de especificações E_s , o número de estados da linguagem alvo K_s e o número de estados do supervisor monolítico obtido.

Utilizando o processo de redução de autômatos, foi possível encontrar um autômato equivalente com um menor número de estados e transições em apenas em um subsistema, especificamente o subsistema dos tanques separadores O₂ e H₂.

Controle Sequencial de Operação da PPHV

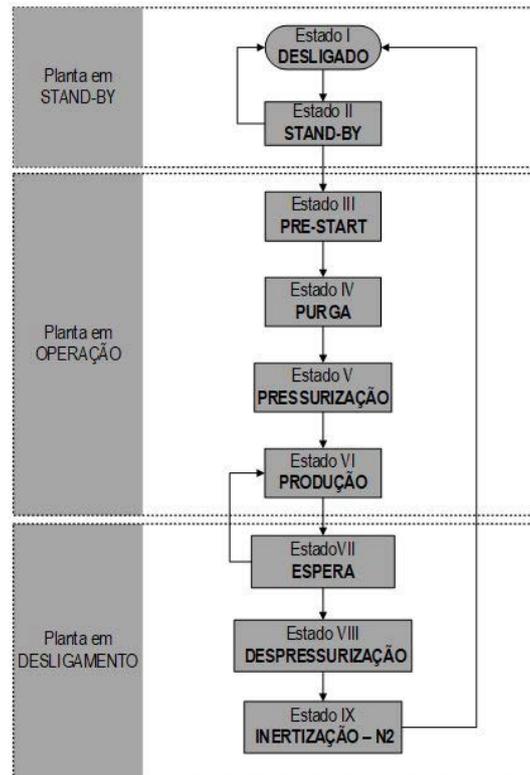
Neste trabalho, optou-se por uma descrição sequencial do funcionamento da PPHV, devido ao alto custo computacional da abordagem da TCS se aplicada também ao nível superior, ao gerar autômatos com elevado número de estados e transições nos modelos de planta, especificações e supervisores. Essa descrição é baseada na experiência dos operadores de produção no modelo existente da PPHV. O objetivo de controle é comandar e monitorar os subsistemas relacionados a cada etapa do ciclo de produção de H₂.

O fluxograma exibido na Figura 7 ilustra as etapas da produção de H₂, que estão interligadas aos modelos e supervisores desenvolvidos na etapa anterior. Essa interligação ocorre por meio do compartilhamento de eventos e da abstração das condições de alarme. Assim, os diversos alarmes presentes nos subsistemas são traduzidos em única condição de alarme para o controle sequencial. Isso simplifica e otimiza o processo de análise, desenvolvimento e implementação do controle, permitindo uma gestão mais eficiente das operações.

A produção de H₂ pode ser resumida em nove etapas principais, que são descritas de forma concisa a seguir. Conforme a Figura 7, o processo de produção de H₂ pode ser resumido em nove estados principais:

- ESTADO I - Desligado: A planta está desconectada da energia elétrica e todos os subsistemas estão desenergizados.
- ESTADO II – *Stand-by*: A planta é ligada e se verifica a presença de alarmes ativos.
- ESTADO III - *Pré Start*: Neste estado, a bomba de hidróxido de potássio é energizada, dando início à circulação da solução pelos eletrolisadores e separadores horizontais de O₂ e H₂. Esse estado dura aproximadamente 60 segundos.
- ESTADO IV - Purga: Neste estado, os eletrolisadores, bomba do *chiller* e duas válvulas solenoide de alívio são energizados. A produção de H₂ e O₂ começa e ambos são liberados no ambiente através das válvulas mencionadas. Esse procedimento tem a finalidade de remover o resíduo de nitrogênio dos separadores horizontais, trocadores de calor, tanques de lavagem, *buffer* I e das linhas de tubulação de H₂ e O₂. A duração deste estado é de aproximadamente 420 segundos.
- ESTADO V - Pressurização: Neste estado, as válvulas solenoides de alívio são desenergizadas e o sistema inicia o processo de pressurização. Quando a pressão no *buffer* I atinge 3 bares, são energizados o reator desoxidante, secadores e um conjunto de válvulas solenoides na unidade de purificação.
- ESTADO VI - Produção: A planta opera continuamente, produzindo H₂ e O₂. A pressão interna da linha de H₂ aumenta gradualmente. Quando a pressão interna do *buffer* II atinge 17 bar, o compressor é acionado, iniciando o armazenamento de H₂ nos tanques de alta pressão. Assim que a pressão do *buffer* II cai para 14 bar, o compressor é desligado e a pressurização recomeça. Esse ciclo se repete até que uma operação manual seja realizada colocando no modo *Stand-by*.
- ESTADO VII - Espera: Os eletrolisadores, o reator desoxidante, os secadores e um conjunto de válvulas solenoides são desenergizados, mantendo o sistema pressurizado, se uma operação manual for realizada e o botão *Start* for ativado, o sistema retornará ao estado de produção. No entanto, se o período de espera exceder a 30 minutos, o sistema entrará automaticamente em despressurização.
- ESTADO VIII - Despressurização: etapa onde a pressão interna do sistema atinge a 0.1 Bar. Em seguida, o sistema avança para o próximo estado.
- ESTADO IX – Inertização: Por último, para garantir uma operação segura no próximo ciclo, os separadores horizontais, os trocadores de calor, os tanques de lavagem e o *buffer* I são submetidos a um processo de limpeza utilizando N₂. Essa medida é essencial para remover quaisquer resíduos ou impureza acumulada e assegurar a integridade do sistema durante as próximas etapas de funcionamento.

Figura 7 - Fluxograma de controle sequencial da PPHV.

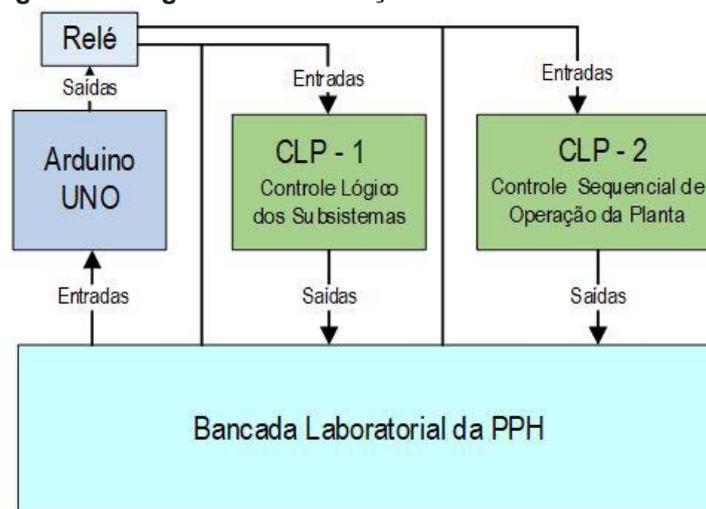


Fonte: Ambrocio (2020)

Implementação da Bancada Laboratorial

Para testar o sistema de controle foi desenvolvida uma bancada laboratorial que simula o comportamento dinâmico discreto da planta. O diagrama de instalação (Figura 8) lista os componentes utilizados para implementação do sistema de controle supervisor e o controle sequencial.

Figura 8 - Diagrama de instalação da bancada laboratorial.



Fonte: Ambrocio (2020)

Os dispositivos eletrônicos empregados no teste do sistema incluem:

- Bancada laboratorial que representa a PPHV;

- Dois CLP's DUO351 da Altus;
- Uma placa de prototipagem Arduino, e
- Um Relé.

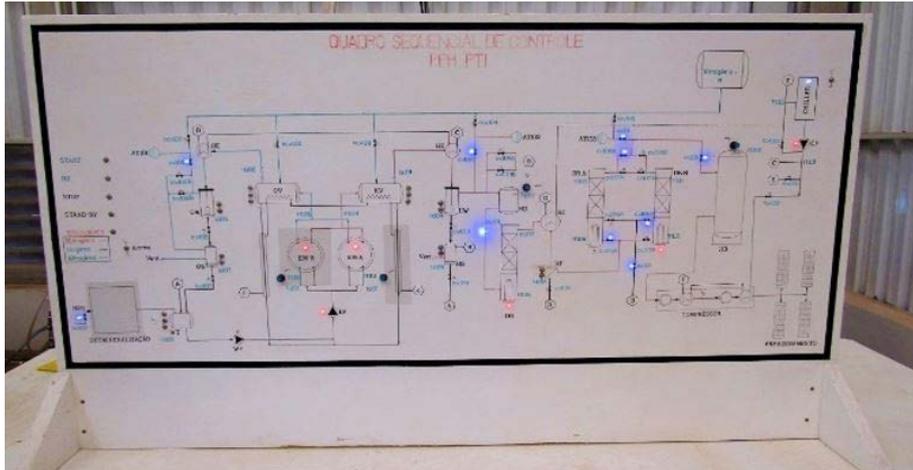
Os CLP's operam por meio de entradas provenientes de interruptores como *Start*, *Stop*, *Emergency*, *Stand-by*, botão de nitrogênio e sensores de nível do tipo boia, temperatura e pressão (30 entradas). Por meio dessas entradas, os CLP's fornecem 28 saídas que correspondem a comandos ou sinais enviados aos atuadores, tais como eletroválvulas, bombas, reator desoxidante, secadores, eletrolisadores e compressor.

Os sistemas de controle supervisão e sequencial foram implementados em duas linguagens diferentes de CLP (IEC61131-3) e em CLP's separados devidos ao limite de entradas e saídas.

Para o controle supervisão, a linguagem baseada em texto estruturado (ST) foi escolhida, pois existe uma ferramenta que gera automaticamente o código a partir de modelos das plantas e especificações. O controle lógico dos subsistemas foi realizado usando a ferramenta *Supremica*, permitindo a modelagem formal, simulação, verificação e síntese dos supervisores. As estruturas obtidas foram convertidas na arquitetura de implementação usando a ferramenta IDE2ST (KINGLE, 2007). O mapeamento dos sinais e comandos da planta física foi codificado manualmente no nível das sequências operacionais da arquitetura de implementação.

Para o controle sequencial da PPHV, utilizou-se a linguagem *Ladder*, que foi utilizada e codificada manualmente no CLP. A implementação do controle sequencial foi construída manualmente a partir de um fluxograma que modela a sequência de estados dos ciclos de produção de H₂. A linguagem *Ladder* proporciona uma implementação mais direta do fluxograma, facilitando a transcrição lógica das sequências de operação para elaboração de comandos por meio de relés. No entanto, é importante realizar testes detalhados para identificar e corrigir possíveis erros relacionados à codificação manual.

Os modelos lógicos utilizados para o controle supervisão dos subsistemas e o controle sequencial da planta são validados por meio de testes na bancada laboratorial (Figura 9) que replica todas as unidades de processamento da PPHV. A bancada permite avaliar o funcionamento lógico e operacional dos dois controladores empregados, bem como aspectos qualitativos como lógica e segurança nas duas abordagens de controle (supervisão e sequencial). Durante os testes, a varredura cíclica da leitura do programa nos CLP's foi configurada para 1 milissegundo ou ms, sem apresentar problemas de sincronização e simultaneidade, comuns em implementações de sistemas de controle com SED's.

Figura 9 - Bancada laboratorial.

Fonte: Ambrocio (2020)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As PPHV despertam interesse de estudo, com objetivo de dominar a tecnologia de automação dessas infraestruturas complexas, que compreendem um elevado número de máquinas, equipamentos e dispositivos controlados por computador. Este trabalho apresenta o projeto e a implementação de um protótipo de sistema de controle para a PPHV instalado no PTI.

A abordagem utilizada baseou-se no formalismo da TCS para controle lógico dos subsistemas e em uma implementação baseada no conhecimento empírico das etapas de ciclo de produção para o funcionamento sequencial de toda a planta. A integração dessas duas abordagens permitiu a definição de uma lógica de controle abrangente para toda a planta, assegurando, desse modo, o correto funcionamento durante todo o ciclo de operação.

A TCS se mostra uma solução adequada para automação na indústria de processo, permitindo modelar o comportamento dos subsistemas da PPHV como SED's. Isso possibilita a derivação de controladores ou supervisores que garantem as especificações de segurança e operação para a planta controlada. O projeto conceitual estabelece uma abordagem organizada, produtiva e segura, combinando a modelagem formal, a arquitetura de controle supervisorio e o projeto do controlador, implementados em um CLP junto como a respectiva linguagem de programação.

Além disso, a abordagem baseada em SED's na PPHV permitiu a análise do comportamento discreto de cada um dos subsistemas da planta, sem a necessidade de abordar aspectos contínuos da dinâmica de funcionamento da planta. Isso resultou em uma significativa redução de complexidade na análise dos subsistemas e na síntese da lógica de controle, proporcionando uma vantagem significativa no projeto e implementação do sistema de controle.

A metodologia do projeto de controle, apresentada na seção 2.2.3, mostrou-se adequada ao trabalho, conferindo sistematização, flexibilidade e eficiência ao projeto de

controle e supervisão dos subsistemas da PPHV. Ela também auxiliou na redução do tempo necessário para o desenvolvimento de cada projeto lógico dos subsistemas, tornando a lógica de programação mais clara e objetiva para o projetista.

Diante a inviabilidade de aplicar a TCS no nível sequencial, optou-se por criar um fluxograma com bases na experiência e estudar a PPHV do PTI. O controle sequencial foi implementado em forma geral e informal, com suporte na experiência do autor na PPHV.

Os modelos implementados foram comprovados por meio de testes de simulação em um ambiente de programação do CLP, juntamente com uma bancada experimental que representa todo o sistema da PPHV. Observou-se o correto funcionamento do controle lógico dos subsistemas e do controle sequencial de operação da planta, de acordo com a sistemática operacional da PPHV.

REFERÊNCIAS

- AKENSON, K. *et al.* Supremica - An Integrated Environment for Verification, Synthesis and Simulation of Discrete Event Systems. Proceedings - Eighth International Workshop on Discrete Event Systems, WODES 2006, Michigan, USA, 2006. 384-385.
- AMBROCIO, Q. A. Aplicação da teoria de controle supervísório à planta de produção de hidrogênio do Parque Tecnológico Itaipu. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu, p. 138. 2020.
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. Introduction to Discrete Event Systems. New York: [s.n.], 2008.
- CHEN, X. *et al.* Supervisory control of discrete event systems under asynchronous spiking neuron P systems. Elsevier, June 2022.
- ESPINOLA, G. D. O. *et al.* Análises Energética e Exergética da Planta de Produção de Hidrogênio Eletrolítico. I Simpósio Paranaense de Hidrogênio, Palotina - PR, 1, 2017. 65-68.
- GALINDO, J. *et al.* Distributed Supervisory Control for Multiple Robot Autonomous Navigation Performing Single-Robot. Elsevier, 2022.
- GROOVER, M. Automation Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. [S.l.]: [s.n.], 2002. 865 p.
- IDC-TECHNOLOGIES. Industrial Automation. 1. ed. [S.l.]: The IDC Engineers & Ventus Publishing AsP, v. 1, 2012. 205 p.
- IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
- IRENA. Decarbonising End-Use Sectors: Practical Insights on Green Hydrogen. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.
- KINGLE, S. Supervisory Control of a Manufacturing Cell: Modeling and Implementation. Universität Magdeburg. Magdeburg, Germany. 2007.

LIMA, C. R. *et al.* Deliberative/Reactive Architecture of a Multirobot Patrol System Based on Supervisory Control Theory. IEEE, 26 april 2022. 11023 - 11033.

MIYAUCHI, G.; LOPES, Y. K.; GROB, R. Multi-Operator Control of Connectivity-Preserving Robot Swarms Using Supervisory Control Theory. 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 12 July 2022.

PTI. Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio. Parque Tecnológico Itaipu, 16 novembro 2020. Disponível em: <<https://www.pti.org.br/pt-br/hidrogenio>>.

QUEIROZ, M. H. Controle Supervisório Modular e Multitarefa de Sistemas Compostos. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, p. 150. 2004.

RAMADGE, P. J.; WONHAM, W. M. The Control of Discrete Event Systems. IEEE - Transactions on Control Theory, v. 77, p. 81-98, 1989.

SIVARAMAN, S.; RAMKRISHMA, J.; MAHARANA, S. Supervisory Control for a Dynamic Power Flow Controller Using a Modular Approach. National Institute of Technology Rourkela. Rourkela, Índia, p. 52. 2011.

WONHAM, W. M.; CAI, K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Suíça: Springer International Publishing , 2010.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressos gratidão a Itaipu Binacional, Parque Tecnológico Itaipu, e ao programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Avaliação do Desempenho de Membranas Poliméricas Nafion/Quitosana em Células a Combustível tipo PEM

Performance Evaluation of Nafion/Chitosan Polymeric Membranes in PEM Fuel Cells

Carina Bonavigo Jakubiu

Parque Tecnológico Itaipu - Brasil

<https://orcid.org/0000-0002-6812-5489>

Rogério Meneghetti

Itaipu Binacional

<http://lattes.cnpq.br/7875804125642832>

Tales Gottlieb Jahn

Parque Tecnológico Itaipu - Brasil

<http://lattes.cnpq.br/8717850453192062>

Janine Padilha Botton

Universidade Federal da Integração Latino-Americana

<https://orcid.org/0000-0002-7404-6568>

Angel Ambrocio Quispe

Parque Tecnológico Itaipu - Brasil

<http://lattes.cnpq.br/0010220909879065>

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo investigar o desempenho de membranas poliméricas produzidas a partir da blenda de Nafion® (N) e quitosana (QT) em células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs). Foram preparadas diferentes blendas com proporções variáveis de N/QT 1:1, 1:2 e 1:3. As membranas resultantes foram submetidas a análises de suas propriedades, incluindo capacidade de absorção de água, capacidade de troca iônica (IEC), condutividade protônica e desempenho eletroquímico. Fatores como absorção de água aumentaram com o aumento da proporção de quitosana, porém, observou-se uma diminuição na capacidade de troca iônica com o aumento da concentração desse polímero. A condutividade protônica das membranas analisadas mostrou-se dependente da temperatura de operação da célula. As blendas com proporção de 1:2 e 1:3 exibiram condutividades expressivas em comparação com a QT pura, mas ainda inferiores ao Nafion®. Em particular, a membrana N/QT 1:2 demonstrou o melhor desempenho, apresentando



maior estabilidade de potencial sob altas densidades de corrente em comparação com as outras membranas.

Palavras-chave: quitosana. Nafion. membrana polimérica. PEMFC.

ABSTRACT

This work aimed to investigate the performance of polymeric membranes produced from a blend of Nafion® (N) and chitosan (QT) in proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). Different blends were prepared with variable proportions of N/QT 1:1, 1:2 and 1:3. The resulting membranes were subjected to analysis of their properties, including water uptake, ion exchange capacity (IEC), proton conductivity and electrochemical performance. Factors such as water uptake increased with an increase in the proportion of chitosan, however, a decrease in the ionic exchange capacity was observed with an increase in the concentration of this polymer. The proton conductivity of the analyzed membranes was dependent on the cell operating temperature. Blends with 1:2 and 1:3 proportions exhibited expressive conductivities compared to pure QT, but still lower than Nafion®. In particular, the N/QT 1:2 membrane demonstrated the best performance, showing greater potential stability under high current densities compared to the other membranes.

Keywords: chitosan. nafion. polymeric membrane. PEMFC.

INTRODUÇÃO

As células a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane Fuel Cells* - PEMFC) têm sido amplamente estudadas e consideradas uma tecnologia promissora para a produção de energia limpa e eficiente (WANG, RUIZ DIAZ, *et al.*, 2020). Essas células operam por meio de reações eletroquímicas que convertem diretamente a energia química em energia elétrica, com a vantagem de emitir apenas água e calor como subprodutos. São constituídas de dois eletrodos, sendo um o ânodo e outro, cátodo, tendo entre eles um meio condutor iônico, neste caso, uma membrana polimérica trocadora de prótons, além de uma ligação elétrica entre os eletrodos. Os gases hidrogênio, H₂, e oxigênio, O₂, são os combustíveis do sistema, sendo o H₂ alimentado no ânodo onde sofre oxidação transformando-se em próton e transportado até o cátodo onde é alimentado o O₂. Para o funcionamento eficiente dessas células, as membranas poliméricas desempenham um papel fundamental, permitindo o transporte seletivo de prótons e evitando a contaminação cruzada de gases reagentes.

A busca por membranas mais eficientes, duráveis e de baixo custo é um desafio contínuo na pesquisa de células a combustível do tipo PEM. Nesse sentido, a combinação de diferentes polímeros tem sido explorada como estratégia para aprimorar as propriedades das membranas (ABU-SAIED, SOLIMAN Ee AL DESOUKI, 2020; KIM, KABIR eE CHOI, 2019; RICO-ZAVALA, CONTRERAS-MARTÍNEZ, *et al.*, 2020). A blenda de Nafion, um polímero perfluorado largamente utilizado em PEMFC, e quitosana, um biopolímero derivado de crustáceos e amplamente disponível, apresenta potencial como uma alternativa para o sistema.

Nesse contexto, a presente pesquisa focou na avaliação do desempenho de membranas poliméricas produzidas a partir da blenda de Nafion e quitosana aplicadas como eletrólito em PEMFC. O Nafion é conhecido por sua alta condutividade iônica e resistência mecânica, mas seu alto custo e condutividade protônica reduzida em temperaturas elevadas têm suscitado a busca por materiais alternativos (OGUNGBEMI, IJAODOLA, *et al.*, 2019). Por outro lado, a quitosana, um biopolímero obtido a partir de fontes renováveis, possui propriedades necessárias para essa aplicação, tendo boa capacidade de produção de filmes, versatilidade química, custo-benefício e oriunda de fontes sustentáveis (VICENTINI, 2009).

A avaliação abrange aspectos como retenção de água, capacidade de troca iônica, desempenho e condutividade protônica, fundamentais para a aplicação prática dessas membranas em sistemas de geração de energia. A compreensão do comportamento dessas membranas é crucial para determinar sua viabilidade e identificar possíveis melhorias que contribuam para o avanço da tecnologia de células a combustível. Portanto, este trabalho apresenta as metodologias utilizadas no estudo dos materiais e discute os resultados obtidos que demonstram sua possível aplicação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Os reagentes químicos utilizados neste trabalho foram Nafion solução 20% (Sigma-Aldrich), ácido acético P.A (Labsynth), álcool etílico 99,8% (Biotec) e água Mili-Q 18 M Ω .cm. A quitosana com média massa molecular foi obtida a partir da síntese da quitina extraída da carapaça de camarões de água doce conforme procedimento descrito na literatura (LUPATINI, SCHAFFER, *et al.*, 2018).

Preparação das membranas

A solução de quitosana (2%) foi preparada dissolvendo a QT em solução de ácido acético 0,1 M. A solução de Nafion (5%) foi preparada dispersando a solução comercial em mistura de água/etanol 1:1. Para produção das blendas, as soluções poliméricas pré-preparadas foram dispersadas ultrassonicamente de modo a se obter misturas N/QT em diferentes proporções de 1:1, 1:2 e 1:3 com base em peso. As soluções resultantes foram vertidas em moldes de PTFE e secas a 40 °C por 24 h. As membranas obtidas foram reticuladas com solução de ácido sulfúrico 4,0 M por 15 h à temperatura ambiente, lavadas com água deionizada para remover o ácido sulfúrico residual e, em seguida, secas em estufa a 30 °C por 24 h.

Caracterização das propriedades das membranas

Absorção de água

O coeficiente de absorção de água das membranas foi estimado pela razão entre a diferença de massa seca e úmida. A massa seca inicial da amostra foi determinada pelo

tratamento térmico à 60 °C por 24 h, posteriormente, as membranas foram hidratadas à 80 °C por 1 h, seguida pela remoção do excesso de água e pesagem (VICENTINI, 2009; SMITHA, ANJALI DEVI E SRIDHAR, 2008).

A quantidade de água absorvida no interior da membrana foi calculada de acordo com a Equação (1):

$$\Delta M = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Sendo, ΔM o coeficiente de absorção de água; M_u a massa da membrana úmida e M_s a massa da membrana seca.

Capacidade de troca iônica (IEC)

A capacidade de troca iônica (IEC) das membranas produzidas a partir da blenda de N/QT foi determinada pelo método de titulação ácido-base. As membranas foram imersas em solução de NaCl 2,0 M por 24 h para trocar os H^+ da membrana por íons Na^+ , e então a solução foi titulada com NaOH 0,01 M usando fenolftaleína como indicador. O IEC ($mmol\ g^{-1}$) foi calculado a partir da Equação (2) (GASPARRINI, 2018).

$$IEC\ (mmol.\ g^{-1}) = \frac{0.01 \times 1000 \times V_{NaOH}}{m_d} \quad (2)$$

Onde, V_{NaOH} é o volume (L) da solução de NaOH utilizada e m_d é a massa (g) da membrana seca, respectivamente.

Caracterização eletroquímica em PEMFC

Preparação do conjunto eletrodo/membrana

Foram utilizados eletrodos comerciais com 0,4 mgPt.cm⁻² e 20% Pt/C. O conjunto membrana-eletrodo (MEA) foi preparado por meio de prensagem a quente, aplicando 50,9 kgf.cm² com auxílio de prensa hidráulica. A temperatura de aquecimento utilizada foi de 125 °C para membrana de Nafion® e de 60 °C para as membranas contendo quitosana (BHOSALE, GHOSH e ASSAUD, 2020; ODEH, OSIFO e NOEMAGUS, 2013b).

Condições de operação

A caracterização eletroquímica foi realizada com um Potenciostato/Galvanostato PGSTAT Autolab 302 equipado com um módulo Frequency Response Analyzer (FRA) em uma célula comercial ($A = 1\ cm^2$), alimentada com H_2/O_2 com 100% de umidade relativa (UR). Uma estação de teste de célula de combustível (*Scribner Associates* – modelo, 850C) foi usada para controlar os parâmetros operacionais, como temperatura da célula, temperatura de entrada dos gases, umidade do gás e vazão.

Medidas de desempenho

O desempenho das membranas foi avaliado a partir de testes de descarga, com obtenção de curvas de polarização. As curvas de polarização foram registradas em uma faixa de potencial de $E = OCV$ à 0,1 V até atingir um comportamento constante com a máxima densidade de corrente.

As medições de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS, sigla em inglês) foram realizadas em $E = 0,8$ V com 10 mV de amplitude em uma faixa de frequência de 1 MHz a 0,1 Hz (PAGANIN, OLIVEIRA, *et al.*, 1998). Todos os experimentos foram realizados em triplicata para reduzir os erros de medição. A condutividade de prótons (σ) da membrana foi calculada usando a Equação (3):

$$\sigma (S.cm^{-1}) = \frac{1}{R} \times \frac{L}{A} \quad (3)$$

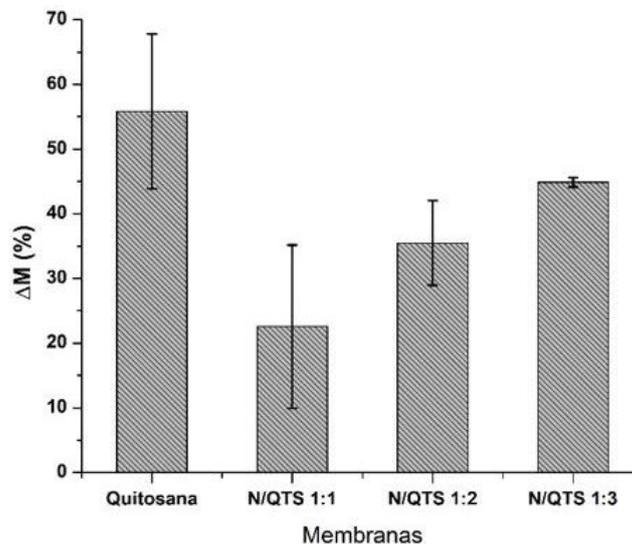
Sendo, L, A e R a distância entre os eletrodos (cm), área da membrana (cm^2) e resistência (Ω), respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Absorção de água

Os testes de absorção de água são propriedades importantes para membranas destinadas ao uso em tecnologia PEM porque é necessário que a membrana retenha água, mas não o suficiente para quebrar o equilíbrio entre as regiões hidrofóbicas/hidrófilas que a compõem. Os resultados de absorção de água para as membranas de N, QT e N/QT 1:1, 1:2 e 1:3 são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Capacidade de absorção de água das membranas de Nafion, Quitosana e suas blends.



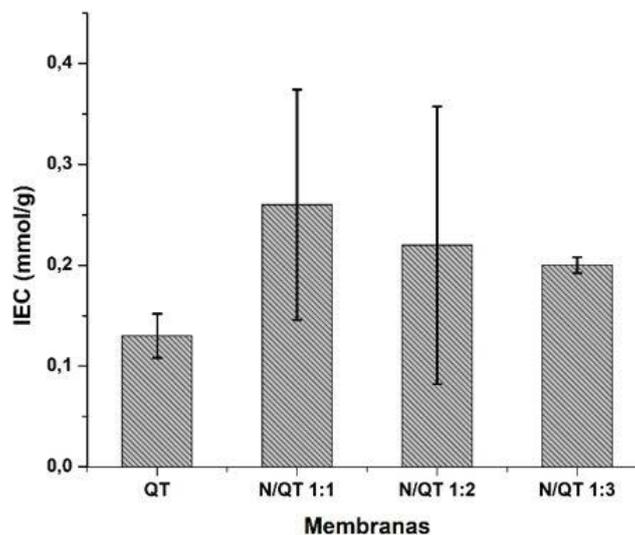
Fonte: Autoria própria (2023)

A membrana de quitosana pura apresenta uma absorção de água de 55%, no entanto as membranas produzidas a partir das blends de N/QT mostram uma menor absorção de água, em que o aumento do teor de QT resultaram no aumento da absorção de água, passando de 23 para 45% quando comparada as membranas N/QT 1:1 e 1:3, respectivamente. As fortes interações (eletrostáticas e ligações de hidrogênio) entre os grupos $-SO_3H^+$ do Nafion e $-NH_3^+$ de QT podem diminuir os sítios de armazenamento de água das cadeias de QT, resultando em uma diminuição na capacidade de absorção de água das blends N/QT. A absorção de água da membrana é um fator importante que influencia a mobilidade do próton; portanto, a concentração de água será diretamente proporcional à condutividade de prótons.

Capacidade de troca iônica (IEC)

Muitas propriedades importantes das membranas de troca de prótons, como retenção de água e condutividade de prótons, dependem da capacidade de troca de íons. IEC indica o número de grupos sulfônicos livres para a troca iônica presente em um PEM, portanto, é necessário um alto IEC para membranas condutoras de prótons (RICO-ZAVALA, CONTRERAS-MARTÍNEZ, *et al.*, 2020). A Figura 2 mostra que a IEC da membrana de controle QT é de $0,13 \text{ mmol.g}^{-1}$. Conforme esperado, o IEC das membranas produzidas a partir das blendas de N/QT aumenta proporcionalmente com o aumento do teor de Nafion. O maior valor de IEC alcançado foi de $0,26 \text{ mmol.g}^{-1}$ com a N/QT 1:1, sendo o dobro do valor da membrana de controle QT. Isso evidencia que os grupos de ácido sulfônico provenientes do Nafion, e presentes como transportadores de prótons, têm um impacto significativo no aumento da IEC das membranas de N/QT.

Figura 2 – Capacidade de troca iônica das membranas de Nafion, Quitosana e suas blendas.



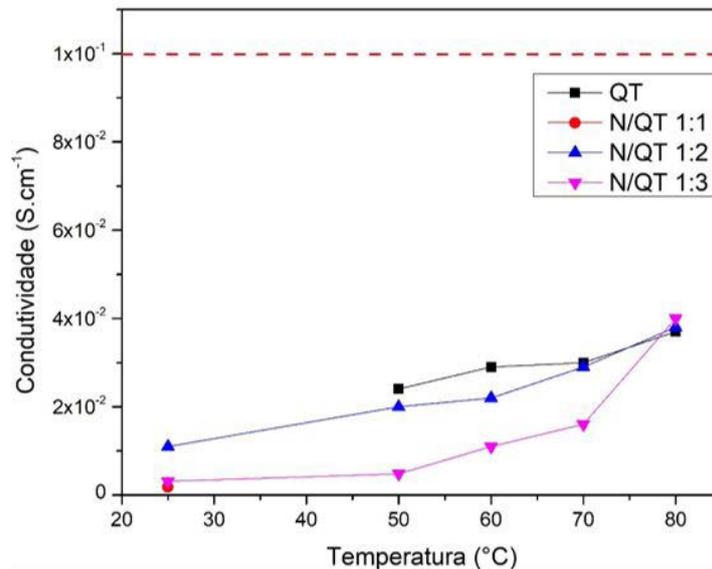
Fonte: Autoria própria (2023)

Teoricamente, o transporte de prótons em eletrólitos poliméricos sólidos ocorre através de canais hidrofílicos inchados com água que são formados como resultado da separação por uma nanofase de segmentos hidrofílicos (portadores de ácido) e hidrofóbicos do polímero (PECKHAM e HOLDCROFT, 2010) (PECKHAM E HOLDCROFT, 2010). Existem dois mecanismos para a transferência de prótons em uma membrana. O mecanismo veicular é aquele em que os prótons são transportados na forma de íons de hidrogênio hidratados (H_3O^+ , H_5O_2^+ , e H_9O_4^+) por gradiente de concentração iônica, e o mecanismo de Grotthuss, pelo qual os prótons são transportados de um transportador para o outro através da rede de pontes de hidrogênio. De uma forma simplificada, este fenômeno pode ser visualizado como se os prótons fossem transportados de uma molécula de água para outra com concomitante reorganização das moléculas de água vizinhas.

Condutividade protônica

Na Figura 3, é mostrada a variação da condutividade do próton em função da temperatura ($T = 25, 50, 60, 70$ e $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) a 100% UR. A membrana de controle QT apresentou uma condutividade de prótons que não variou significativamente com a variação da temperatura, com uma faixa de $0,024$ a $0,037\text{ S.cm}^{-1}$, o que é consistente com trabalhos anteriores (LIU, GONG, *et al.*, 2016). A condutividade de prótons do Nafion ($0,1\text{ S.cm}^{-1}$) é usada para comparação (LUFRAÑO, SIMARI, *et al.*, 2021).

Figura 3 – Condutividade protônica em função da temperatura das membranas de Nafion, Quitosana e suas blendas.



Fonte: Autoria própria (2023)

As membranas produzidas a partir das blendas N/QT mostram evolução expressiva na condutividade protônica ao longo da temperatura, apresentando valores máximos de $0,038\text{ S.cm}^{-1}$ para N/QT 1:2 e $0,040\text{ S.cm}^{-1}$ para N/QT 1:3.

O transporte de prótons nessas membranas pode ser atribuído aos grupos R-NH_3^+ , que servem como uma ponte para o transporte de H^+ entre os grupos $\text{R-SO}_3\text{H}$ do Nafion, obtendo assim uma diminuição da resistência ao transporte de carga e, portanto, resultando em uma melhoria da condutividade do próton. Outro comportamento que pode explicar esses resultados é a formação de uma região hidrofílica contínua pelos grupos $-\text{OH}$ da quitosana que facilitaria essa passagem, corroborando com os resultados de absorção de água, apresentados no item 3.1.1.

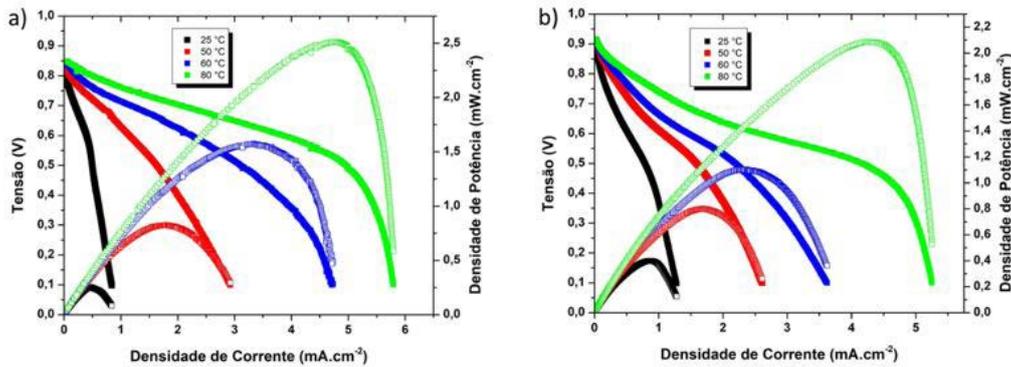
Condutividade protônica

Compreender a relação entre tensão (V) e densidade de corrente (A.cm^{-2}) em diferentes condições de operação permite otimizar a eficiência das células. Fatores como características do eletrodo, propriedades do eletrólito, condições de operação que incluem concentração, temperatura e umidade, são elementos que podem limitar a densidade de potência em uma célula a combustível (BARBIR, 2013). A análise da curva de polarização é essencial para a avaliação do desempenho e eficiência das células a combustível, pois possibilitam identificar os elementos responsáveis por perdas operacionais como resistência

de ativação, resistência ôhmica e de transporte.

A membrana N/QT 1:1 apresentou potencial deveras instável, ao ponto que não foi possível realizar as medidas eletroquímicas necessárias para avaliar seu desempenho. A Figura 4 mostra as curvas de polarização e densidade de potência das membranas N/QT 1:2 e 1:3 em diferentes condições de temperatura e 100% UR.

Figura 4 – Efeito da variação de temperatura no desempenho das membranas de a) N/QT 1:2 e b) N/QT 1:3.

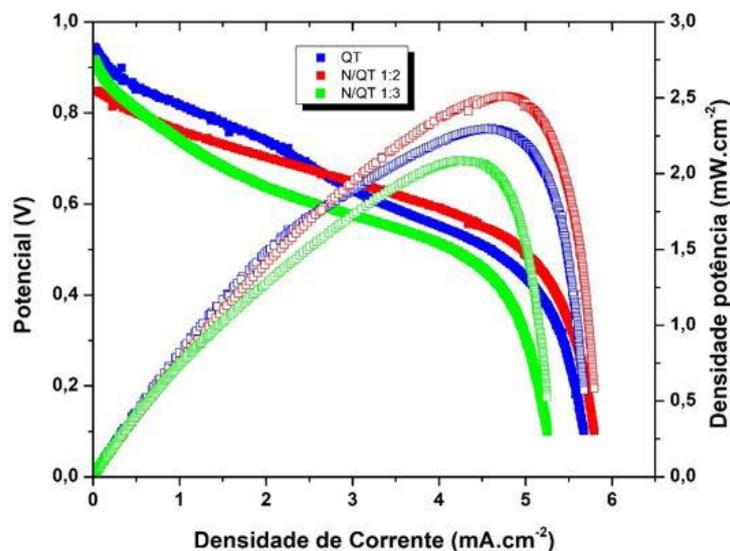


Fonte: Autoria própria (2023)

As tensões de circuito aberto (OCVs) da N/QT 1:3 estão acima de $0,90 \text{ V}$, indicando uma boa capacidade de barreira de H_2 das membranas preparadas (BAI, LI, *et al.*, 2015). Em geral, é possível determinar que o aumento da temperatura favorece o desempenho dos sistemas, alcançando a máxima densidade de potência de $2,51 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ seguido por $2,08 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ para as membranas N/QT 1:2 e 1:3 operando a $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Na Figura 5, são apresentados os resultados concentrados nos limites máximos de corrente e potência das membranas QT, N/QT 1:2 e N/QT 1:3 operando a $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 5 – Desempenho de uma célula unitária a $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando membranas de QT, N/QT 1:2 e N/QT 1:3.



Fonte: Autoria própria (2023)

Entre as três membranas analisadas, a N/QT 1:2 se destaca como a de melhor desempenho, apresentando uma densidade de corrente máxima de $5,79 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Estes resultados indicam também que a proporção de N/QT 1:2 proporciona um comportamento

eletroquímico mais eficiente, permitindo uma maior densidade de corrente e uma resposta mais estável sob condições de alta carga.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstra que as membranas poliméricas desenvolvidas a partir da blenda de Nafion e quitosana apresentam um desempenho promissor em células a combustível PEM. A superioridade da membrana N/QT 1:2 pode estar associada à sua estrutura formada que combina as vantagens de ambos os materiais. A presença de Nafion e quitosana nessa proporção pode contribuir para um equilíbrio ideal entre a condutividade iônica e a capacidade de retenção de água, resultando em uma membrana com desempenho superior, em relação às demais testadas.

A obtenção de alta condutividade e a consideração de parâmetros de estabilidade as tornam uma alternativa viável para aplicações práticas. Futuras pesquisas podem se concentrar em otimizar a formulação das membranas e explorar outras adições para melhorar ainda mais seu desempenho. O avanço nessa área pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, sustentáveis e com preços mais acessíveis para geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- ABU-SAIED, M. A.; SOLIMAN, E. A.; AL DESOUKI, E. A. Development of Proton Exchange Membranes Based on Chitosan Blended with Poly (2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonic Acid) for Fuel Cells applications. *Materials Today Communications*, v. 25, n. 101536, Dez 2020.
- BAI, H. *et al.* Anhydrous proton exchange membranes comprising of chitosan and phosphorylated graphene oxide for elevated temperature fuel cells. *Journal of Membrane Science*, v. 495, p. 48-60, Dezembro 2015.
- BARBIR, F. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. 2nd. ed. [S.l.]: Elsevier, 2013.
- BHOSALE, A. C.; GHOSH, P. C.; ASSAUD, L. Preparation methods of membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells and unitized regenerative fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 133, n. 110286, 2020.
- GASPARRINI, L. J. Efeito da massa molar da quitosana em membranas utilizadas em Células a Combustível. *Dissertação (Mestrado) - UFPR. Palotina*. 2018.
- KIM, H.; KABIR, M. D. L.; CHOI, S. J. Imparting High Proton Conductivity to Nafion Tuned by Acidic Chitosan for Low-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell Applications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 19, p. 6625-6629, 2019.
- LIU, H. *et al.* Chitosan/silica coated carbon nanotubes composite proton exchange membranes for fuel cell applications.. *Carbohydrate Polymers*, v. 136, p. 1379-1385, 2016.
- LUFRANO, E. *et al.* How the Morphology of Nafion-Based Membranes Affects Proton Transport. *Polymer*, v. 13, n. 359, 2021.

LUPATINI, K. N. *et al.* Development of Chitosan Membranes as a Potential PEMFC Electrolyte. *Journal of Polymes and the Environment*, p. 2964-2972, 2018.

ODEH, A.; OSIFO, P.; NOEMAGUS, H. W. J. P. A Comparative Study of the Processing Scheme of Chitosan and Nafion 117 in Membrane Electrode Assembly. *Petroleum Science and Technology*, v. 31, p. 121-128, 2013b.

OGUNGBEMI, E. *et al.* Fuel Cell Membranes - Pros and Cons. *Energy*, 2019.

PAGANIN, V. A. *et al.* Modelistic interpretation of the impedance response of a polymer electrolyte fuel cell. *Electrochimica Acta*, v. 43, p. 3761-3766, 1998.

PECKHAM, T. J.; HOLDCROFT, S. Structure-Morphology-Property Relationships of Non-Perfluorinated Proton-Conducting Membranes. , 22(42), 4667–4690. *Advanced Materials*, v. 22, n. 42, p. 4667-4690, Nov 2010.

RICO-ZAVALA, A. *et al.* Organic composite membrane for hydrogen electrochemical conversion devices. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 56, p. 32493-32507, Nov 2020.

SMITHA, B.; ANJALI DEVI, D.; SRIDHAR, S. Proton-conducting composite membranes of chitosan and sulfonated polysulfone for fuel cell application. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, p. 4138-4146, 2008.

VICENTINI, D. S. Efeito da incorporação de peneiras moleculares, poli (vinil álcool), montmorilonitas e dióxido de titânio membranas de quitosana. Tese (Doutorado) - UFSC. Florianópolis. 2009.

WANG, Y. *et al.* Materials, technological status and fundamentals of PEM Fuel Cells - A review. *Material Today*, v. 32, p. 178-203, 2020.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Itaipu Binacional e ao Parque Tecnológico Itaipu pelos recursos investidos.

Fatores Ambientais, econômicos e gerenciais associados à falhas em motores elétricos: uma revisão sistemática

Environmental, economic and managerial factors associated with faults in electric motors: a systematic review

Narco Afonso Ravazzoli Maciejewski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Curitiba

<http://lattes.cnpq.br/9214991739582650>

Renata Pessi

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC/PR) campus Curitiba

<http://lattes.cnpq.br/5378133314464466>

RESUMO

As máquinas elétricas rotativas são os principais elementos de conversão eletromecânica de energia em muitos dos seguimentos industriais. Dentre essas máquinas as de indução são as mais aplicáveis visto o atrativo custo de ciclo de vida, a robustez operativa e as atuais alternativas para acionamento e controle disponíveis comercialmente. No contexto preconizado pelos paradigmas da Indústria 4.0 a importância de uma atuação antecipada, em substituição parcial das ações preventivas e corretivas, é força motriz para o desenvolvimento de abordagens de sistemas capazes de identificar falhas intrínsecas à máquina. Nesse contexto, os aspectos ambientais, econômicos e gerenciais de uma organização são fundamentalmente correlacionados com o estado de falha dessas máquinas. Frente a isso, utilizando-se da metodologia de revisão sistemática da literatura, foi possível identificar as tendências em pesquisas e as lacunas no estado da arte acerca da temática de fatores ambientais, econômicos e gerenciais associados a ocorrência e detecção de falhas em motores elétricos. Com isso, foi possível identificar uma sazonalidade nas publicações científicas especializadas sobre essa área do conhecimento, e também a baixa prioridade observada quanto aos aspectos ambientais envolvidos nos ambientes industriais quando na ocorrência de falhas em máquinas elétricas. Desse modo, foi possível reconhecer a escassez de pesquisas sobre o tema de sustentabilidade nos ambientes industrial produtivo e relacionar o desempenho na detecção de falhas com a eficiência energética geral de uma planta produtiva. Esses fatos mostram que é fundamental



investimentos e esforços para a adequação das técnicas e das instituições sobre o contexto de energia e sustentabilidade.

Palavras-chave: Indústria 4.0. inteligência artificial. sustentabilidade. eficiência energética.

ABSTRACT

Rotating electrical machines are the main elements of electromechanical energy conversion in many industrial segments. Among these machines, induction machines are the most applicable due to their attractive life cycle cost, operational robustness and the current alternatives for activation and control available commercially. In the context advocated by Industry 4.0 paradigms, the importance of early action, in partial replacement of preventive and corrective actions, is the driving force for the development of systems approaches capable of identifying faults intrinsic to the machine. In this context, environmental, economic and managerial aspects of an organization are fundamentally correlated with the state of fault of these machines. In view of this, using the systematic literature review methodology, it was possible to identify trends in research and gaps in the state of the art on the subject of environmental, economic and managerial factors associated with the occurrence and detection of faults in electric motors. With this, it was possible to identify a seasonality in specialized scientific publications on this area of knowledge, and also the low priority observed regarding the environmental aspects involved in industrial environments when faults occur in electrical machines. In this way, it was possible to recognize the scarcity of research on the subject of sustainability in productive industrial environments and to relate the performance in detecting faults with the general energy efficiency of a productive plant. These facts show that investments and efforts are essential for adapting techniques and institutions in the context of energy and sustainability.

Keywords: Industry 4.0. artificial intelligence. sustainability. energy efficiency.

INTRODUÇÃO

A necessidade crescente de busca por processos mais racionais e econômicos no que tange à utilização eficiente da energia elétrica tem implicado na realização de estudos detalhados para a otimização das técnicas de manufatura, os quais visam também a adequada conservação da energia elétrica. Dentro deste contexto, os motores elétricos recebem destaque como equipamentos indispensáveis na maioria dos processos que envolvem os setores produtivos, pois os mesmos são os principais elementos de conversão eletromecânica de energia. Como consequência, essas máquinas elétricas são constantemente otimizadas de forma a atenderem as necessidades emergentes dos processos produtivos.

Grande parte das aplicações industriais que necessitam de conversão eletromecânica de energia utiliza motores de indução. Essa predileção é assim por inúmeros atributos como o baixo custo associado aos mesmos, a longa durabilidade e as formas de acionamento. Além disso, a crescente necessidade dos setores produtivos frente à manutenção preventiva e preditiva que visam à redução de custo de manutenção, minimização de impactos gerados por desligamentos não planejados de linhas de produção e até mesmo inibição de riscos de acidentes de trabalho, torna-se extremamente relevante e motivador o desenvolvimento de sistemas capazes de identificar as falhas inerentes à máquina.

Os motores elétricos estão expostos a uma variedade de condições ambientais, operando sob diversos tipos de cargas, os quais em conjunto com o envelhecimento natural podem ocasionar falhas inerentes às próprias máquinas ou associadas às condições severas. Neste contexto, o monitoramento a fim de detectar as falhas em seus estágios iniciais é de suma importância para tratá-las adequadamente, evitando danos e, conseqüentemente, reduzindo o custo de manutenção, o custo de estoque de peças e o desligamento do setor industrial no qual as máquinas estão inseridas.

Os métodos e protocolos empregados para o diagnóstico e proteção de falhas são tão antigos quanto as próprias máquinas. Quanto às aplicações em máquinas elétricas rotativas, inicialmente, os fabricantes contavam com proteções simples, como sobrecorrente e sobretensão, com o intuito de garantir segurança e confiabilidade na operação. No entanto, como as funções das máquinas rotativas foram se tornando cada vez mais complexas, as melhorias nas áreas de diagnóstico e de monitoramento de falhas são cada vez mais necessárias. Frente a isso, além do monitoramento da saúde das máquinas elétricas rotativas é fundamental o acompanhamento das falhas desde o início, visando reduzir os custos de máquinas e de operadores parados e otimizando as funções de manutenção e evitando perdas financeiras.

Há diversas falhas que podem prejudicar a função requerida de máquinas elétricas rotativas, sendo as principais listadas (STRANGAS *et al.*, 2002):

- a) Falhas no estator resultando na abertura ou curto circuito de um ou mais enrolamento de fase do estator;
- b) Conexões anormais dos enrolamentos do estator;
- c) Barra do rotor quebrada ou terminais do rotor trincados;
- d) Irregularidades estáticas e/ou dinâmicas da abertura de ar;
- e) Atrito entre o estator e o rotor (excentricidade) causando problemas ao núcleo do estator e aos enrolamentos;
- f) Enrolamento em campo do rotor em curto;
- g) Falhas nos rolamentos e na caixa de engrenagens.

Das falhas apresentadas as hegemônicas são as no rolamento, no estator ou na armadura, nas barras do rotor e às relacionadas a excentricidade, sendo as que necessitam de maior atenção. Esses tipos de falhas apresentam diversos sintomas, sendo prevalentes as tensões da abertura de ar desequilibrada e correntes de linha, aumento do torque intermitente, diminuição do torque médio, redução de eficiência e aquecimento excessivo.

Com a finalidade de monitorar e detectar falhas em máquinas elétricas rotativas, muitos métodos foram desenvolvidos até o momento, nos mais diversos campos da ciência. Desta maneira, este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de estabelecer o estado da arte acerca do tema de detecção e diagnóstico de falhas em máquinas elétricas rotativas e suas conseqüências ambientais, econômicas e gerenciais. Os aspectos ambientais, econômicos e gerenciais envolvidos no processo produtivo podem

ser uma consequência de determinada falha ou também prover fundamentos para solução de problemas. O campo dessa pesquisa é amplo em termos de perspectivas técnicas, como ferramentas de detecção de falhas, e sua relação com os fatores econômicos e ambientais é de fundamental importância para o entendimento dos panoramas da sustentabilidade e eficiência energética.

Primeiramente, será apresentado os aspectos técnicos relativos as falhas em máquinas elétricas e as técnicas de detecção comumente usadas. Em seguida, será estabelecido a metodologia de revisão sistemática empregada e seus resultados, denominado meta - análise da literatura. Desse modo, ficará claro as lacunas no estado da arte acerca desta temática com recomendações para pesquisas futuras.

TIPOS DE FALHAS E TÉCNICAS DE DETECÇÃO

A falha total em um motor elétrico pode ser classificada por sua condição interna ou externa. As falhas podem ser classificadas como falhas mecânicas, elétricas ou relativas ao meio, de acordo com sua origem.

Desse modo, várias técnicas de detecção de falhas foram desenvolvidas no diagnóstico de sinais relacionados a falhas. Esses métodos incluem os seguintes campos da ciência e da tecnologia:

- a) Monitoramento do campo eletromagnético, bobinas enroladas nos eixos do motor (detecção relacionada ao fluxo axial) e bobinas de busca;
- b) Reconhecimento infravermelho;
- c) Medições de temperatura;
- d) Análise química;
- e) Monitoramento de emissões de radiofrequência (RF);
- f) Monitoramento de ruído e vibração;
- g) Medições de ruído acústico;
- h) Análise de assinatura de corrente do motor (MCSA);
- i) Modelagem e sistemas inteligentes.

Com base no exposto, em seguida é apresentado uma descrição das falhas que necessitam de maior atenção na operação de máquinas elétricas rotativas e as técnicas de detecção.

Falhas nos rolamentos

Normalmente, um rolamento é composto por dois anéis concêntricos, com um conjunto de roletes ou esferas nas pistas entre o anel interno e o anel externo. As falhas do rolamento podem ser classificadas como distribuídas ou locais (PARTHA; PRADHAN; PRAKASH, 2013). As falhas distribuídas incluem ondulação, superfície rugosa, corpos

rolantes fora do tamanho e pistas desalinhadas. As falhas localizadas abrangem poços, lascas e rachaduras nas superfícies rolantes. Quando um rolete em movimento passa sobre a superfície da falha, ele gera uma série de impactos de vibração naquele mesmo instante. O período e a amplitude do impacto são calculados pela posição da anomalia, velocidade e dimensão do rolamento. As vibrações mecânicas estão na velocidade de rotação de cada componente e são produzidas pelos rolamentos defeituosos. As frequências características associadas às pistas e às esferas ou rolos são determinadas pela velocidade de rotação e dimensão do rolamento da máquina e também determina a condição do rolamento usando técnicas de análise de vibração mecânica (SHAOTANG; LIPO, 1998).

Falhas no estator

A maioria das falhas do estator de um motor elétrico de indução está sujeita a várias condições operacionais estressantes, como ambientais, elétricas, térmicas e mecânicas. As falhas no enrolamento do estator, nomeadamente circuito aberto, curva a curva, fase a fase, bobina a bobina e bobina a terra, são as falhas mais frequentes e potencialmente desastrosas. Se o diagnóstico oportuno não for feito, poderá causar uma terrível falha motora. As três principais divisões das falhas do estator são as seguintes:

- a) Carcaça: inclui vibração, correntes circulantes, faltas à terra e perda de refrigerantes;
- b) Laminação: inclui afrouxamento do núcleo e hot spot do núcleo;
- c) Falha nos enrolamentos do estator: inclui a parte do enrolamento final (desgaste do isolamento, falhas entre turnos, danos locais ao isolamento, erosão por descarga do isolamento, óleo ou sujeira, danos aos conectores, contaminação do isolamento por umidade, deslocamento de condutores, rachaduras do isolamento e assim por diante) e parte da ranhura que inclui deslocamento de condutores, desgaste por isolamento.

Os autores Duan e Zivanovic (2012) apresentam uma técnica exclusiva de estimativa de parâmetros para a detecção da condição de falha de curto-circuito no enrolamento do estator em motores de indução. Falhas no motor de indução perturbam o equilíbrio elétrico e levam a alterações de alguns parâmetros elétricos, chamados parâmetros de falha. Portanto, monitorando esses parâmetros de falha, as falhas do motor podem ser detectadas. A detecção de falha do estator é obtida através da manipulação dos parâmetros de falha das leituras de tensões e correntes no terminal da fonte de alimentação da máquina (DUAN; ZIVANOVIC, 2013). Os métodos de pesquisa local (descida em gradiente e mínimos quadrados não lineares) e global (pesquisa de padrões) são aplicados no método de estimativa de parâmetros.

Para detectar falhas no enrolamento do estator em motores síncronos e assíncronos trifásicos, é introduzido um novo método baseado na análise espectral do módulo vetorial (CRUZ; CARDOSO, 2001). Para máquinas de indução, Babu *et al.* (2022) introduziu um sistema de detecção de falhas *on-line* com a fusão de técnicas de transformada de Wavelet discreta, algoritmo genético, extração de características e redes de redes neurais. As características do sinal de corrente do estator são extraídas do motor elétrico por meio de transformações de Wavelet discreta e técnicas de extração de características.

A tecnologia MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) pode ser aplicada ao monitoramento de um motor de indução. Este método é amplamente utilizado nas máquinas industriais pesadas, pois fornece uma solução, altamente sensível e econômica para o monitoramento *on-line*. Este método também foi usado para melhorar a avaliação de falhas nos mancais do motor durante a operação da planta. A tecnologia MCSA pode ser usada em conjunto com a técnica de análise do circuito do motor para fornecer o monitoramento completo da integridade do circuito do motor. O resultado do MCSA fornece uma visão completa da integridade do sistema motor (KRISHNA; KISHAN, 2013). Bouzid *et al.* (2008) propuseram a análise de assinatura de corrente do motor com técnica avançada de algoritmos de processamento de sinais e dados para o diagnóstico *on-line* de um motor de indução.

Falhas no rotor

As falhas do rotor são falhas elétricas relacionadas a um defeito da barra ou quebra da barra ou falhas mecânicas, como falha do rolamento. Em motores grandes, durante operações transitórias de partida, o defeito da barra se desenvolve a partir de tensões térmicas, pontos quentes ou tensões de fadiga. O torque é alterado notavelmente por uma barra quebrada e se torna prejudicial ao funcionamento e segurança constantes das máquinas elétricas. A excentricidade da folga de ar é outro tipo de falha do rotor nos motores de indução, que é comumente relacionada a uma série de problemas mecânicos, como desalinhamento do eixo ou desequilíbrio de carga. Desequilíbrio de carga a longo prazo pode afetar a simetria da folga de ar, danificar os mancais e a carcaça do mancal. O desalinhamento do eixo entre um eixo e a carga acoplada pode ser vertical, horizontal ou radial. Com esses desalinhamentos, devido à força radial constante, o rotor será distorcido da sua posição original.

A falha de barras quebradas do rotor usando a análise Wavelet pode ser detectada pela decomposição da corrente transitória (SINGH; SHAIK, 2019). Quanto ao desempenho da detecção de falhas, maior precisão é obtida pelo processamento de múltiplas assinaturas, em vez do processamento de assinaturas únicas (AYHAN; CHOW; SONG, 2005). Além disso, o processamento de múltiplas assinaturas possui dois esquemas para detecção de falhas. Um é monólito e o outro é partição. A análise de elementos finitos, útil na determinação dos efeitos das barras quebradas, demonstra o desempenho do motor na condição de falha (LAHOUSNIA; RACHEDI; DEGHOUDJ, 2019). À medida que o número de barras quebradas aumenta, a falha degrada progressivamente a característica de frequência de escorregamento de torque no estado estacionário. O harmônico induzido pelo torque da carga coincide com os harmônicos induzidos pela falha do rotor quando a posição do rotor varia a carga de forma síncrona (SCHOEN; HABETLER, 1993)

Falhas de excentricidade

A excentricidade da folga de ar é o resultado da folga desigual entre o rotor e o estator do motor de indução. Seus dois tipos são a excentricidade estática do espaço aéreo e a excentricidade dinâmica do espaço aéreo. A excentricidade mista é uma combinação de excentricidade estática e dinâmica do espaço aéreo e a excentricidade inclinada do espaço aéreo é a não uniformidade axial do espaço aéreo. O comprimento mínimo do espaço

aéreo radial é fixado no espaço para excentricidade estática do espaço aéreo, enquanto o centro do rotor e o centro de rotação nunca coincidem na dinâmica excentricidade. Durante o comissionamento do motor de indução, um posicionamento incorreto do estator ou rotor pode resultar em excentricidade estática. A excentricidade dinâmica ocorre devido ao desgaste do rolamento, dobra no eixo ou ressonâncias mecânicas em velocidades críticas.

Como sugerido por Cardoso e Saraiva (1992), além do monitoramento auxiliado por computador com o vetor de corrente do estator, a falha de excentricidade estática do intervalo de ar pode ser detectada. Ao observar o padrão de corrente vetorial dividido, o autor obteve as informações sobre a gravidade da falha. A partir da simulação do motor de indução da gaiola de esquilo, a excentricidade estática e dinâmica da folga de ar é baseada na teoria da função de enrolamento e estendida para o caso de folga de ar não uniforme. A falha de excentricidade do espaço de ar em um motor de indução pode ser simulada usando a abordagem de circuito magnético acoplado (BOROUJENI; TAKORABET; MEZANI, 2020).

Falhas de vibração

A oscilação nas partes mecânicas dos motores é conhecida como vibração e pode ser observada no sistema externo conectado ao eixo da máquina. Um espectro de frequência exclusivo relacionado à máquina é gerado para um motor normal que muda com cada falha do motor e pode ser comparado com o espectro de referência para realizar a detecção e o diagnóstico de falhas.

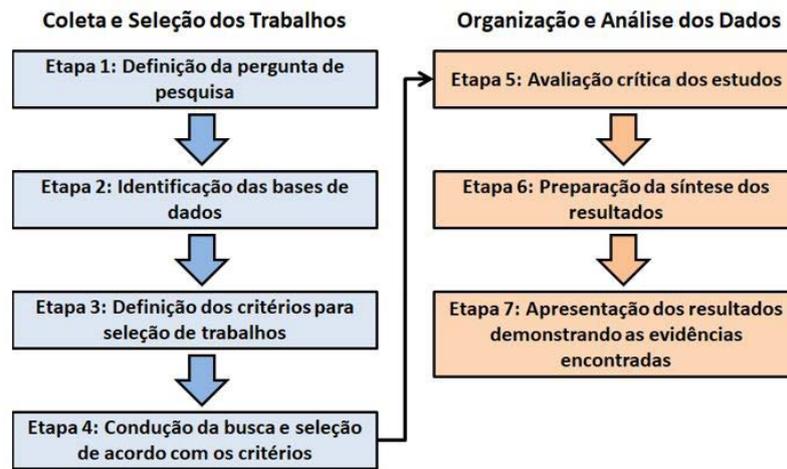
A combinação de vibrações torcionais nos sistemas de acionamento de motores de indução e a inevitável excentricidade do rotor da máquina podem levar a oscilações laterais inadmissíveis desse rotor. A influência das vibrações torcionais de maneira analítica e usando técnicas de simulação digital como sugerido por Belmans; Vandenput e Geysen (1985).

MÉTODO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura é um método rigoroso e replicável para se atingir os indícios relevantes para uma questão de pesquisa específica (KITCHENHAM; CHARTERS, 2007). Esse método de pesquisa, surgiu, inicialmente, em áreas relacionadas à saúde, no entanto, atualmente existem condutas e usos em outras áreas. Nas engenharias e nas ciências exatas, podem ser encontradas várias aplicações nas mais diversas linhas de pesquisa, incluindo revisões sistemáticas que investigam outras revisões sistemáticas (KUMAR; HATI, 2021).

Na Figura 1 são apresentadas as etapas metodológicas da revisão sistemática da literatura aplicada.

Figura 1 - Etapas da revisão sistemática utilizada neste trabalho.



Fonte: (MACIEJEWSKI; TREML; FLAUZINO, 2020)

O período de busca empregado na revisão sistemática foi entre os meses de janeiro de 2018 até junho de 2023, sendo as buscas com enfoque em artigos de periódicos especializados. Esse processo de busca, de seleção e de análise dos trabalhos encontrados foi e pode ser realizado de modo cronológico com possibilidades de realimentação a cada nova interação das etapas. Sob a concepção metodológica da revisão sistemática da literatura, foi proposto, com base nos objetivos desse trabalho, como questão de busca (Etapa 1): “Quais as influências ambientais, econômicas e de gestão associadas e geradas devido às falhas em motores elétricos e técnicas de detecção?”.

A identificação das bases de dados que delinearão as buscas (Etapa 2) foi realizada reunindo as principais bases utilizadas em pesquisas na área das engenharias e das ciências exatas, representadas por *IEEEExplore*, *Scopus*, *Web of Science*, *Scielo*, *Wiley* e *CiteSeer*. A Etapa 3 foi definida como a etapa da determinação dos critérios de inclusão e de exclusão de trabalhos para posterior análise e para formarem a meta análise da literatura relacionada. Os critérios de seleção de artigos foram construídos em modalidades de perguntas para afunilar a escolha dos trabalhos de interesse, e estão evidenciados a seguir:

- a) O trabalho apresenta relação com a questão de pesquisa?
- b) O trabalho possui relação com implementação de sistemas, aplicativos ou ferramentas para análise e o monitoramento de falhas em máquinas elétricas?
- c) O método do trabalho é realizado com base em experimentos, simulações, observações ou análises matemáticas?
- d) O trabalho é acessível institucionalmente?
- e) O trabalho não é repetido nas bases de dados buscadas?
- f) O trabalho é redigido na língua portuguesa, espanhola ou inglesa?

Vale ressaltar que esses critérios são de inclusão de trabalhos para análise crítica, e, se porventura algum desses critérios forem negados, o artigo deve ser excluído. Assim, finalizando a parte de coleta e de seleção de artigos, iniciou-se a busca e a seleção dos artigos (Etapa 4) de acordo com os critérios determinados na Etapa 3. Para isso, foram

definidas palavras-chave ou palavras similares relacionadas ao tema para construção de uma *string* de busca. Com isso, a *string* identificada é então apresentada para a inserção nas bases de busca, contemplando cada uma das palavras-chave relacionadas no Quadro 1, de acordo com seu tipo. Vale ressaltar que as buscas são realizadas com operadores lógicos relacionando cada palavra-chave e seus sinônimos e plurais.

Quadro 1 - Estrutura dos tipos de palavras-chave, em língua inglesa, utilizadas nas buscas.

Objeto de estudo	Falhas	Fatores de análise
<i>Asynchronous machine</i>	<i>Bearing</i>	<i>Environmental</i>
<i>Induction motors</i>	<i>Stator</i>	<i>Economy</i>
<i>Electric machine</i>	<i>Broken rotor bar</i>	<i>Management</i>
	<i>Eccentricity</i>	<i>Maintenance</i>
	<i>Hybrid</i>	<i>Reliability</i>

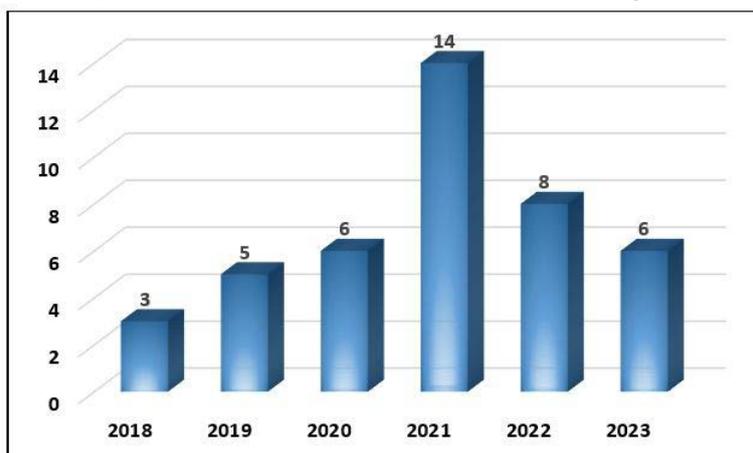
Fonte: Autoria própria (2023)

Depois da construção da *string* e dos critérios de seleção, iniciou-se a busca em cada uma das bases de dados selecionadas e os atributos adquiridos da busca eram inseridos em uma planilha eletrônica. Após o período de busca, no primeiro momento é realizada a segunda parte da revisão, ou seja, a seleção e a organização dos trabalhos coletados, que são apresentados na seção subsequente.

META - ANÁLISE DA LITERATURA

Com a aplicação do processo de busca sistemático da literatura, foram identificadas 363 publicações, tendo esse número reduzido para 129 após a aplicação dos critérios de inclusão. Em seguida, foi realizada a leitura do título e resumo de todos os trabalhos apurados para efetivar a seleção dos trabalhos. Quando a seleção não pode ser concretizada incontestavelmente, considerou-se a leitura do trabalho completo, até que não restassem dúvidas sobre a relevância do trabalho. Ao final desse processo, obtiveram-se 42 publicações das quais foram extraídas informações para responder à questão de pesquisa.

Na Figura 2 é exibido um gráfico de barras contendo a distribuição, por ano de publicação, do número de trabalhos selecionados ao término da revisão sistemática da literatura. No gráfico é apresentado que do ano de 2018 até 2021, houve um crescente interesse pelo tema, sendo o ano de 2021 o auge de trabalhos selecionados por meio da revisão sistemática empregada. Esse fato é justificado pelo advento, aplicação e financiamento dos preceitos da Indústria 4.0 no setor produtivo, e também explicado devido à consolidação do interesse pelo tema pesquisado, principalmente nas aplicações de sistemas inteligentes para detecção de falhas em máquinas elétricas. Após o ano de 2021 foi observado uma queda nos trabalhos sobre essa temática, que pode ter sido culminada pela pandemia enfrentado pelo mundo nesse período, reduzindo o número de investimentos no setor produtivo industrial. Nesse sentido, tendo em vista as lacunas no estado da arte nessa área de conhecimento e a redução de publicações qualificadas, torna-se fundamental pesquisas e projetos acerca dos fatores ambientais, econômicos e gerenciais envolvidos na ocorrência de falhas em máquinas elétricas.

Figura 2 - Distribuição do número de trabalhos selecionados por ano de publicação.

Fonte: Autoria própria (2023)

A análise dos 42 trabalhos descobertos na revisão sistemática permitiu implementar a seguinte meta - análise, seguindo as Etapas 5, 6 e 7 do método:

a) Aspectos ambientais: Os aspectos ambientais envolvidos no processo produtivo sob o contexto de falha, foram levantados em 7 publicações selecionadas. O apelo desses trabalhos se concentrou na análise do descarte de componentes e resíduos, conformidade com as regulamentações ambientais, avaliação do ciclo de vida, sustentabilidade e responsabilidade corporativa;

b) Aspectos econômicas: As análises e ações econômicas decorrente de falhas de máquinas elétricas foram tratadas em 33 publicações. Dentre os aspectos analisados, os de destaque foram análises de custos de manutenção e reparo, avaliação de risco econômico, perda de produção, custo de mão de obra, atrasos na entrega, qualidade, reputação, custos de oportunidade, custos de logística e impacto em contratos e acordos;

c) Aspectos gerenciais: Quanto as ações e consequências de natureza gerencial encontradas nos trabalhos selecionados, 61,90% dos trabalhos analisaram ferramentas para manutenção preditiva, 30,95% empregaram sistematização da manutenção preventiva e 26,19% usaram ferramentas para quantificar o custo total de manutenção corretiva. Em 95,24% dos trabalhos selecionados foram abordadas questões referentes a administração e gerência de plantas produtivas devido a ocorrência de falhas em máquinas elétricas, dentre as análises realizadas as mais comuns foram o impacto na produção e operação, custos de manutenção e reparo, tempo de paralisação, confiabilidade e disponibilidade, impactos na cadeia de suprimentos, saúde e segurança dos trabalhadores, eficiência energética, avaliação de risco e tomada de decisão, e análises de causa raiz. A grande maioria dos trabalhos apresentaram apelos e ferramentas oriundas da engenharia de produção e de manutenção;

d) Métodos de detecção de falhas: Considerando a frequência com que os métodos apareceram nas publicações, 54,76% dos trabalhos empregaram a técnica MCSA, 47,61% empregaram Redes Neurais Artificiais (ANN), 45,24% construíram modelos Autorregressivos Integrados de Médias Móveis (ARIMA) ou Autorregressivos

Integrados de Médias Móveis Sazonal (SARIMA), 14,29% usaram modelos híbridos, 21,43% aplicaram Máquinas de Suporte Vetorial (SVM), 7,14% executaram variações do algoritmo k-Vizinhos mais Próximos (kNN), 9,52% usufruíram dos métodos de Médias Móveis (MA) e de Suavização Exponencial Simples (SES), 4,76% abordaram técnicas bayesianas e 4,76% recorreram aos modelos de Holt-Winters (HW);

e) Medidas de avaliação de desempenho: Observando a frequência com que as medidas foram usadas nas publicações, 21,43% dos trabalhos adotaram o Erro Absoluto Médio (MAE), 26,19% avaliaram a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), 35,71% verificaram o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), 26,19% analisaram o Erro Percentual Absoluto Médio Simétrico (SMAPE), 26,19% utilizaram o Erro Quadrático Médio (MSE), 7,14% abordaram o Erro Médio Absoluto em Escala (MASE), 2,38% recorreram ao Coeficiente de Correlação (R) e 4,76% aplicaram o Erro Absoluto Relativo (RAE). As medidas U de Theil (U-Theil), Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado (NRMSE) e o Coeficiente de Determinação (R²) apareceram em 11,90% das publicações;

f) Conjuntos de dados reais: O uso de conjuntos de dados reais esteve presente em 36 publicações, das quais 83,33% utilizaram dados produzidos em instituições, empresas ou indústrias e 16,67% investigaram dados mantidos em repositórios;

g) Conjuntos de dados sintéticos: 14,29% dos trabalhos selecionados construíram conjuntos de dados sintéticos para avaliar o desempenho das abordagens aplicadas. Esses conjuntos de dados foram gerados computacionalmente para conter propriedades específicas, como a presença ou ausência de tendência e/ou sazonalidade;

h) Estudo de caso: De acordo com a frequência com as quais os trabalhos selecionados tiveram abordagens aplicadas, 76,20% realizaram estudos de casos reais, permitindo auxílio na tomada de decisão. 62,50% desses trabalhos tinham a finalidade de atuar nas engenharias, 25,00% tinha atuação nas áreas de informática e ciência da computação e 12,50% possuía aplicações nas áreas sócio econômicas;

i) Ferramentas empregadas: Entre os ambientes computacionais usados nas publicações estão Matlab, R, Minitab, Weka, Statistica e Python.

Com a meta - análise dos trabalhos selecionados observa-se que a grande maioria dos métodos empregados para detecção de padrões em dados temporais vem utilizando sistemas inteligentes ou híbridos. Em específico, o uso de MCSA e ANN vem crescendo como integrador desses sistemas de detecção, com o auxílio de técnicas clássicas, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Desse modo, pode-se prever que os próximos trabalhos que contemplem o estado da arte desse tema seja envolvendo essas técnicas de inteligência artificial. Assim, pode-se propor e testar técnicas híbridas com relação às expostas nesse trabalho para a construção de um método completo e robusto.

Durante a execução da meta - análise verificou-se alguns trabalhos, do total de 42, que envolviam avaliações e métodos mais populares e com melhores resultados. Frente a isso, esses trabalhos são fundamentais para compor o estado da arte do tema dessa

pesquisa e possibilita um caminho para a proposição de novos métodos para monitoramento e detecção de falhas em máquinas elétricas rotativas, baseado em sistemas inteligentes.

Nesse sentido, quanto aos aspectos ambientais oriundos e de importância perante a falhas em máquinas elétricas, observou-se que é pouco explorado em pesquisas. Esse fato pode estar aliado a longa durabilidade das máquinas elétricas e o baixo custo relativo associado a ela. No entanto, essa lacuna no estado da arte é de fundamental importância, pois os motores de indução são os equipamentos de conversão de energia elétrica em mecânica mais utilizados no mundo. Por meio da leitura dos trabalhos relacionados, foram identificadas poucas menções em reciclagem desses equipamentos ou reparos após uma falha catastrófica. Assim, essa área de pesquisa, aliada aos fatores econômicos pode trazer grandes avanços, não só com fins financeiros, mas também nas ferramentas e técnicas de detecção e diagnóstico de falhas.

Com relação às questões de nível gerencial de plantas produtivas que empregam máquinas elétricas, os avanços em pesquisas de monitoramento se mostraram avançados, com relação a área econômica e ambiental. Pesquisas envolvendo técnicas de manutenção preditiva aliados a ferramentas de inteligência artificial e sistemas supervisórios estão em uso corrente pela indústria. Essa constatação se torna clara ao se analisar a quantidade de trabalhos encontrados que fazem menção a essas técnicas para a então elaboração dos planos de operação e manutenção preventiva.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi apresentado uma revisão sobre as falhas existentes em motores elétricos, técnicas de detecção e monitoramento, e identificação dos fatores ambientais, econômicos e gerenciais relacionados às falhas. Com a aplicação do método da revisão sistemática da literatura, foi possível deslumbrar do estado da arte referente à questão de pesquisa e a capacidade de propor novos métodos. A partir dos trabalhos selecionados para compor a revisão, a técnica de diagnóstico de falha que mais apareceu foi a MCSA. Essa técnica se mostrou como tradicional no ambiente industrial, seja a nível de gerência ou de equipamentos.

Em âmbito geral, sobre a revisão sistemática da literatura, observou-se algumas lacunas no estado da arte referente a questão de pesquisa. Em primeiro lugar, foi constatado uma queda em publicações especializadas, que ainda não foi retomada. Nesse sentido, há grandes oportunidades para inovações e estudos inéditos acerca dessa temática. Por meio da meta - análise da literatura, notou-se que a tendência para as pesquisas futuras é ambientada em fundamentos de inteligência artificial e sistemas inteligentes. Ainda, há grandes lacunas quanto aos aspectos econômicos e ambientais, principalmente, quando relacionados as falhas em máquinas elétricas. Por fim, esse texto possuiu o intuito de tornar compreensível a área de conhecimento, e, sobretudo, motivar pesquisadores para as questões relativas à eficiência energética e sustentabilidade, fatores cada vez mais fundamentais para o futuro do ambiente industrial produtivo.

REFERÊNCIAS

- AYHAN, Bulent; CHOW, Mo Yuen; SONG, Myung Hyun. Multiple signature processing-based fault detection schemes for broken rotor bar in induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 336–343, 2005. DOI: 10.1109/TEC.2004.842393.
- BABU, Eldho; FRANCIS, Jebin; THOMAS, Esther; CHERIAN, Rahul; SUNANDHAN, Sudarsana S. Review on Various Signal Processing Techniques for Predictive Maintenance. In: 2022 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS & IOT APPLICATIONS IN RENEWABLE ENERGY AND ITS CONTROL (PARC) 2022, Anais [...]. : IEEE, 2022. p. 1–8. DOI: 10.1109/PARC52418.2022.9726618. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9726618/>.
- BELMANS, R.; VANDENPUT, A.; GEYSEN, W. Influence of Torsional Vibrations on Lateral Oscillations of Induction Motor Rotors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, [S. l.], v. PAS-104, n. 7, p. 1832–1837, 1985. DOI: 10.1109/TPAS.1985.319220. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4113307/>.
- BOROJENI, S. Tahipour; TAKORABET, N.; MEZANI, S. Dynamic Simulation of Unbalanced Magnetic Force in Induction Machines with Static Eccentricity. In: 2020 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES (ICEM) 2020, Anais [...]. : IEEE, 2020. p. 151–156. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9271055. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9271055/>.
- BOUZID, M.; CHAMPENOIS, G.; BELLAAJ, N. M.; SIGNAC, L.; JELASSI, K. An Effective Neural Approach for the Automatic Location of Stator Interturn Faults in Induction Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, [S. l.], v. 55, n. 12, p. 4277–4289, 2008. DOI: 10.1109/TIE.2008.2004667. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4663958/>.
- CARDOSO, A. J. Marque.; SARAIVA, E. S. Computer aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors, by Park's vector approach. In: CONFERENCE RECORD OF THE 1991 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING 1992, Anais [...]. : IEEE, 1992. p. 94–98. DOI: 10.1109/ias.1991.178138. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/178138/>.
- CRUZ, S. M. A.; CARDOSO, A. J. M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, [S. l.], v. 37, n. 5, p. 1227–1233, 2001. DOI: 10.1109/28.952496. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/952496/>.
- DUAN, F.; ZIVANOVIC, R. Diagnosis of induction machine stator faults by parameter estimation technique based on direct search on sparse grid. In: 9TH IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT (APSCOM 2012) 2012, Anais [...]. : Institution of Engineering and Technology, 2012. p. 127–127. DOI: 10.1049/cp.2012.2150. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2012.2150>.
- DUAN, Fang; ZIVANOVIC, Rastko. Induction motor stator faults diagnosis by using parameter estimation algorithms. In: 2013 9TH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIAGNOSTICS FOR ELECTRIC MACHINES, POWER ELECTRONICS AND DRIVES (SDEMPED) 2013, Anais [...]. : IEEE, 2013. p. 274–280. DOI: 10.1109/DEMPED.2013.6645728. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6645728/>.

KITCHENHAM, BARBARA ANN AND CHARTERS, Stuart. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering Technical report, Ver. 2.3 EBSE Technical Report. EBSE. [s.l.: s.n.].

KRISHNA, Merugu Siva Rama; KISHAN, Srikonda Hari. Neural network for the diagnosis of rotor broken faults of induction motors using MCSA. In: 2013 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS AND CONTROL (ISCO) 2013, Anais [...]. : IEEE, 2013. p. 133–137. DOI: 10.1109/ISCO.2013.6481136. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6481136/>.

KUMAR, Prashant; HATI, Ananda Shankar. Review on Machine Learning Algorithm Based Fault Detection in Induction Motors. Archives of Computational Methods in Engineering, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 1929–1940, 2021. DOI: 10.1007/s11831-020-09446-w. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11831-020-09446-w>.

LAHOUEASNIA, Nasreddine; RACHEDI, Mohamed Faouzi; DEGHBODJ, Thamer. Detection of Broken Rotor Bar Defect in Squirrel Cage Induction Machine. In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ELECTRICAL ENGINEERING (ICAEE) 2019, Anais [...]. : IEEE, 2019. p. 1–5. DOI: 10.1109/ICAEE47123.2019.9015159. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9015159/>.

MACIEJEWSKI, Narco Afonso Ravazzoli; TREML, Aline Elly; FLAUZINO, Rogerio Andrade. A Systematic Review of Fault Detection and Diagnosis Methods for Induction Motors. Proceeding - 1st FORTEI-International Conference on Electrical Engineering, FORTEI-ICEE 2020, [S. l.], p. 86–90, 2020. DOI: 10.1109/FORTEI-ICEE50915.2020.9249890.

PARTHA SARATHEE BHOWMIK; PRADHAN, Sourav; PRAKASH, Mangal. Fault Diagnostic and Monitoring Methods of Induction Motor: A Review. In: IJACEEE 2013, Anais [...]. [s.l.: s.n.]

SCHOEN, Randy R.; HABETLER, Thomas G. Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines. In: CONFERENCE RECORD - IAS ANNUAL MEETING (IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY) 1993, Anais [...]. : IEEE, 1993. p. 324–330. DOI: 10.1109/ias.1993.298943. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/298943/>.

SHAOTANG CHEN; LIPO, T. A. Bearing currents and shaft voltages of an induction motor under hard- and soft-switching inverter excitation. IEEE Transactions on Industry Applications, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 1042–1048, 1998. DOI: 10.1109/28.720444. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/720444/>.

SINGH, Megha; SHAIK, Abdul Gafoor. Broken Rotor Bar Fault Diagnosis of a Three-phase Induction Motor using Discrete Wavelet Transform. In: 2019 IEEE PES GTD GRAND INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXPOSITION ASIA (GTD ASIA) 2019, Anais [...]. : IEEE, 2019. p. 13–17. DOI: 10.1109/GTDAsia.2019.8715925. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8715925/>.

STRANGAS, Elias G.; CLERC, Guy; RAZIK, Hubert; SOUALHI, Abdenour. Fault Diagnosis, Prognosis, and Reliability for Electrical Machines and Drives. [s.l.] : Wiley-IEEE Press, 2002.

O programa de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL como forma de fomento a novas soluções de sustentabilidade energética

The ANEEL research and development program as a way to promote new solutions for energy sustainability

Renato Magri

RESUMO

Devido ao papel central do setor elétrico no desenvolvimento humano e econômico, aliado a questões relativas ao aumento de demanda de energia, esgotamento de recursos naturais e impactos ao meio ambiente, órgãos governamentais procuram desenvolver ferramentas de incentivo ao desenvolvimento de novas tecnologias e processos que possam proporcionar soluções energéticas com melhores resultados sociais, econômicos e ambientais. Assim foi criado o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica que obriga as empresas de energia em território nacional a aplicar um percentual de sua receita em projetos de pesquisa e desenvolvimento visando trazer benefícios à sociedade.

Palavras-chave: pesquisa e desenvolvimento. inovação. política pública. sustentabilidade. energia elétrica.

ABSTRACT

Due to the central role of the electricity sector in human and economic development, combined with issues related to the increase in energy demand, the depletion of natural resources and the impact on the environment, government agencies must develop tools to encourage the development of new technologies and processes that can provide energy solutions with better social, biological and environmental results. Thus, the Technological Research and Development Program for the Electric Energy Sector was created, which obliges energy companies in the national territory to



apply a percentage of their revenue in research and development projects aimed at bringing benefits to society.

Keywords: research and development. innovation. public policy. sustainability. electric energy.

INTRODUÇÃO

A expansão dos meios de produção e dos centros urbanos impulsionada pelo desenvolvimento econômico e social, pela faz com que a sociedade tenha que lidar com o desafio do crescente aumento da demanda de energia frente ao esgotamento de recursos naturais, assim como das diversas questões ambientais envolvidas.

De acordo com Januzzi e Swisher (1997), o crescimento da urbanização e a industrialização seguem padrões intensivos de energia. A sociedade demanda transportes, produtos e serviços que dependem intensamente de eletricidade. Nesse contexto, a oferta de energia elétrica tornou-se, então, um fator limitante para o crescimento econômico de diversas nações, e hoje representa um fator de preocupação tanto em âmbito econômico quanto ambiental.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012), o crescimento econômico está vinculado à expansão da oferta de energia. Porém, com o progressivo aumento da consciência ecológica, dos preços da energia elétrica e dos problemas ambientais gerados pela queima de combustíveis fósseis, a sustentabilidade energética passou a ser cada vez mais um tema de interesse social.

Para Goldemberg e Lucon (2007), uma das formas de se resolver esse problema é a implantação de políticas públicas que fomentem novas e melhores formas de conservação e geração de energia.

MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO

Considerando a relevância do tema de meio ambiente e sustentabilidade no setor energético, esse artigo visa demonstrar a importância do estabelecimento de políticas públicas, como o Programa de P&D ANEEL, que visem trazer inovações e novas soluções energéticas.

Foi realizada uma pesquisa de caráter qualitativo incorporando aspectos quantitativos. Quanto à pesquisa qualitativa, Minayo e Sanches (1993) afirmam que esta adequa-se a aprofundar a complexidade de fenômenos, fatos e processos particulares e específicos de grupos mais ou menos delimitados em extensão e capazes de serem abrangidos intensamente

Para que fosse possível atingir os objetivos propostos neste projeto, foi realizada uma revisão bibliográfica por meio de publicações como artigos científicos, livros e páginas na internet sobre o tema de pesquisa, tendo em vista que a revisão de literatura é aquela que “[...] procura identificar, localizar e obter documentos pertinentes ao estudo de um tema bem limitado, levantando-se a bibliografia básica” (MACEDO, 1994, p.13).

A análise documental foi realizada através de legislações sobre o tema de pesquisa, manuais do órgão regulador do setor elétrico e demais documentos relacionados ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento, uma vez que, conforme Cellard (2008), trata-se de um método de coleta de dados que elimina, ao menos parcialmente, a possibilidade de ocorrer qualquer influência, pela presença ou intervenção do pesquisador, no conjunto das interações, acontecimentos ou comportamentos pesquisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012), o crescimento econômico está atrelado à expansão da oferta de energia. Porém, com o aumento da consciência ecológica, dos preços da energia elétrica e dos problemas ambientais gerados pela queima de combustíveis fósseis, a sustentabilidade energética passou a ser um fator de preocupação constante.

Segundo Dudziak (2007, p. 2),

Uma vez que a estrutura dos relacionamentos globais é complexa e interdependente, vivenciamos hoje um profundo entrelaçamento entre as nações [...] do ponto de vista ecológico, esse entrelaçamento se manifesta através de uma conscientização cada vez maior a respeito dos efeitos humanos sobre a natureza. Surge, assim, uma consciência ecológica global e a consideração do mundo como um sistema complexo.

Januzzi e Swisher (1997) reforçam que a crescente percepção ambiental tem oferecido importantes resistências ao desenvolvimento e uso de algumas fontes energéticas não renováveis, tais como nuclear e fóssil. Diversos setores da sociedade vêm debatendo essa questão e levantando alternativas. Uma delas reside no desenvolvimento de tecnologias que permitam maior aproveitamento energético, bem como o desenvolvimento de fontes de energia não convencionais, que possuam a capacidade de regeneração ou renovação.

Para Goldemberg e Lucon (2007), uma das formas de se resolver esse problema é a implantação de políticas públicas que fomentem melhores formas de conservação e geração de energia. Nesse contexto, o governo nacional, por meio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão regulador do sistema de energia elétrica do país, procurou desenvolver ferramentas de incentivo ao desenvolvimento de novas tecnologias e processos, visando o fornecimento de soluções a este desafio de atender à crescente demanda por energia frente à escassez de recursos não renováveis e suas questões socioambientais.

Como parte das ações governamentais, foi criado o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento tecnológico do setor de energia elétrica (P&D ANEEL), o qual obriga as empresas de energia elétrica a aplicar um percentual de sua receita em projetos de pesquisa e desenvolvimento que possam trazer benefícios ao setor elétrico e, por consequência, a toda sociedade.

Conforme Fernandino e Oliveira (2010), até os anos 1990, o setor elétrico era operado, em grande parte, por empresas estatais com monopólios regionais. A partir dos anos 1990, começou a ser desenvolvido o Programa Nacional de Desestatização, visando um modelo que aumentasse a competição e a eficiência do sistema, incentivasse novos investimentos, assegurasse a melhoria da qualidade dos serviços e possibilitasse a diversificação da matriz geradora de energia.

Visando adequar o modelo em implantação, foi constituído, em 2002, o Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico, cujo trabalho resultou em um conjunto de novidades para o setor. Foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE).

É nesse cenário que os investimentos em tecnologia e inovação passaram a representar papel fundamental para as concessionárias de energia. Pode-se ressaltar a relevância que as inovações, tanto tecnológicas quanto gerenciais, significam em termos de possibilidades de criação de diferenciais na qualidade dos produtos e serviços.

Guimarães (2000) enuncia que inovação é a introdução no mercado de produtos, processos, métodos ou sistemas não existentes anteriormente ou com alguma característica nova e diferente da até então em vigor. De acordo com a ANEEL (2012), ocorre inovação tecnológica de um produto quando suas características de projeto são modificadas para prover melhor serviço aos usuários. As inovações podem envolver tecnologias novas ou combinação de tecnologias existentes para atender novos usos ou, ainda, melhorar o desempenho de produtos existentes.

Os gastos com Pesquisa e Desenvolvimento apresentam relevância para o desenvolvimento sustentável e de acordo com o IBGE (2015, p. 252):

Expressam o grau de investimento do País no desenvolvimento científico e tecnológico. Para assegurar um processo de desenvolvimento sustentável, é necessário que uma parte do esforço nacional esteja destinada à pesquisa científica. O próprio surgimento e a adoção de inovações tecnoprodutivas, orientadas ao desenvolvimento sustentável, dependem do investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Além disso, a produção sistemática de conhecimentos científicos sobre mudanças no clima, esgotamento dos recursos naturais, crescimento demográfico e degradação do meio ambiente, é essencial à formulação de estratégias de desenvolvimento sustentável.

Buscando soluções para o problema do aumento contínuo da demanda por energia face ao esgotamento dos recursos naturais, torna-se cada vez mais necessária a criação de políticas públicas que fomentem a inovação, como o desenvolvimento de novas fontes alternativas e aprimoramento da eficiência energética, entre outras.

Fontes alternativas são aquelas que buscam obter energia a partir de fontes naturais que possuem a capacidade de regeneração ou renovação. Como exemplos de formas de energias renováveis, podem ser citadas: a energia solar, eólica, hidráulica, biomassa, geotérmica e mareomotriz. Ao contrário dos combustíveis não renováveis, essas fontes alternativas, em geral, causam menores impactos ao meio ambiente. São, portanto, alternativas ao sistema energético tradicional, sobretudo num contexto de maior apelo social por questões ambientais e de sustentabilidade (SANTOS, 2007).

Conforme a Empresa Brasileira de Pesquisa Energética (EPE, 2021), a matriz energética brasileira ainda depende em grande parte de fontes não renováveis e poluentes, como as oriundas de petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio e derivados. Já com relação à matriz elétrica brasileira (que é parte da matriz energética), esta é baseada em grande parte na geração hidráulica.

De acordo com Sousa (2000), ainda que as grandes hidrelétricas produzam uma energia que pode ser considerada “renovável”, elas também causam fortes impactos ambientais e sociais, já que no processo de construção de suas usinas, imensas áreas naturais são alagadas, impactando não só o meio ambiente, como também as populações estabelecidas nas áreas afetadas pelas barragens. Busca-se, então, desenvolver fontes de energia consideradas mais “limpas” como a eólica, solar, biomassa, entre outras.

Nesse contexto, como parte das ações governamentais, foi criado o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do setor de energia elétrica, o qual obriga as empresas do setor elétrico nacional a aplicar um percentual de sua receita em projetos de P&D que possam trazer benefícios ao setor elétrico e a toda sociedade.

O PROGRAMA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA

O setor de energia elétrica brasileiro investe anualmente centenas de milhões de reais em projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. A aplicação desses recursos é uma obrigação imposta pela Lei no 9.991, de 24 de julho de 2000.

Os programas e projetos de P&D são sustentados por meio de recursos financeiros oriundos das empresas concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, as quais devem aplicar no mínimo 1% (um por cento) da sua receita operacional líquida para esse fim. A ANEEL é a instituição responsável pela avaliação e fiscalização da execução dos projetos para reconhecimento dos investimentos realizados (MACHADO *et al.*, 2007).

Por isenção, ficaram excluídas dessa obrigatoriedade as empresas que geram energia exclusivamente a partir de instalações eólica, solar, biomassa, pequenas centrais hidrelétricas e cogeração qualificada, observando-se, para essas últimas, o disposto na Resolução nº 652, de 9 de dezembro de 2003.

A Tabela 1, a seguir, demonstra a regulamentação vigente no Programa de P&D:

Tabela 1 – Regulamentação vigente.

Qual é o documento?	O que traz o documento?
Procedimentos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (PROP&D) Resolução Normativa 754/2016	<ul style="list-style-type: none"> • Módulo 1 - Introdução • Módulo 2 - Diretrizes Básicas • Módulo 3 - Projeto de Gestão • Módulo 4 - Avaliação Inicial e Final • Módulo 5 - Prestação de Contas
Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica - 2012 Resolução Normativa 504/2012	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentação • Aspectos legais e regulatórios -Diretrizes básicas -Elaboração dos programas de P&D • Elaboração dos projetos de P&D • Avaliação final dos projetos de P&D - Contabilização e controle dos gastos realizados em projetos de P&D • Fiscalização dos projetos e programas de P&D • Apêndice A: Parâmetros e critérios de avaliação • Glossário
Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica - 2008 Resolução Normativa 316/2008	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentação • Aspectos legais e regulatórios • Diretrizes básicas - Elaboração dos programas de P&D • Elaboração dos projetos de P&D • Avaliação inicial - Avaliação final • Contabilização e controle dos gastos • Fiscalização dos programas e projetos de P&D

Fonte: ANEEL (2012, p.51).

Também compõem a regulamentação vigente do Programa de P&D ANEEL:

- Manual de Procedimentos Previamente Acordados para Auditoria Contábil e Financeira de Projetos, Planos e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D e Eficiência Energética – EE - VERSÃO 2016 - PPA/2016 (DESPACHO N° 2.013, DE 27 DE JULHO DE 2016), elaborado pela Superintendência de Fiscalização Econômica e Financeira – SFF em conjunto com a Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – SPE da ANEEL, reúne a regulamentação relacionada à constituição e aplicação dos valores destinados aos projetos, projetos/planos de gestão e programas de P&D e de EE, aperfeiçoado e atualizado conforme os dispositivos do Manual de Contabilidade do Setor Elétrico - MCSE, aprovado pela Resolução nº 605/2014, em vigor desde 01/01/2015, para utilização pelas Concessionárias e Permissionárias de Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica, Concessionárias de Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica, Concessionárias de Geração e Autorizadas à Produção Independente de Energia Elétrica e Concessionárias de Geração de Energia Elétrica na modalidade Autoprodução, quando houver receitas advindas de energia comercializada, excluindo-se, por isenção, as empresas que gerem energia exclusivamente a partir de instalações eólica, solar, biomassa.

- Manual para Auditoria dos Programas de Eficiência Energética e de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (aprovado pela REN nº 618/2014) - Manual para Auditoria

dos Programas de Eficiência Energética e de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regidos pelas Resoluções Normativas nº 176/2005 e 219/2006, e respectivas regulamentações anteriores. Faz parte deste manual Planilha-modelo do RELATÓRIO DE AUDITORIA DE PROJETO DE P&D (RAPRJ-PED) para envio de informações com os itens que devem ser apresentados pela empresa.

- Procedimentos Previamente Acordados para Auditoria Técnica, Contábil e Financeira dos Programas e Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D e Eficiência Energética – EE (aprovado pela Despacho nº 1975/2013) - procedimentos, elaborado pela Superintendência de Fiscalização Econômica e Financeira – SFF da ANEEL, destina-se ao exame da consistência dos valores apresentados nas contas contábeis e controles auxiliares, bem como à comprovação de sua devida aplicação nos projetos de P&D e EE, assim como, na análise quanto à adequação dos programas de P&D e EE (regulamentação anterior a 2008).

- Manual de Procedimentos Previamente Acordados para Auditoria Contábil e Financeira de Projetos, Planos e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D e Eficiência Energética – EE (aprovado pelo Despacho nº 1976/2013) - Manual, elaborado pela Superintendência de Fiscalização Econômica e Financeira – SFF da ANEEL, reúne a regulamentação relacionada à constituição e aplicação dos valores destinados aos projetos, projetos/planos de gestão e programas de P&D e de EE, para utilização pelas Concessionárias e Permissionárias de Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica, Concessionárias de Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica, Concessionárias de Geração e Autorizadas à Produção Independente de Energia Elétrica e Concessionárias de Geração de Energia Elétrica na modalidade Autoprodução, quando houver receitas advindas de energia comercializada, excluindo-se, por isenção, as empresas que gerem energia exclusivamente a partir de instalações eólica, solar, biomassa, pequenas centrais hidroelétricas e cogeração qualificada (legislação posterior a 2008).

- PPA AUDITORIA SIMPLIFICADA - Com o intuito de pacificar o entendimento e nivelar as ações, elaborou-se uma sequência de procedimentos, extraída do referido PPA, mas expurgada das análises não aplicáveis à “simplificada”.

- Manual de Procedimentos Previamente Acordados para Auditoria Contábil e Financeira de Projetos, Planos e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D e Eficiência Energética - EE (Versão 01-2011) - Manual, elaborado pela Superintendência de Fiscalização Econômica e Financeira – SFF da ANEEL, reúne a regulamentação relacionada à constituição e aplicação dos valores destinados aos projetos, projetos/planos de gestão e programas de P&D e de EE, para utilização pelas Concessionárias e Permissionárias de Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica, Concessionárias de Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica, Concessionárias de Geração e Autorizadas à Produção Independente de Energia Elétrica e Concessionárias de Geração de Energia Elétrica na modalidade Autoprodução, quando houver receitas advindas de energia comercializada, excluindo-se, por isenção, as empresas que gerem energia exclusivamente a partir de instalações eólica, solar, biomassa, pequenas centrais hidroelétricas e cogeração qualificada (legislação posterior a 2008).

- Manual de Procedimentos Previamente Acordados para Auditoria Contábil e Financeira de Projetos, Planos e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D e Eficiência Energética - EE (Versão 02-2010) - Manual, elaborado pela Superintendência de Fiscalização Econômica e Financeira – SFF da ANEEL, reúne a regulamentação relacionada à constituição e aplicação dos valores destinados aos projetos, projetos/planos de gestão e programas de P&D e de EE, para utilização pelas Concessionárias e Permissionárias de Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica, Concessionárias de Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica, Concessionárias de Geração e Autorizadas à Produção Independente de Energia Elétrica e Concessionárias de Geração de Energia Elétrica na modalidade Autoprodução, quando houver receitas advindas de energia comercializada, excluindo-se, por isenção, as empresas que gerem energia exclusivamente a partir de instalações eólica, solar, biomassa, pequenas centrais hidroelétricas e cogeração qualificada (legislação posterior a 2008).

- Manual de Procedimentos Previamente Acordados para Auditoria Contábil e Financeira de Projetos, Planos e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D e Eficiência Energética - EE (Versão 01-2010) - Manual, elaborado pela Superintendência de Fiscalização Econômica e Financeira – SFF da ANEEL, reúne a regulamentação relacionada à constituição e aplicação dos valores destinados aos projetos, projetos/planos de gestão e programas de P&D e de EE, para utilização pelas Concessionárias e Permissionárias de Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica, Concessionárias de Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica, Concessionárias de Geração e Autorizadas à Produção Independente de Energia Elétrica e Concessionárias de Geração de Energia Elétrica na modalidade Autoprodução, quando houver receitas advindas de energia comercializada, excluindo-se, por isenção, as empresas que gerem energia exclusivamente a partir de instalações eólica, solar, biomassa, pequenas centrais hidroelétricas e cogeração qualificada (legislação posterior a 2008).

- Resolução Normativa nº. 618, de 1º/07/2014 - Estabelece disposições relativas à contratação de auditoria para os Programas de Eficiência Energética e de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica.

- Resolução Normativa nº. 504, de 14/08/2012 - Altera a Resolução Normativa nº 316, de 13 de maio de 2008 e aprova o Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, versão 2012.

- Resolução Normativa nº 316 de 13/05/2008 - Aprova o Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, versão 2008.

- Guia do Avaliador de Projetos de P&D - O documento “Guia do Avaliador de Projetos de P&D” apresenta as diretrizes e os procedimentos para emissão de pareceres de avaliação de propostas (avaliação inicial) e resultados (avaliação final) de projetos de P&D regulados pela ANEEL, em conformidade com o Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, aprovado pela Resolução Normativa nº 316, de 13 de maio de 2008 (Manual de P&D, versão 2008).

Segundo a ANEEL (2012), projetos participantes do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento tecnológico do setor de energia elétrica são aqueles destinados à

capacitação e ao incremento tecnológico das empresas do setor elétrico, visando à geração de novos processos ou produtos, ou o aprimoramento de suas características. Devem ser gerenciados pela empresa, por meio de uma estrutura própria e permanente de gestão tecnológica.

Conforme a agência reguladora,

Deseja-se promover e viabilizar o ciclo completo da cadeia da inovação, incentivando a associação de empresas em torno de iniciativas que disponham de escala apropriada para desenvolver conhecimento e transformar boas ideias, experimentos laboratoriais bem-sucedidos e qualidade de modelos matemáticos em resultados práticos que melhorem o desempenho das organizações e a vida das pessoas (IBID. p.14).

De acordo com a ANEEL (2012), todo projeto de P&D deverá ser enquadrado em sua fase proposta para desenvolvimento dentro da cadeia da inovação, podendo ser classificada como:

a) Pesquisa Básica Dirigida: Fase teórica ou experimental destinada à busca de conhecimento sobre novos fenômenos, com vistas ao desenvolvimento de produtos e processos inovadores. Envolve a análise de propriedades, estruturas e conexões para formular ou comprovar hipóteses, teorias e leis. Pode ser considerada, como exemplo, a investigação de materiais, como supercondutores e novos isolantes;

b) Pesquisa Aplicada: Fase destinada à aplicação de conhecimento adquirido, com vistas ao desenvolvimento ou aprimoramento de produtos e processos. Conduz à descoberta de aplicações do conhecimento advindo da pesquisa básica dirigida ou de novos métodos e maneiras de alcançar um objetivo específico. Envolve o conhecimento disponível e sua aplicação na busca de oportunidades ou na solução de problemas e desafios. Um exemplo de atividades nesta fase pode ser o desenvolvimento de modelos de funções ou de processos em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica;

c) Desenvolvimento Experimental: Fase sistemática, delineada a partir de conhecimento pré-existente, visando à comprovação ou à demonstração da viabilidade técnica ou funcional de novos produtos, processos, sistemas e serviços ou, ainda, o aperfeiçoamento do já produzido ou estabelecido. É, portanto, o processo de transformação ou refinamento de conhecimento advindo da pesquisa básica ou aplicada em programas operacionais, incluindo projetos de demonstração e testes, para posterior aplicação comercial. São exemplos de atividades desta fase o desenvolvimento de software para aplicação no setor de energia elétrica e de equipamentos (protótipos), processos e sistemas;

d) Cabeça-de-série: Fase que considera aspectos relativos ao aperfeiçoamento de protótipo obtido em projeto de P&D anterior. Procura-se, assim, melhorar o desenho e as especificações do protótipo para eliminar peças e componentes com dificuldade de reprodução em larga escala. Definem-se também as características básicas da linha de produção e do produto;

e) Lote Pioneiro: Fase que considera aspectos relativos à produção em “escala piloto” de cabeça-de-série desenvolvido em projeto de P&D anterior. Nessa fase realiza-se uma primeira fabricação, em “escala piloto”, para ensaios de validação, análise de custos e refino do projeto, com vistas à produção industrial e/ou à comercialização; e

f) **Inserção no Mercado:** Fase que encerra a cadeia da inovação e busca a difusão no setor elétrico dos resultados obtidos. São previstas as seguintes atividades: estudos mercadológicos, material de divulgação, registro de patentes, viagens, diárias e serviços jurídicos.

O Programa visa alocar adequadamente recursos humanos e financeiros em projetos que demonstrem a originalidade, aplicabilidade, relevância e a viabilidade econômica de produtos e serviços, nos processos e usos finais de energia.

A ANEEL disponibiliza uma série de dados a respeito de seu Programa de P&D em sua página na internet. Nela é possível obter uma planilha denominada “Lista de Projetos de P&D (Resolução Normativa 316/2008)” com dados de projetos entre 2008 e 2018. Esta planilha contém a lista de todos os Projetos de P&D que foram carregados no Duto da ANEEL desde a Resolução Normativa 316/2008.

Encontram-se, entre outras, as seguintes informações: o nome da empresa e sua sigla; o código ANEEL do projeto; o título do projeto; se o projeto participou de uma chamada P&D Estratégico e, caso afirmativo, qual o edital; se foi feita uma avaliação inicial por parte da ANEEL; a duração prevista do projeto (em meses); o segmento da empresa gestora do projeto; o tema de pesquisa do projeto; a fase da Cadeia da Inovação do Projeto; o tipo de produto principal do projeto; o custo previsto do projeto; a data de cadastro na ANEEL; a data de emissão de parecer ANEEL; se houve interesse da ANEEL na execução; a data de início de Execução; o compartilhamento dos resultados do projeto; o prazo previsto conclusão; se houve alteração na duração e qual a nova duração (em meses); o prazo para envio dos arquivos do Relatório Final; a data de cadastro do Relatório Final do projeto; a duração final do projeto (em meses); o custo total do projeto; a data de emissão do parecer da ANEEL; o valor reconhecido na Avaliação Final; o valor glosado na Avaliação Final; se houve emissão de parecer de reconsideração; o valor reconhecido na reconsideração; e o valor glosado na reconsideração.

A distribuição desses investimentos, entre os temas de pesquisa dos projetos, pode ser visualizada na tabela 2:

Tabela 2 - Investimentos entre os temas de pesquisa dos projetos.

Tema	Investimento	Percentual
Fontes alternativas de geração de energia elétrica	2.768.597.644,63	32,2%
Supervisão, Controle e Proteção de Sistemas de Energia Elétrica	889.473.476,54	10,4%
Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica	745.389.575,99	8,7%
Operação de Sistemas de Energia Elétrica	515.027.918,56	6,0%
Meio Ambiente	453.434.960,66	5,3%
Medição, faturamento e combate a perdas comerciais	393.239.992,12	4,6%
Qualidade e Confiabilidade dos Serviços de Energia Elétrica	359.381.689,48	4,2%
Eficiência Energética	349.939.574,20	4,1%
Geração Termelétrica	349.877.815,31	4,1%
Segurança	264.492.750,73	3,1%
Gestão de Bacias e Reservatórios	251.149.055,49	2,9%
Outros	1.245.976.768,64	14,5%
Total	8.585.981.222,35	100,0%

Fonte: ANEEL (2023).

Com relação aos temas de pesquisa dos projetos participantes do Programa de

P&D, nota-se, por meio da tabela 2, que o investimento está distribuído em diversos temas, sendo onze principais. O tema mais pesquisado é o de fontes alternativas de geração de energia elétrica, o qual concentra 32,2% do total dos investimentos, e que corrobora com a importância do Programa de P&D ANEEL com relação à questão da sustentabilidade energética, tema do artigo.

Na sequência estão os seguintes temas: Supervisão, Controle e Proteção de Sistemas de Energia Elétrica, com 10,4%; Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, com 8,7%; Operação de Sistemas de Energia Elétrica, com 6,0%; Meio Ambiente, com 5,3%; Medição, Faturamento e Combate a Perdas Comerciais, com 4,6%; Qualidade e Confiabilidade dos Serviços de Energia Elétrica, com 4,2%; Eficiência Energética e Geração Termelétrica, ambos com 4,1%; Segurança, com 3,1%; Gestão de Bacias e Reservatórios, com 2,9%; e Outros com 14,5%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme exposto, o investimento em inovação apresenta-se como o principal mecanismo para melhorar a eficiência na utilização de recursos energéticos. Nesse sentido, ocorreu a promulgação da Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, que determinou que empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do serviço público de energia elétrica realizem investimentos mínimos em P&D, segundo o regimento da ANEEL.

Segundo a ANEEL (2021), o novo cenário do setor elétrico, em que a “transição energética” tem papel central, envolve a implementação de novas tecnologias, infraestrutura e inovação sistêmica. A agência definiu as condições para execução das pesquisas e para a avaliação e o acompanhamento dos resultados dos projetos de P&D visando estimular as empresas do segmento em atividades de inovação, a fim de lhes contribuir para enfrentar seus desafios tecnológicos e de mercado.

Como pode ser percebido no trabalho, o Programa surgiu de uma demanda da sociedade, por conta de preocupações ambientais, econômicas e sociais com relação ao esgotamento dos recursos naturais frente ao incremento de necessidades energéticas, e tornou-se uma das principais ferramentas de inovação no setor elétrico, com investimentos no avanço da ciência e tecnologia nacional.

Entende-se que o Programa visa promover e viabilizar o ciclo completo da cadeia da inovação, incentivando o desenvolvimento de conhecimento, transformando este em resultados práticos, buscando aprimorar o setor energético e gerando benefícios para a sociedade.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica. Brasília, 2008.

_____. Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica. Brasília, 2012.

_____. Programa de P&D. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/>>. Acesso em 14 de fevereiro de 2022.

_____. Resolução ANEEL n. 316, de 13 de maio de 2008. Aprova o Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial, de 14 mai. 2008.

_____. Resolução ANEEL n. 652, de 9 de dezembro de 2003. Estabelece os critérios para o enquadramento de aproveitamento hidrelétrico na condição de Pequena Central Hidrelétrica (PCH). Diário Oficial, de 10 dez 2003.

BRASIL. Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]. Brasília, 25 jul. 2000.

CELLARD, André. A análise documental. In: POUPART, Jean. A pesquisa qualitativa: enfoques epistemológicos e metodológicos. Petrópolis: Vozes, 2008.

DUDZIAK, Elisabeth Adriana. O bibliotecário como agente de transformação em uma sociedade complexa: integração entre ciência, tecnologia, desenvolvimento e inclusão social. Ponto de Acesso. Salvador, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2021: Ano Base 2020. Brasília, 2021.

FERNANDINO, J.A; OLIVEIRA, J. L. de. Arquiteturas Organizacionais para a Área de P&D em Empresas do Setor Elétrico Brasileiro. Revista de Administração Contemporânea. Curitiba, 2010.

GOLDEMBERG, José; e LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados (USP). São Paulo, 2007.

GUIMARÃES, Fábio Celso de Macedo Soares. A Política de Incentivo à Inovação. Rio de Janeiro. FINEP, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Indicadores de Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, 2012.

_____. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável – Brasil 2015. Rio de Janeiro, 2015.

JANUZZI, Gilberto de Marino; SWISHER, Joel N. P. Planejamento Integrado de Recursos Energéticos. Campinas: Autores Associados, 1997.

MACEDO, N.D. de. Iniciação à pesquisa bibliográfica: guia do estudante para a fundamentação do trabalho de pesquisa. 2.ed. São Paulo: Loyola, 1994.

MACHADO, F.; SALLES-FILHO, S. L. M.; BOER, D. C.; CORDER, S. M. Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação no Setor de Energia Elétrica do Brasil: Em direção a uma ferramenta de apoio à decisão. In: ALTEC, 2007. XII Seminário Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica. Buenos Aires, 2007.

MINAYO, M. C. S. & SANCHES, O. Quantitativo-Qualitativo: Oposição ou Complementaridade? Cad. Saúde Pública. Rio de Janeiro, 9 (3): 239-262, jul/set, 1993.

SANTOS, Myrlla Galdino R. S. e MOTHÉ, Cheila Gonçalves. Fontes Alternativas de Energia. Revista Analítica. Rio de Janeiro, 2007.

SOUSA, Wanderley Lemgruber de. Impacto Ambiental de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa de Duas Abordagens. Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Ciências em Planejamento Energético – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2000.

Organizadora

Elisangela Ferruci Carolino

Graduada em Geografia, Mestre e Doutora em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista – UNESP. Professora universitária de Graduação e Pós-Graduação da área Ambiental e Metodologia Científica.

Índice Remissivo

A

abordagem 10, 16, 17, 80, 81, 84, 85, 86, 89, 93
abordagens 57, 70, 80, 92, 93, 106, 116
águas 11, 15
ambientais 12, 14, 15, 17, 18, 19, 39, 58, 59, 60, 63, 66,
106, 108, 109, 110, 113, 114, 115, 117
ambiente 14, 15, 34, 58, 60, 61, 67, 68, 71, 75
ambientes 68, 71, 78, 106, 116
análise 12, 36, 88, 89, 93, 102, 109, 110, 111, 113, 115,
116, 117
aquecimento global 10, 17, 18, 22, 55, 57, 60, 64
aterros sanitários 55, 59

C

climática 55, 56, 57, 61
combustível 11, 13, 80, 81, 96, 97, 98, 99, 102, 104
concessionária 21, 24, 27
consumo 10, 13, 14, 17, 18, 22, 23, 24, 28, 38, 39, 40,
42, 44, 45, 48, 49, 50, 51, 52
crescimento 10, 11, 12, 15, 16, 19
custo 21, 23, 24, 25, 36, 38, 40, 44, 45, 47, 48, 50, 51, 81,
89, 97, 98, 106, 107, 108, 115, 117
custos 15, 19, 21, 22, 25, 34, 42

D

desenvolvimento 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 52,
55, 58, 61, 62, 63, 64, 66, 85, 89, 94, 104, 106, 107,
108, 120, 121, 122, 123, 124, 128, 130, 131
diagnóstico 108, 109, 110, 111, 112, 117

E

econômico 10, 11, 12, 19, 120, 121, 122
eficiência energética 12, 17, 19, 20, 65, 78, 106, 107,
109, 115, 117
elementos 11, 61, 82, 86, 102, 106, 107, 111
elementos naturais 11
elétrica 11, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 35,
36

elétricas 44, 67, 75, 78
eletricidade 14, 15, 16, 25, 42, 44
elétrico 23, 40, 109, 110, 54
eletroquímicas 97, 103
eletroquímico 96, 104
energia 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 57, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 64, 47, 48, 49, 50, 52, 56, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 78, 80, 82, 90, 53, 54, 53, 54
energia elétrica 16, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 31, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 68, 69, 82, 90, 97, 104, 107, 117, 120, 121, 122, 124, 127, 128, 130, 53
energias 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19
energia solar 12, 15, 16, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 28, 37, 38, 39, 40, 54
equipamentos 11, 16, 24, 46, 67, 68, 69, 70, 72, 74
estratégias 55, 57, 58, 59, 64, 66

F

ferramentas 109, 113, 115, 117
fontes limpas 11, 17
fotovoltaica 12, 19, 21, 22, 25, 28, 29, 30, 32, 38, 39, 42, 54
fotovoltaico 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 35, 36
fotovoltaicos 15, 21, 23, 24, 27, 31, 32, 33, 34

H

hidrogênio 79, 80, 94
humanidade 13, 14, 22, 55, 56, 59
humano 12, 13, 18

I

iluminação 12, 63, 67, 68, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78
impacto ambiental 17, 21
Indústria 4.0 106, 107, 114
industriais 18, 106, 107, 111
industrial 13, 58, 60, 62, 63, 85, 106, 107, 108, 114, 117
inovação 19, 65, 120, 123, 128, 129, 130

instalações 15, 28, 33, 44, 67, 70
inteligência 11, 107, 116, 117, 53
investimento 15, 23, 38, 39, 45, 49, 51, 52

L

luminosidade 67
luminotécnico 67, 68, 71, 78

M

manufatura 107
máquinas elétricas 106, 107, 108, 109, 111, 113, 114, 115, 117
meio ambiente 14, 15, 58, 60, 120, 121, 123, 124, 131
membrana polimérica 97
membranas 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105
mercado energético 10, 19
método 42, 78, 79, 84, 99, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 117
microgeração 22, 27, 28, 38, 52
motores elétricos 106, 107, 108, 113, 117
mudanças climáticas 15, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 62, 64

O

operação 23, 36, 79, 81, 82, 83, 90, 92, 93, 53

P

planejamento 55, 57, 58, 62, 64
poliméricas 96, 97, 98, 104
política pública 120
políticas 15, 17, 55, 57, 59, 62, 64, 65, 66
processo 10, 13, 14, 56, 58, 60, 62, 75, 77, 78, 80, 84, 87, 89, 90, 93, 108, 113, 114, 115
processos 20, 58, 59, 60, 61, 81, 87, 107, 120, 121, 122, 123, 128, 129
produção 10, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 27, 28,

35, 36, 42, 56, 59, 62, 79, 80, 81, 82, 86, 87, 89, 90,
92, 93, 94, 121, 123, 128
produtivo 10, 106, 108, 114, 115, 117
projeto 23, 24, 27, 30, 33, 34, 36, 44, 67, 69, 70, 71, 75,
76, 77, 78, 79, 80, 81, 85, 86, 93, 94

R

reciclagem 55, 59, 63, 64, 117
renováveis 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20
residencial 21, 36
resíduos 14, 16, 21, 55, 59, 60, 63, 64
responsabilidade 5
resultados 17, 18, 49, 63, 68, 71, 72, 73, 74, 75, 78, 80

S

segurança 40, 42, 44, 69, 71, 79, 80, 81, 92, 93, 108,
111, 115
sistema 5, 10, 11, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28,
29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 58, 41, 59,
42, 43, 44, 45, 46, 47, 65, 48, 49, 50, 51, 52, 57, 58,
64, 73, 78, 79, 97, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 90, 91,
53, 54, 53, 54
sistema fotovoltaico 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 31,
34, 35, 36, 38, 40, 41, 44, 45, 48, 54
sistemas 12, 15, 21, 27, 34, 36, 42, 60, 62, 80, 81, 84, 92
sistemas fotovoltaicos 15, 21, 34, 42
social 120, 121, 123, 131
softwares 67, 68
solar 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 33, 35, 36, 37
solarimétrico 21, 22, 35
subestação 67, 68, 69, 70, 71, 72, 74, 78
sustentabilidade 11, 12, 19, 20, 39, 55, 56, 57, 58, 59,
61, 62, 64, 65, 106, 107, 109, 115, 117, 120, 121,
122, 123, 130
Sustentabilidade 2, 10
sustentável 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 39, 55,
62, 64, 65

T

tecnologia 15, 16, 42
tecnologias 11, 14, 15, 19, 34, 104, 120, 122, 123, 130

U

urbanização 55, 56, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 66
urbano 55, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 66

V

viabilidade 12, 24, 38, 39, 45, 54
viabilidade econômica 38, 39



AYA EDITORA
2023